12ο ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΓΙΑ ΤΙΣ ΗΠΙΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ΤΟΜΟΣ ΠΡΑΚΤΙΚΩΝ

Θεσσαλονίκη

7-9 ΑΠΡΙΛΙΟΥ 2021

ΔΙΟΡΓΑΝΩΣΗ
ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΗΛΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ
ΣΥΝΔΙΟΡΓΑΝΩΣΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΑΠΘ

Υπό την αιγίδα της
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗΣ ΣΧΟΛΗΣ ΤΟΥ ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟΥ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

https://solarinstitute.gr

12ο Εθνικο Συνεδριο του I.H.T. για τις Ηπιες Μορφες Ενεργειας

ISSN 1108 - 3603

Επιμέλεια έκδοσης
Ε. Κυριάκη, Γ. Μαρτινόπουλος, Γ. Τσιλιγκιρίδης

Έκδοση
Ινστιτούτο Ηλιακής Τεχνικής
Τ.Θ. 487, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
541 24 Θεσσαλονίκη
Τηλ.: 2310 996081, 2310 996084 - Fax: 2310 996087
http://solarinstitute.gr/, e-mail: iht@eng.auth.gr

Σελιδοποίηση - Επιμέλεια εξωφύλλου
Δημήτρης Ε. Κατέρης

Εκτύπωση - Βιβλιοδεσία
Εκδόσεις Γιαχούδη

Κ. Μελενίκου 15, τ.κ. 546 36, Θεσσαλονίκη
Τηλ.: 2310 216 779, 2310 245 333

12^{Ο} ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ

ΓΙΑ ΤΙΣ ΗΠΙΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Θεσσαλονίκη, 7-9 Απριλίου 2021

Εναρκτήρια Ομιλία του Προέδρου του ΔΣ του ΙΗΤ
καθ. Γιώργου Τσιλιγκιρίδη

Κύριε Κοσμήτορα της Πολυτεχνικής Σχολής, συνάδελφε Κώστα Κατσιφαράκη,
Κύριε Πρόεδρε του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του ΑΠΘ, συνάδελφε Θανάση Μιχαηλίδη,
Αγαπητοί Προσκεκλημένοι Ομιλητές,
Αγαπητοί Σύνεδροι,

Σας καλωσορίζω στο 12ο Εθνικό Συνέδριο για τις ΗΜΕ του ΙΗΤ, που συνδιοργανώνεται με το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών και τελεί υπό την αιγίδα της Πολυτεχνικής Σχολής του ΑΠΘ.

Το 12ο Συνέδριο είναι ιδιαίτερο για πολλούς λόγους.

- Είναι ιστορικό, γιατί διεξάγεται 30 χρόνια μετά την ίδρυση του ΙΗΤ και 29 χρόνια μετά τη διεξαγωγή του Α΄ Εθνικού Συνέδριου για τις ΗΜΕ, Συνέδριου που από πολλές πλευρές αποτέλεσε το εναρκτήριο λάκτισμα για την ευρεία διάδοση των ΑΠΕ στη χώρα μας και τα ιδιαίτερα ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ των εργασιών του αποτέλεσαν για πολλούς τους κατευθυντήριους άξονες της ανάπτυξης των ΑΠΕ στη χώρα μας.
- Στα 30 αυτά χρόνια της ζωής του, το ΙΗΤ προσπάθησε να αγκαλιάσει τον ελλαδικό χώρο και ταξίδεψε στην Ξάνθη στο ΔΠΘ, στον Βόλο στο Παν. Θεσσαλίας, στην Αθήνα και το ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος, στην Πάτρα στο Πανεπιστήμιο αλλά και στην «μακρινή» Κύπρο, στην Πάφο.
- Τέλος, είναι ιδιαίτερο, γιατί διεξάγεταιγια πρώτη φορά εξ αποστάσεως σε συνθήκες πρωτόγνωρες. Για το λόγο αυτό ζητάμε την κατανόηση

και την βοήθεια σας για την διεξαγωγή του με τα λιγότερα δυνατά προβλήματα.

Από το βήμα αυτό θα ήθελα εκ μέρους του ΔΣ του ΙΗΤ να ευχαριστήσω τα μέλη της Οργανωτικής Επιτροπής του Συνέδριου, τα μέλη της Επιστημονικής Επιτροπής, τα προεδρεία των Συνεδριών, όλους όσους συνέβαλαν λιγότερο ή περισσότερο ώστε να διοργανωθεί και το συνέδριο αυτό του ΙΗΤ, το 12ο, με επιτυχία. Τις επόμενες 3 ημέρες ας συμβάλουμε όλοι μας ώστε να ολοκληρωθεί με επιτυχία παρά τις δύσκολες και πρωτόγνωρες συνθήκες οργάνωσης και διεξαγωγής του.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών και την Κοσμητεία της Πολυτεχνικής Σχολής του ΑΠΘ για την οικονομική στήριξη του Συνέδριου.

Στο σημείο αυτό κηρύσσω την έναρξη των εργασιών του 12ου Συνέδριου για τις ΗΜΕ, και καλώ τον Πρόεδρο της ΟΕ και Γραμματέα του ΔΣ του ΙΗΤ, Δρ. Γεώργιο Μαρτινόπουλο, να αναλάβει την Προεδρία και να προχωρήσει στην υλοποίηση του Προγράμματος του Συνεδρίου.

ΑΝΤΙ ΠΡΟΛΟΓΟΥ

Το Ινστιτούτο Ηλιακής Τεχνικής έχει τη χαρά να παρουσιάσει τον τόμο με τα πλήρη κείμενα των εργασιών που παρουσιάστηκαν στο 12ο ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΓΙΑ ΤΙΣ ΗΠΙΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, το οποίο συνδιοργανώθηκε με το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών και υπό την αιγίδα της Πολυτεχνικής Σχολής του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης.

Η χαρά είναι διπλή καθώς το συνέδριο πραγματοποιήθηκε σε μια πρωτόγνωρη και δύσκολη περίοδο για όλους μας, καταδεικνύοντας ότι όπου υπάρχει θέληση και επιμονή όλα είναι εφικτά. Δυστυχώς δεν κατέστη δυνατή η δια ζώσης πραγματοποίηση του συνεδρίου η οποία θα επέτρεπε την περαιτέρω ώσμωση μεταξύ των συναδέλφων.

Στον τόμο περιλαμβάνονται 79 επιστημονικές εργασίες, οι οποίες έγιναν αποδεκτές για παρουσίαση στο συνέδριο από τις 107 εργασίες που υποβλήθηκαν συνολικά, καθώς και οι παρουσιάσεις των προσκεκλημένων ομιλητών.

Επιπρόσθετα, επιλεγμένες εργασίες θα δημοσιευτούν μετά από κρίση σε special sections των επιστημονικών περιοδικών «International Journal of Sustainable Energy» και «Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects» του εκδοτικού οίκου Taylor Francis καθώς και σε "Special Issue" του επιστημονικού περιοδικού «Green Energy and Sustainability», στην αγγλική γλώσσα και με επέκταση του περιεχομένου τους.

Η Οργανωτική Επιτροπή εκφράζει τις θερμές ευχαριστίες της για την αγάπη με την οποία αγκάλιασαν για άλλη μια φορά το συνέδριο όλοι οι συνάδερφοι, τόσο ηθικά όσο και επιστημονικά οδηγώντας σε ένα ακόμη επιτυχημένο

συνέδριο και ευελπιστούμε να σας δούμε από κοντά και στο επόμενο συνέδριο.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών και την Κοσμητεία της Πολυτεχνικής Σχολής του ΑΠΘ για την οικονομική τους υποστήριξη, καθώς επίσης και την Επιτροπή Ερευνών του ΑΠΘ για την πρόθεση της για δωρεάν διάθεση των χώρων διεξαγωγής του Συνεδρίου σε περίπτωση που το συνέδριο πραγματοποιούνταν δια ζώσης.

Θεσσαλονίκη, Μάιος 2021
Εκ μέρους της Οργανωτικής Επιτροπής
Γ. Μαρτινόπουλος
Δρ. Μηχανολόγος Μηχανικός
Γραμματέας ΔΣ του ΙΗΤ

ΟΡΓΑΝΩΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Μαρτινόπουλος Γεώργιος	Πρόεδρος επιτροπής, Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος
Κυριάκη Έλλη	Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμ. Μηχ. Μηχανικών
Κωτσόπουλος Θωμάς	Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμ. Γεωπονίας
Μισηρλής Δημήτρης	Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος
Πανάρας Γεώργιος	Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, Τμ. Μηχ. Μηχανικών
Παπακώστας Κωνσταντίνος	Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμ. Μηχ. Μηχανικών
Τσικαλουδάκη Κατερίνα	Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμ. Πολ. Μηχανικών

ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Παπαδόπουλος Άγις	Πρόεδρος Επιτροπής Α.Π.Θ., Τμ. Μηχανολόγων Μηχανικών
Ανδρίτσος Νικόλαος	Παν. Θεσσαλίας, Τμ. Μηχανολόγων Μηχανικών
Ανδρουτσόπουλος Ανδρέας	Κ.Α.Π.Ε., Τμ. Κτιρίων
Αξαρλή Κλειώ	Α.Π.Θ., Τμ. Αρχιτεκτόνων Μηχανικών
Αραβαντινός Δημήτριος	Α.Π.Θ., Τμ. Πολιτικών Μηχανικών
Αραμπατζής Γαρύφαλλος	Δ.Π.Θ., Τμ. Δασολογίας & Διαχείρισης Περιβάλλοντος & Φυσικών Πόρων
Αραμπατζής Γεώργιος	Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχ. Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης
Αρβανίτης Απόστολος	Ι.Γ.Μ.Ε., Δ/ση Γεωθερμίας και Θερμομεταλλικών Νερών
Γιαμά Ευφροσύνη	Α.Π.Θ., Τμ. Μηχανολόγων Μηχανικών
Δούκας Χάρης	Ε.Μ.Π., Τμ. Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Η/Υ
Ζαχαριάδης Θεόδωρος	The Cyprus Institute/ Energy
Ηρακλέους Ελένη	Δι.Πα.Ε / Πα.ΚΕ.ΔΙ.Π.Σ. / Τμ. Επιστήμης και Τεχνολογίας
Θεοδοσίου Θεόδωρος	Α.Π.Θ., Τμ. Πολιτικών Μηχανικών
Καλδέλλης Ιωάννης	Παν. Δυτικής Αττικής, Τμ. Μηχανολόγων Μηχανικών
Καλογήρου Σωτήρης	Τ.Ε.Π.Α.Κ., Τμ. Μηχανολόγων Μηχανικών
Κατσιφαράκης Κώστας	Α.Π.Θ., Τμ. Πολιτικών Μηχανικών
Κατσούλας Νικόλαος	Παν. Θεσσαλίας, Τμ. Γεωπονίας
Κολοκοτσά Διονυσία	Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμ. Μηχανικών Περιβάλλοντος
Κούγιας Παναγιώτης	Ε.Λ.Γ.Ο. / ΔΗΜΗΤΡΑ
Κωτσόπουλος Θωμάς	Α.Π.Θ., Τμ. Γεωπονίας
Λαμπρίδης Δημήτριος	Α.Π.Θ., Τμ. Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Η/Υ
Λάππας Άγγελος	Ε.Κ.Ε.Τ.Α. / Ι.Δ.Ε.Π.
Μαθιουλάκης Μανώλης	Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. "Δημόκριτος"
Μάμωλος Ανδρέας	Α.Π.Θ., Τμ. Γεωπονίας
Μαρτινόπουλος Γεώργιος	Δι.Πα.Ε / Πα.ΚΕ.ΔΙ.Π.Σ. / Τμ. Επιστήμης και Τεχνολογίας
Μισηρλής Δημήτρης	Δι.Πα.Ε, Τμ. Μηχανολόγων Μηχανικών
Μιχόπουλος Απόστολος	Παν. Κύπρου / Πολυτεχνική Σχολή
Μουσιόπουλος Νικόλαος	Α.Π.Θ., Τμ. Μηχανολόγων Μηχανικών
Μπαλαράς Κωνσταντίνος	Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών
Νικολόπουλος Νικόλαος	Ε.Κ.Ε.Τ.Α. / Ι.Δ.Ε.Π.

Πανάρας Γεώργιος	Π.Δ.Μ., Τμ. Μηχ. Μηχανικών
Παπαδάκης Γιώργος	Γεωπ. Παν. Αθηνών/ Τμ. Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων
Παπαδόπουλος Αθανάσιος	Ε.Κ.Ε.Τ.Α. / Ι.Δ.Ε.Π.
Παπακώστας Κωνσταντίνος	Α.Π.Θ., Τμ. Μηχανολόγων Μηχανικών
Σκούλου Βασιλική	University of Hull / Dept. of Chemical Engineering
Σουλιώτης Μανώλης	Π.Δ.Μ., Τμ. Μηχανολόγων Μηχανικών
Τολίκα Κωνσταντία (Ντία)	Α.Π.Θ., Τμ. Γεωλογίας
Τουρλιδάκης Αντώνης	Π.Δ.Μ., Τμ. Μηχανολόγων Μηχανικών
Τσαγκρασούλης Αριστείδης	Παν. Θεσσαλίας, Τμ. Αρχιτεκτόνων Μηχανικών
Τσικαλουδάκη Κατερίνα	Α.Π.Θ., Τμ. Πολιτικών Μηχανικών
Τσιλιγκιρίδης Γιώργος	Α.Π.Θ., Τμ. Μηχανολόγων Μηχανικών, Πρόεδρος Ι.Η.Τ.
Τσόκα Στέλλα	Α.Π.Θ., Τμ. Πολιτικών Μηχανικών
Τσούτσος Θεοχάρης	Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμ. Μηχανικών Περιβάλλοντος

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Εναρκτήρια Ομιλία του Προέδρου του ΔΣ του ΙΗΤ καθ. Γιώργου Τσιλιγκιρίδη 3

ΑΝΤΙ ΠΡΟΛΟΓΟΥ 5

ΠΡΟΣΚΕΚΛΗΜΕΝΟΙ ΟΜΙΛΗΤΕΣ

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ ΣΤΟΝ ΤΟΜΕΑ ΤΟΥ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ
Ε. Αγγελιδάκη 19

ΕΠΙΚΟΥΡΙΚΕΣ ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ ΑΠΟ ΑΠΕ ΠΡΟΣ ΤΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ:
ΜΙΑ ΛΥΣΗ ΓΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΜΕ 100% ΑΠΕ
ΚΑΙ Η ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΤΩΝ ΜΙΚΡΩΝ ΑΠΕ ΣΕ ΝΕΕΣ ΑΓΟΡΕΣ
Χ. Δημουλιάς 35

ΡΥΘΜΙΣΤΙΚΕΣ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΜΕΤΑΒΑΣΗ ΤΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ
Δ. Ψυχογιός 45

Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΘΕΡΜΟΓΕΦΥΡΩΝ ΣΤΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ
Δ. Αραβαντινός 55

IGNORING CLIMATIC UNCERTAINTY AND HEALTH CHALLENGES:
HOW BUILDINGS CAN KILL PEOPLE
I. Meir 79

ΒΙΟΜΑΖΑ-ΥΔΡΟΓΟΝΟ

ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΣΩΜΑΤΩΜΑΤΩΝ ΒΙΟΜΑΖΑΣ (PELLET) ΟΙΚΙΑΚΗΣ ΧΡΗΣΗΣ
Σ. Μαργιώρου, Ι. Μπαρμπούτης 99

ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΞΥΛΩΔΟΥΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΑΠΟ 5-ΕΤΗ ΔΑΣΟΠΟΝΙΚΗ ΦΥΤΕΙΑ ΤΩΝ
ΤΑΧΥΑΥΞΩΝ ΕΙΔΩΝ Paulownia tomentosa και P. elongata ΣΤΗ Β. ΕΛΛΑΔΑ
Κ. Σπανός, Δ. Γαϊτάνης 111

ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΓΡΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΑΠΟ ΒΙΟΜΑΖΑ
Α. Ναξάκη, Ι. Μπαρμπούτης, Β. Καμπερίδου 119

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΚΑΙ ΑΕΙΦΟΡΙΑΣ ΑΠΟ
ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΧΡΗΣΗ ΒΙΟΝΤΙΖΕΛ ΑΠΟ ΕΛΑΙΟΚΡΑΜΒΗ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ
Γ. Μαρτινόπουλος, Μ. Σουντουρλής, Ε. Ηρακλέους 131

ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΦΛΟΙΟΥ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ
Γ. Πασχαλίδου, Β. Καμπερίδου, Ι. Μπαρμπούτης 141

ΑΕΙΦΟΡΙΚΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΣΕ ΑΓΡΟΤΙΚΕΣ ΚΟΙΝΟΤΗΤΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΒΙΟΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΕΔΑΦΟΒΕΛΤΙΩΤΙΚΟΥ
Χρ. Βλαχοκώστας, Χ. Αχίλλας, Α.Β. Μιχαηλίδου, Ε. Φελέκη, Ν. Μουσιόπουλος 151

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΥΝΘΕΤΙΚΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΜΕΣΩ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΟΥ H_2 ΚΑΙ ΔΕΣΜΕΥΜΕΝΟΥ CO_2 ΑΠΟ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ
Γ. Βαρβούτης, Δ. Ιψάκης, Ε. Μαντέλα, Μ. Κονσολάκης, Γ. Μαρνέλλος 163

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΠΡΟΣΘΗΚΗΣ ΚΑΤΑΛΥΤΗ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΛΙΓΝΙΤΗ ΚΑΙ ΕΛΑΙΟΠΥΡΗΝΑ ΥΠΟ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ CO_2
Α. Λαμπρόπουλος, Χ. Χρυσικός, Π. Πασχάλη, Μ. Κονσολάκης, Γ. Μαρνέλλος 173

ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΗ ΑΝΑΓΩΓΗ ΤΗΣ ΓΛΥΚΕΡΟΛΗΣ ΣΕ ΠΡΟΪΟΝΤΑ ΥΨΗΛΗΣ ΠΡΟΣΤΙΘΕΜΕΝΗΣ ΑΞΙΑΣ
Α. Σχιζοδήμου, Γ. Κυριάκου 185

ΑΝΑΕΡΟΒΙΑ ΧΩΝΕΥΣΗ ΚΑΙ ΟΙΚΟΤΟΞΙΚΟΤΗΤΑ ΠΡΩΤΟΒΑΘΜΙΑΣ ΙΛΥΟΣ ΑΠΟ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΑΣΤΙΚΩΝ ΛΥΜΑΤΩΝ
Φ. Σακαβέλη, Μ. Πεταλά, Β. Τσιρίδης, Ε. Νταρακάς 193

ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΕΝΑΝΤΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΛΙΠΑΣΜΑΤΟΣ ΛΥΜΑΤΟΛΑΣΠΗΣ
Φ. Μορσίνκ-Γεωργαλή , Α. Κυλίλη , Π. Φωκαΐδης 207

ΣΥΝ-ΚΑΥΣΗ ΔΑΣΙΚΩΝ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΩΝ ΜΕ ΛΙΓΝΙΤΗ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ. ΘΕΡΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΑΙ ΤΑΣΗ ΕΠΙΚΑΘΙΣΕΩΝ/ΕΠΙΣΚΩΡΙΩΣΕΩΝ
Δ. Βάμβουκα, Γ. Παναγόπουλος 217

ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ

ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΜΗ-ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΟΥ – ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ – ΗΛΕΚΤΡΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ
Ι. Κοσμαδάκης, Κ. Ελμασίδης 227

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ ΓΙΑ ΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΜΕ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΓΙΑ ΑΡΔΕΥΣΗ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ
Χ. Καραβάς, Ε. Δημητρίου, Δ. Μανωλάκος, Γ. Παπαδάκης 247

ΑΥΞΗΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΗΣ ΓΕΝΗΤΡΙΑΣ ΜΕΣΩ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΡΟΗΣ ΦΙΛΜ ΝΕΡΟΥ
Ι. Χρυσαφούδη, Γ. Μπάνης, Π. Παττακός, Σ. Κουτρούμπας, Δ. Κοσσυβάκης, Π. Τσαραμπάρης, Ν. Στεφανάκης, Ε. Χριστοφόρου 257

ΑΝΑΓΚΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ: ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ ΚΑΙ ΤΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ
Ν. Κατσούλας, Α. Μπαξεβάνου, Δ. Φείδαρος 265

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΕ ΑΠΟΜΟΝΩΜΕΝΟ ΝΗΣΙ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ. Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΓΩΝΙΩΝ ΚΛΙΣΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΥ
Κ. Χριστόπουλος, Μ. Κωστόπουλος, Γ. Σπυρόπουλος, Ι. Καλδέλλης 277

ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΑΠΟΡΡΙΨΕΩΝ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΚΟΡΕΣΜΕΝΑ ΝΗΣΙΩΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΣΩ ΣΥΖΕΥΞΗΣ ΔΙΚΤΥΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΝΕΡΟΥ
Δ. Ζαφειράκης, Γ. Τζάνες, Χρ. Παπαποστόλου, Κ. Καββαδίας, Γ. Σπυρόπουλος, Κ. Χριστόπουλος, Αιμ. Κονδύλη, Ι. Καλδέλλης..... 289

ΦΥΣΙΚΗ ΤΩΝ ΚΤΙΡΙΩΝ

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΟΥ ΑΣΤΙΚΟΥ ΜΙΚΡΟΚΛΙΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΥΠΙΚΩΝ ΚΤΙΡΙΑΚΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΑΣΤΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΤΗΣ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
Σ. Τσόκα..... 303

ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΣΩΤΕΡΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΚΤΙΡΙΟΥ ΓΡΑΦΕΙΩΝ ΣΤΗ ΒΟΡΕΙΑ ΕΛΛΑΔΑ
Κ. Γκριτζάπη, Γ. Πανάρας 315

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΚΕΛΥΦΟΥΣ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ ΚΤΙΡΙΩΝ ΚΑΤΟΙΚΙΑΣ ΚΑΙ ΓΡΑΦΕΙΩΝ ΥΠΟ ΑΝΤΙΠΡΟΣΩΠΕΥΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ
Α. Καραναύτη, Θ. Θεοδοσίου 329

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΑΠΑΙΤΗΣΕΩΝ ΤΩΝ ΝΕΩΝ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΩΝ ΓΙΑ ΦΥΣΙΚΟ ΦΩΤΙΣΜΟ (EN17037) ΣΤΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΚΤΙΡΙΩΝ ΓΡΑΦΕΙΩΝ
Α. Τσαγκρασούλης, Α. Κονταδάκης, Λ. Δούλος, Κ. Λάσκος..... 341

ΑΝΑΛΥΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΙΧΟΥ TROMBE ΜΕ ΘΕΡΜΟΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ
Αι. Μπαξεβάνου, Δ. Φείδαρος, Α. Τσαγκρασούλης..... 349

2Δ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΙΧΟΥ TROMBE ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΟΥ ΣΕ ΟΙΚΙΣΚΟ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ
Δ. Φείδαρος, Α. Μπαξεβάνου, Α. Τσαγκρασούλης 361

ΡΗΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΘΕΡΙΝΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΙΧΟΥ TROMBE ΩΣ ΗΛΙΑΚΗ ΚΑΜΙΝΑΔΑ
Αι. Μπαξεβάνου, Δ. Φείδαρος, Α. Τσαγκρασούλης..... 373

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΥΑΛΟΠΙΝΑΚΩΝ ΣΤΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΧΩΡΟΥ ΓΡΑΦΕΙΩΝ
Θ. Μάντζαρης, Α. Τσαγκρασούλης, Θ. Καρακασίδης..... 385

ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΕΜΒΑΣΕΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΚΑΙ ΑΙΣΘΗΤΙΚΗΣ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗΣ ΣΤΗΝ ΚΛΙΜΑΚΑ ΤΗΣ ΠΟΛΗΣ
Δ. Τσιριγώτη, Δ. Ζεγγίνης, Δ. Μπίκας 397

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΘΕΡΜΟΦΥΣΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ
ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ & ΑΕΡΙΖΟΜΕΝΩΝ ΟΨΕΩΝ
Μ. Συμεωνίδου, Π. Αντωνιάδου, Έ. Κυριάκη, Ε. Γιαμά, Ά. Παπαδόπουλος 407

ΥΒΡΙΔΙΚΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ/ΘΕΡΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΗΛΙΟΘΕΡΜΙΚΟΥ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΕ ΚΤΙΡΙΟ ΜΗΔΕΝΙΚΗΣ
ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΚΤΙΡΙΟ ΚΑΤΟΙΚΙΑΣ
Έ. Κυριάκη, Ε. Γιαμά, Α. Αντωνίου, Ά. Παπαδόπουλος 419

ΑΠΟ ΤΗΝ ΗΛΙΑΚΗ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΣΤΟΝ ΒΙΩΣΙΜΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ.
ΕΜΠΕΙΡΙΑ ΑΠΟ ΤΙΣ ΔΙΑΛΕΞΕΙΣ / ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΤΗΣ ΣΧΟΛΗΣ
ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΩΝ Ε.Μ.Π. (1978-ΣΗΜΕΡΑ)
Ε. Αλεξάνδρου, Φ. Μπουγιατιώτη, Ε. Ευαγγελινός, Η. Ζαχαρόπουλος 431

ΕΞΕΛΙΞΗ ΑΠΑΙΤΗΣΕΩΝ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΝΕΣΗΣ ΣΤΟΝ ΚΤΙΡΙΑΚΟ ΤΟΜΕΑ
*Π. Αντωνιάδου, Γ. Χαντζής, Μ. Συμεωνίδου, Ε. Γιαμά, Σ. Οξυζίδης,Δ. Κολοκοτσά,
Ά. Παπαδόπουλος* 443

ΠΟΛΙΤΙΚΗ

ΟΙ ΑΠΟΨΕΙΣ ΚΑΤΟΙΚΩΝ ΤΗΣ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΜΕΓΑΛΟΠΟΛΗΣ
ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΛΙΓΝΙΤΟΠΟΙΗΣΗ ΩΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ ΤΗΣ ΕΥΡΩΠΑΪΚΗΣ ΠΡΑΣΙΝΗΣ
ΣΥΜΦΩΝΙΑΣ ΤΟΥ 2019
Γ. Κουτζή, Ε. Σαρδιανού, Ρ. Μητούλα, Κ. Αμπελιώτης 455

ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ ΠΟΥ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΖΟΥΝ ΤΗΝ ΚΟΙΝΩΝΙΚΗ ΑΠΟΔΟΧΗ
ΤΩΝ ΥΠΟΔΟΜΩΝ ΔΕΣΜΕΥΣΗΣ, ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΚΑΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ CO_2
ΣΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΟΥ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟΥ ΕΡΓΟΥ MOF4AIR
Σ. Καρύτσας, Ο. Πολύζου, Θ. Οικονόμου, Κ. Καρύτσας 463

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΚΟΙΝΟΤΗΤΕΣ ΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ: ΕΝΗΜΕΡΩΣΗ ΤΟΥ ΚΟΙΝΟΥ,
ΠΡΟΘΕΣΗ ΣΥΜΜΕΤΟΧΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΘΕΣΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ
Σ. Καρύτσας, Ε. Θεοδωροπούλου 475

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΜΕΤΑΒΑΣΗ ΚΑΙ Η ΔΙΑΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΧΩΡΟΥ: ΤΟ ΕΙΔΙΚΟ ΧΩΡΟΤΑΞΙΚΟ
ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΩΝ ΑΠΕ ΚΑΙ Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΚΕΝΤΡΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
Μ. Τόσκας-Τάσιος, Ε. Θωίδου 491

Η ΤΟΠΙΚΗ ΑΥΤΟΔΙΟΙΚΗΣΗ ΜΟΧΛΟΣ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΕΥΡΩΠΑΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΕΘΝΙΚΩΝ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΔΙΚΑΙΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΜΕΤΑΒΑΣΗΣ
Δ. Μπουλογιώργου, Φ. Μαρκόπουλος, Π. Κτενίδης, Ι. Καλδέλλης 505

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΜΕΛΛΟΝ ΣΕ ΠΕΡΙΟΔΟΥΣ ΚΡΙΣΗΣ
Θ. Σλίνη, Χ. Τζιώγας, Ν. Μουσιόπουλος 519

ΗΛΙΑΚΑ ΘΕΡΜΙΚΑ

ΜΕΛΕΤΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ
ΜΕ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΜΠΕΤΟΝ,
ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΤΜΟΥ ΣΕ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ
Π. Κτίστης, Ρ. Αγαθοκλέους, Σ. Καλογήρου 533

ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ ΜΕ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ
Σ. Αλεξόπουλος, Σ. Καλογήρου 547

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΟΠΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ ΜΕ ΣΤΑΤΙΚΟ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΗΡΑ
Σ. Αλεξόπουλος, Ο. Παναγόπουλος, Α. Αργυρίου 553

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΗΛΙΑΚΟΥ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ ΑΣΒΕΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΓΙΑ ΘΕΡΜΟΧΗΜΙΚΗ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΣΩ ΤΟΥ ΚΥΚΛΟΥ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗΣ/ΑΣΒΕΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ
Σ. Σπύρογλου, Α. Σκαλτσογιάννης, Α. Λεμονίδου 561

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΩΝ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ ΣΕ ΚΤΙΡΙΟ ΥΠΟ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ
Λ .Γεωργίου, Π. Φωκαΐδης 573

ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΣΥΛΛΕΚΤΗ – ΑΠΟΘΗΚΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ
Ν. Αρναουτάκης, Μ. Σουλιώτης, Σ. Παπαευθυμίου 581

ΜΙΑ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ ΓΙΑ ΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΗΛΙΑΚΩΝ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
Μ. Μιλούση, Εμμ. Σουλιώτης 591

ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΟΧΙΑΚΩΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΘΕΡΜΑΝΣΗ (SCOP) ΣΕ ΑΝΤΛΙΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΑΕΡΑ – ΝΕΡΟΥ
Γ. Μουζεβίρης, Κ. Παπακώστας 603

ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΗΛΙΑΚΑ-ΤΡΟΦΟΔΟΤΟΥΜΕΝΟΥ ΨΥΚΤΗ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΨΥΚΤΙΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΕΜΠΟΡΙΚΗΣ ΨΥΞΗΣ ΜΕ CO_2
Ε. Συγγούνας, Δ. Τσιμπούκης, Χ. Δαλαβούρας, Σ. Αναγνωστάτος, Μ. Βραχόπουλος 617

ΕΥΦΥΗ ΚΤΙΡΙΑ ΓΙΑ ΕΥΦΥΕΙΣ ΠΟΛΕΙΣ: ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΕΥΦΥΟΥΣ ΕΤΟΙΜΟΤΗΤΑΣ ΚΤΙΡΙΩΝ
Σ. Αθανασάκη, Κ. Τσικαλουδάκη 631

ΔΕΙΚΤΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΕΠΙΔΟΣΗΣ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΚΤΙΡΙΩΝ ΤΡΙΤΟΓΕΝΟΥΣ ΤΟΜΕΑ ΑΠΟ ΣΥΝΟΠΤΙΚΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΤΙΚΩΝ & ΕΠΙΘΕΩΡΗΣΕΩΝ
Κ. Δρούτσα, Κ. Μπαλαράς, Σ. Κοντογιαννίδης, Σ. Λυκούδης, Έ. Δασκαλάκη, Α. Αργυρίου 643

ΑΝΤΙΠΡΟΣΩΠΕΥΤΙΚΕΣ ΤΥΠΟΛΟΓΙΕΣ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΚΤΙΡΙΩΝ ΤΡΙΤΟΓΕΝΟΥΣ ΤΟΜΕΑ
Κ. Δρούτσα, Σ. Κοντογιαννίδης, Κ. Μπαλαράς, Έ. Δασκαλάκη, Α. Αργυρίου 653

ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΠΗΓΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΛΥΨΗ ΑΝΑΓΚΩΝ ΖΕΣΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΧΡΗΣΗΣ ΣΕ ΚΤΗΡΙΑΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ
Β. Κίλης, Γ. Πανάρας, Ν. Πλόσκας 665

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΚΑΙΝΟΤΟΜΩΝ ΠΡΟΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΩΝ ΚΤΙΡΙΩΝ ΕΝΑΝΤΙ ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ
Σ. Τσόκα, Κ. Τσικαλουδάκη, Θ. Θεοδοσίου, Π. Χαστάς, Α. Καραούλης 675

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΟΙΝΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΦΟΙΤΗΤΙΚΩΝ ΕΣΤΙΩΝ ΤΗΣ ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗΣ ΣΧΟΛΗΣ ΤΟΥ ΔΗΜΟΚΡΙΤΕΙΟΥ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΘΡΑΚΗΣ
Α. Παπατσούνης, Π. Μπότσαρης, Κ. Λυμπερόπουλος, Ρ. Ρώτας, Ζ. Κανελλιά, Π. Ηλιάδης, Ν. Νικολόπουλος 687

ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΑΕΙΦΟΡΙΑ: ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΕΩΝ ΣΕ ΣΧΟΛΙΚΑ ΚΤΙΡΙΑ
Ε. Μήτσιου, Ε. Αλεξανδρή 701

ΑΝΑΘΕΩΡΗΜΕΝΕΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΕΠΙΘΕΩΡΗΣΗΣ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΤΗΡΙΩΝ: ΟΙ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΚΑΙ ΨΥΞΗΣ
Κ. Παπουής, Φ. Μόρσινκ-Γεωργαλή, Γ. Χαντζής, Π. Φωκαΐδης, Ά. Παπαδόπουλος 713

ΔΕΙΚΤΕΣ ΕΥΦΥΟΥΣ ΕΤΟΙΜΟΤΗΤΑΣ ΚΤΗΡΙΩΝ (SMART READINESS INDICATORS): ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ, ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ
Α. Παναγίδου , Χ. Παντελή, Π. Φωκαΐδης 725

ΟΙ ΑΝΑΠΤΥΞΙΑΚΕΣ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗΣ ΕΝΟΤΗΤΑΣ ΚΟΖΑΝΗΣ ΣΤΗ ΜΕΤΑΛΙΓΝΙΤΙΚΗ ΕΠΟΧΗ
Ζ. Δημητριάδου, Ρ. Μητούλα, Ε. Σαρδιανού, Α. Οικονόμου 735

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΥΓΕΙΑΣ ΣΕ ΣΧΕΔΟΝ ΜΗΔΕΝΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ
Α. Παμπούκα, Α. Δημούδη, Σ. Ζώρας 747

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΥΚΛΟΥ ΨΥΞΗΣ ΜΕ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΕΝΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΠΡΟΒΛΕΠΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΚΤΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΟΓΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΟΡΓΑΝΙΚΟΥ ΡΕΥΣΤΟΥ
Α. Κυριακίδης, Θ. Προύσαλης, Α. Παπαδόπουλος, Ι. Hassan, Π. Σεφερλής 753

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΕΥΕΛΙΞΙΑΣ ΤΩΝ ΚΤΙΡΙΩΝ
Γ. Χαντζής, Π. Αντωνιάδου, Μ. Συμεωνίδου, Ε. Γιαμά, Σ. Οξυζίδης, Δ. Κολοκοτσά, Ά. Παπαδόπουλος 763

Η ΣΥΜΒΟΛΗ ΜΟΝΑΔΑΣ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΥΨΗΛΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΜΕΤΑΒΑΣΗ ΓΙΑ ΕΝΑ ΠΡΑΣΙΝΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
Εμ. Κωστόπουλος, Κλ. Καλδέλλης, Μ. Καλούτσα, Αιμ. Κονδύλη, Ι. Καλδέλλης 775

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΥΠΟΒΟΗΘΟΥΜΕΝΟΥ ΑΠΟ ΑΝΤΛΙΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΚΑΛΥΨΗ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΚΟΛΥΜΒΗΤΗΡΙΟΥ
Η. Αναγνωστόπουλος, Λ. Ζουλούμης, Γ. Πανάρας 789

ΓΕΩΘΕΡΜΙΑ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΚΑΝΟΝΙΚΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ ΣΕ ΨΥΚΤΙΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΕΜΠΟΡΙΚΗΣ ΨΥΞΗΣ CO^2
Α. Σλιουσαρέγκο, Ε. Συγγούνας, Μ. Βραχόπουλος 803

ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΠΕΔΙΩΝ ΕΘΝΙΚΟΥ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΟΣ
Β. Γαγάνης, Σ. Σταματάκη 817

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΡΙΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΑΝΤΛΙΩΝ ΜΕ ΗΛΙΑΚΗ ΥΠΟΒΟΗΘΗΣΗ
Γ. Ασπετάκης, Ν. Ανδρίτσος 825

ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΤΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΧΡΗΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ ΚΑΙ ΤΟΝ ΚΟΣΜΟ
Μ. Παπαχρήστου, Ν. Ανδρίτσος, Α. Αρβανίτης, Π. Δαλαμπάκης, Δ. Μενδρινός 833

ΝΕΑ ΠΟΙΟΤΙΚΑ ΚΑΙ ΠΟΣΟΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΩΝ Γ/Θ ΡΕΥΣΤΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΑΚΡΟΠΟΤΑΜΟΥ
Π. Δαλαμπάκης, Η. Κουφογιάννης, Μ. Παπαχρήστου, Ν. Ανδρίτσος, Α. Αρβανίτης, Κ. Λυμπερόπουλος, Π. Κολιός 845

ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΡΟΦΙΚΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΥΠΟ ΤΟ ΠΡΙΣΜΑ ΤΗΣ ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ
Ι. Παυλίδου, Γ. Περκουλίδης, Ν. Μουσιόπουλος, Α. Μαλαμάκης, Γ. Μπανιάς 859

ΑΠΟ ΤΟ ΚΤΙΡΙΟ ΣΤΟ ΚΤΙΡΙΑΚΟ ΑΠΟΘΕΜΑ: ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ ΤΟΥ ΚΤΙΡΙΑΚΟΥ ΑΠΟΘΕΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΠΟΛΗΣ ΤΩΝ ΑΘΗΝΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΤΗΣ ΣΕ ΠΟΛΗ ΟΥΔΕΤΕΡΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ
Ε. Αλεξανδρή 869

ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΟΣ-ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΕΙΦΟΡΙΚΗ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΜΕΤΩΠΩΝ. Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΑΝΑΠΛΑΣΗΣ ΤΟΥ ΦΑΛΗΡΙΚΟΥ ΟΡΜΟΥ
Λ. Μπαζής, Ε. Αλεξανδρή 881

ΑΕΙΦΟΡΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΒΑΣΙΚΩΝ ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ
Ε. Χανιάς, Α. Δημούδη 895

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗ ΚΑΙ ΕΠΑΝΑΧΡΗΣΗ ΚΤΙΡΙΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΜΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ. Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΠΡΩΗΝ ΚΑΠΝΑΠΟΘΗΚΗΣ ΣΤΗ ΣΤΑΥΡΟΥΠΟΛΗ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
Β. Αντωνίου, Ε. Ανδρέου 907

ΚΛΙΜΑ

ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΑ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ
Γ. Ευθυμίου, Φ. Μπάρμπας, Ν. Μουσσιόπουλος 921

ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ALL SKY ΚΑΜΕΡΩΝ
Σ. Λογοθέτης, Β. Σαλαμαλίκης, S. Wilbert, J. Remund 931

ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΓΙΑ ΣΤΑΘΜΟΥΣ ΑΠΕ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΡΟΗΓΜΕΝΩΝ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ
Κ. Γκαράκης, Δ. Ανδρωνάς 939

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΑΥΤΟΝΟΜΟ ΕΥΡΩΠΑΙΚΟ ΠΑΡΑΤΗΡΗΤΗΡΙΟ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ ΣΤΟ ΝΗΣΙ ΤΩΝ ΑΝΤΙΚΥΘΗΡΩΝ
Ι. Καλδέλλης, Εμ. Πλειώνης, Αιμ. Κονδύλη, Α. Δήμου, Δ. Ζαφειράκης 949

ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ Α.Π.Ε. - ΑΙΟΛΙΚΑ

Ο ΥΒΡΙΔΙΚΟΣ ΣΤΑΘΜΟΣ ΣΙΦΝΟΥ. ΟΙ ΑΝΑΠΤΥΞΙΑΚΕΣ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΜΕΣΩ ΤΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΚΟΙΝΟΤΗΤΩΝ.
Δ. Κατσαπρακάκης, Ε. Δακανάλη, Γ. Γκύλλης, Α. Δημόπουλος 963

ΑΓΡΟΤΙΚΕΣ ΧΡΗΣΕΙΣ ΣΕ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑΚΟΥ ΤΥΠΟΥ ΜΕ ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΣΤΗΝ ΟΡΟΦΗ
Α. Μαρτζοπούλου, Β. Φιρφιρής, Θ. Κωτσόπουλος 975

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΜΙΑΣ ΜΙΚΡΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΠΑΘΗΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΗΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΡΟΗΣ
Χ. Παπαδόπουλος, Π. Καπαρός-Τσάφος, Γ. Ιατρού, Ζ. Βλαχοστέργιος, Δ. Μισηρλής, Κ. Υάκινθος 987

Η ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΩΝ ΗΠΙΩΝ ΜΟΡΦΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΛΕΙΨΥΔΡΙΑΣ ΤΩΝ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΝΗΣΙΩΝ. Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΝΙΣΥΡΟΥ
Π. Τριανταφύλλου, Αγγ. Καλδέλλης, Π. Κολλάς, Χρ. Κορωναίος, Ι. Καλδέλλης 997

ΠΡΟΣΚΕΚΛΗΜΕΝΟΙ ΟΜΙΛΗΤΕΣ

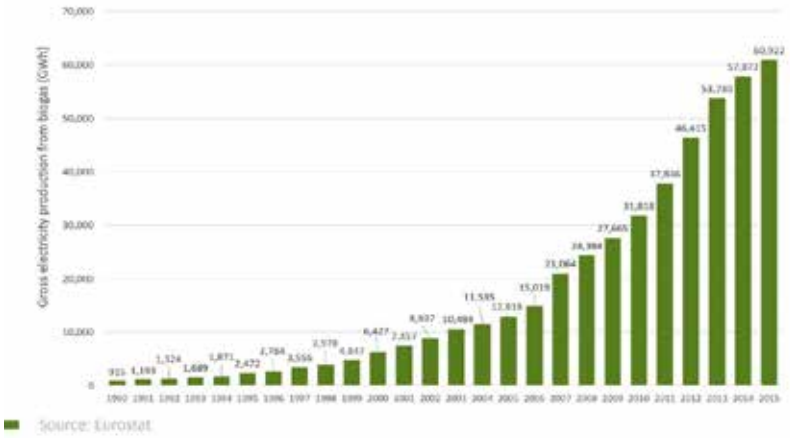
Τεχνολογικές εξελίξεις στον τομέα του βιοαερίου

Ειρήνη Αγγελιδάκη

12ο ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΓΙΑ ΤΙΣ ΗΠΙΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ στις **7** με **9 ΑΠΡΙΛΙΟΥ 2021**

Current biogas situation - Europe



DTU Chemical Engineering
Department of Chemical and Biochemical Engineering

2

Present AD applications

- ✓ **Sludge digestion in WWTP**
- ✓ **Slurries manures etc.**
- ✓ **Industrial Wastewaters**
- ✓ **Solid wastes**
- ✓ **Rural simple**

DTU Chemical Engineering
Department of Chemical and Biochemical Engineering

3

Modern rural biogas plants

Ribe (DK)

Måbjerg (DK)

Lemvig (DK)

DTU Chemical Engineering
Department of Chemical and Biochemical Engineering

4

Biomass truck Thorsoe, 20 m^3

DTU Chemical Engineering
Department of Chemical and Biochemical Engineering

5

Receiving hall in Lemvig biogas plant

Heat exchangers in Ribe biogas plant

Sanitation of manure and organic waste:

- Pathogenic reduction by thermal treatment
- Pathogenic reduction by anaerobic treatment

Reactors with post-sanitation tanks

Blaabjerg, 8 hr x 53.5ºC

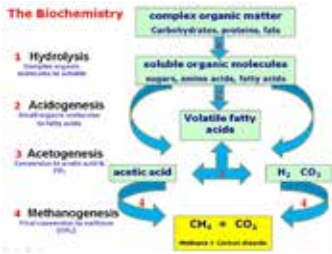
Advancements – Still not there …

- Microbial community management

- Reliable online monitoring for control

The Biogas process

"…biological process mediated mainly by bacteria and archaea…"



Bioaugmentation

Application & Research on Anaerobic Digestion for Biogas:

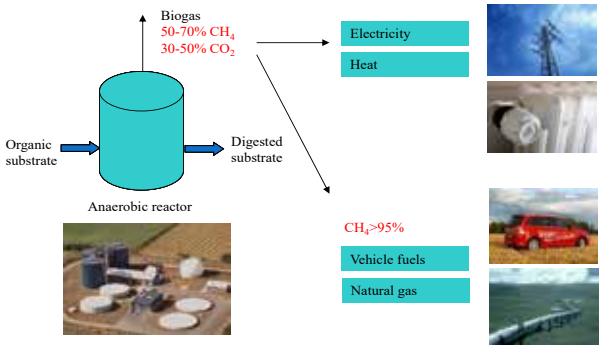
- Solution to ammonia inhibition and degradation of protein-rich feedstock
- Solution to LCFA inhibition and fast degradation
- Accelated conversion of cellulose and hemicellulose
- Improved gas production from microalgae
- Recovery from oxygen exposure
- Overloading reactors

.....

Beyond biogas … through biogas

- Integrading Power to Gas technologies
- Gasification with biomethanation
- Syngas fermenations (alcohols, acid elongation etc.)
- Biogas upgrading
- Single Cell proteins (Methane oxidizing bacteria)
- High value products (platform chemicals, alcohols, bioplastics etc.)

Biogas production and utilisation



DTU Chemical Engineering
Department of Chemical and Biochemical Engineering

14

Biogas upgrading (biomethanation) plants

- In Europe 18 Countries have biomethanation plants
- In 2019 725 biomethanation plants
- High growth in BioCNG and BioLNG sector

DTU Chemical Engineering
Department of Chemical and Biochemical Engineering

15

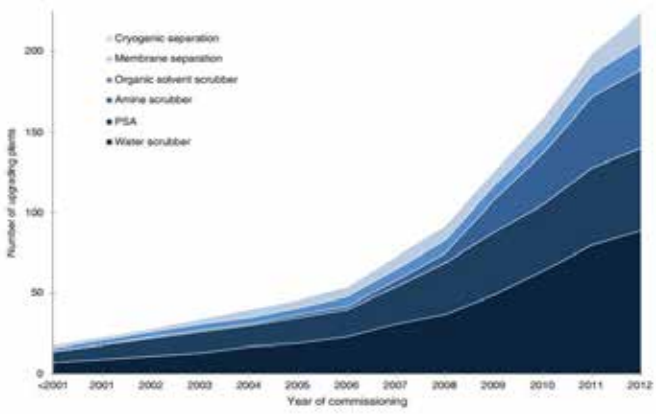
Biomethane – H2 as energy carrier

- Existing infrastructure can be used. Widespread natural gas grid
- Possibility for transporting the energy carrier from rural areas to cities
- Higher volumetric energy density 3.5 times higher storage capacity: Hydrogen needs much more space (or pressure…) for the same amount of energy
- Already existing applications – CH_4 is already an universal energy carrier - CNG cars and busses, CNG/LNG trucks, ships, industry

DTU Chemical Engineering
Department of Chemical and Biochemical Engineering

16

Biogas upgrading



Source: Bauer, F., Persson, T., Hulteberg, C., & Tamm, D. (2013). Biogas upgrading–technology overview, comparison and perspectives for the future. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, *7*(5), 499-511.

DTU Chemical Engineering
Department of Chemical and Biochemical Engineering

17

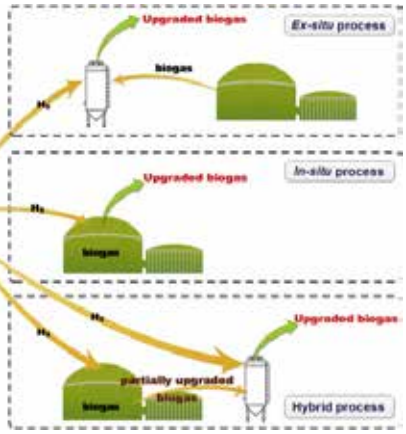
Second Generation Biogas Upgrading

Biological Biogas Upgrade

CO_2 and H_2 are used by **hydrogenotrophic methanogens** for CH_4 production

$$4H_2 + CO_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$$

H_2 can derive from **water electrolysis** using the **surplus electricity** from wind mills, photovoltaics or other sources

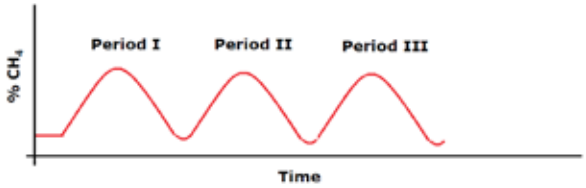


Angelidaki, I., Treu, L., Tsapekos, P., Luo, G., Campanaro, S., Wenzel, H. and Kougias, P.G. 2018. *Biotechnology Advances*

DTU Chemical Engineering
Department of Chemical and Biochemical Engineering

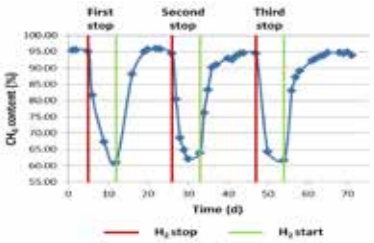
18

Process dynamicity

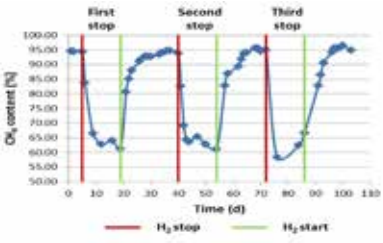


Intermittent provision of H_2:

1 week at time



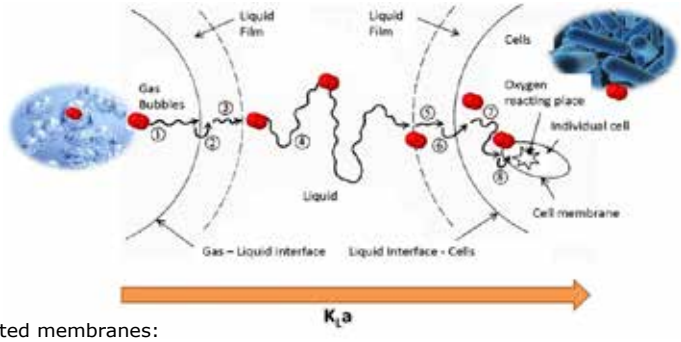
2 weeks at time



DTU Chemical Engineering
Department of Chemical and Biochemical Engineering

19

Gas - liquid transfer challenges



Tested membranes:

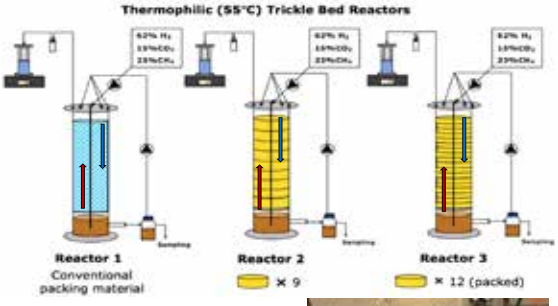
DTU Chemical Engineering
Department of Chemical and Biochemical Engineering

20

Bailys and Olis; Biochemical Engineering Fundamentals 1986

Ex-situ Trickling bed reactors

		L/Lr.d	GRT (h)
Period 1	Gas mix flow	6,0	4
	CH4 in	1,4	
	CO2 in	0,9	
	H2 in	3,6	
	H2 carrier	0,1	
Period 2	Gas mix flow	12,0	2
	CH4 in	2,8	
	CO2 in	1,8	
	H2 in	7,2	
	H2 carrier	0,2	
Period 3	Gas mix flow	24,0	1
	CH4 in	5,5	
	CO2 in	3,6	
	H2 in	14,4	
	H2 carrier	0,5	
Period 4	Gas mix flow	48,0	0,5
	CH4 in	11,0	
	CO2 in	7,2	
	H2 in	28,8	
	H2 carrier	1,0	
Period 5	Gas mix flow	66,6	0,25
	CH4 in	15,3	
	CO2 in	10,0	
	H2 in	40,0	
	H2 carrier	1,3	



DTU Chemical Engineering
Department of Chemical and Biochemical Engineering

21

Technology Readiness Level

DTU

Pilot Scale: Avedøre WWTP

VARGA Project

mudp

Test at Lemvig Biogas plant

BioUpgrade Project

ENERGINET

DTU Chemical Engineering
Department of Chemical and Biochemical Engineering

23

Full scale implementation

Supported by EUDP:
Coordinator: Nature Energy
Partners:
DTU
SDU
CleanGas

DTU Chemical Engineering
Department of Chemical and Biochemical Engineering

24

Electrochaea

Pure cultures

DTU Chemical Engineering
Department of Chemical and Biochemical Engineering

25

Challenges for biological upgrading

- ✓ **Gas liquid transfer**
  Configurations
  Filling material
  Pressure
- ✓ **Microbiology**
  Competition between homoacetogenesis – methanogenesis
- ✓ **Exothermic process**

DTU Chemical Engineering
Department of Chemical and Biochemical Engineering

26

Future trends - Conclusions

- ✓ Biogas sector is well established
- ✓ Biomethanation is giving opportunity for using biogas in the natural gas grid and use in the transport sector
- ✓ Second generation upgrading - bioupgrading CO2 is converted to biomethane with hydrogenotrophic methanogenesis. It is close to market

DTU Chemical Engineering
Department of Chemical and Biochemical Engineering

27

DTU

... σας ευχαριστώ για την προσοχή σας...

InnovationsFonden

EU

DTU Chemical Engineering

eUDP

ENERGINET

mudp

12ο Εθνικό Συνέδριο για τις Ήπιες Μορφές Ενέργειας

Επικουρικές Υπηρεσίες από ΑΠΕ προς το ηλεκτρικό δίκτυο: Μια λύση για λειτουργία των ηλεκτρικών δικτύων με 100% ΑΠΕ και η συμμετοχή των μικρών ΑΠΕ σε νέες αγορές

Χάρης Δημουλιάς
Καθηγητής Ηλεκτρικής Ενέργειας-Ποιότητας Ισχύος
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
ΑΠΘ

Εισαγωγή: Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

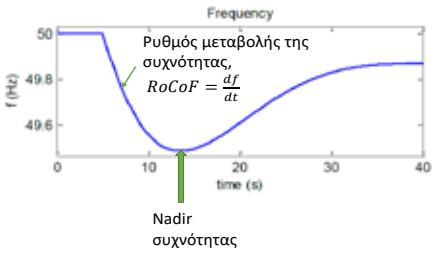
Ευσταθές είναι ένα ΣΗΕ όταν μπορεί να αντιμετωπίζει ανισορροπίες μεταξύ παραγωγής και ζήτησης ηλεκτρικής ισχύος.

- Ανισορροπία στην ενεργό ισχύ εκδηλώνεται ως μεταβολή της συχνότητας από την ονομαστική της τιμή (50Hz στην Ευρώπη)
- Ανισορροπία στην άεργο ισχύ εκδηλώνεται ως μεταβολή της τάσης από την ονομαστική της τιμή

Σημαντικότερη θεωρείται η διατήρηση της συχνότητας μεταξύ προκαθορισμένων ορίων επειδή έχει να κάνει με το ισοζύγιο ενεργού ισχύος (παραγωγή και κατανάλωση).

Πιο κρίσιμη θεωρείται η υποσυχνότητα η οποία υποδηλώνει έλλειμα παραγωγής ισχύος.

Εισαγωγή: Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας



Παράδειγμα μεταβολής της συχνότητας σε περίπτωση ελλείματος ισχύος

Στο ηπειρωτικό Ευρωπαϊκό Συνδεδεμένο σύστημα (Continental European Synchronous Area), ως nadir θεωρούνται τα 47.5Hz. Εάν η συχνότητα φτάσει εκεί κοντά, υπάρχει πολύ μεγάλη πιθανότητα για blackout.

Επικουρικές Υπηρεσίες (Ancillary Services-AS): Ορισμός

Ο ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity) ορίζει τις επικουρικές υπηρεσίες (AS) ως υπηρεσίες που προσφέρονται σε Διαχειριστές Δικτύων Διανομής (DSO) και μεταφοράς (TSO) με στόχο τη διατήρηση της λειτουργίας των δικτύων μέσα σε αποδεκτά όρια για την ασφάλεια της τροφοδοσίας.

Θεωρείται ότι οι AS μπορούν να προσφέρονται από τρίτους (σε σχέση με τον έλεγχο των πηγών ενέργειας) ή από τους ίδιους τους TSOs και DSOs. [1].

Σήμερα οι κύριες AS αφορούν
- Την υποστήριξη της συχνότητας του δικτύου
- Την υποστήριξη της τάσης των δικτύων μέσω αέργου ισχύος
- Την δυνατότητα επαναδημιουργίας του ηλεκτρικού δικτύου εκ του μηδενός (black starting)

[1] Tech. Report by ENTSO-E, E.DSO, Eurelectric, GEODE & CEDEC "An Integrated Approach To Active System Management With The Focus On TSO–DSO Coordination In Congestion Management And Balancing", Apr. 2019, Available [Online]: https://docstore.entsoe.eu/Documents/Publications/Position%20papers%20and%20reports/TSO-DSO_ASM_2019_190416.pdf

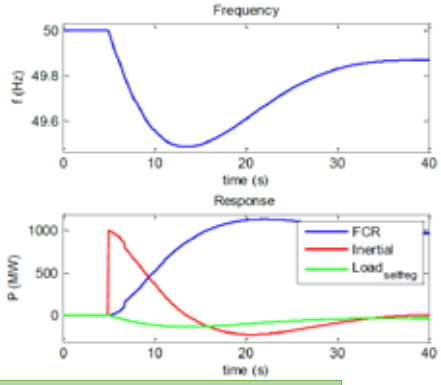
Επικουρικές Υπηρεσίες (Ancillary Services-AS): Ορισμός

Μια άλλη διάκριση των AS είναι:

- AS σχετιζόμενες με την συχνότητα όπως οι εφεδρείες εξισορρόπησης ισχύος:
  - Εφεδρείες για περιορισμό της μεταβολής της συχνότητας (Frequency Containment Reserves-FCR),
  - Εφεδρείες για αποκατάσταση της συχνότητας (Frequency Restoration Reserves-FRR) και
  - εφεδρείες αντικατάστασης των προηγούμενων εφεδρειών (Replacement Reserves-RR)
- AS σχετιζόμενες με την αποφυγή συμφόρησης του δικτύου.
- AS μη σχετιζόμενες με την συχνότητα όπως ο έλεγχο της τάσης και το black start.

Χ. Δημουλιάς: Επικουρικές Υπηρεσίες από ΑΠΕ προς το ηλεκτρικό δίκτυο

Παράδειγμα απόκρισης μιας Σύγχρονης Γεννήτριας που λειτουργεί ως FCR σε απότομη μεταβολή της συχνότητας



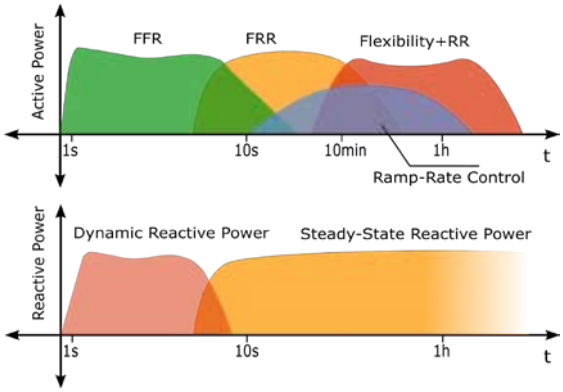
Χ. Δημουλιάς: Επικουρικές Υπηρεσίες από ΑΠΕ προς το ηλεκτρικό δίκτυο

Ο ρόλος των παραδοσιακών Σύγχρονων Γεννητριών

- Προσφέρουν εγγενώς αδράνεια λόγω της στρεφόμενης μάζας τους (δρομέας + κινητήριος μηχανισμός)
- Εγγενώς παράγουν συμμετρικές τάσεις στα 50Hz.
- Συμπεριφέρονται σαν πηγές τάσης πίσω από μια αντίδραση. Έτσι εγχέουν σημαντικά ρεύματα σε περιπτώσεις σφαλμάτων τα οποία είναι σημαντικά για τον συντονισμό της προστασίας των δικτύων.
- Κινούνται από κινητήριους μηχανισμούς με πλήρως ελεγχόμενη ισχύ
- Μπορούν να ρυθμίσουν την ανταλλαγή άεργης ισχύος και επομένως επικουρούν στην ρύθμιση της τάσης

Χ. Δημουλιάς: Επικουρικές Υπηρεσίες από ΑΠΕ προς το ηλεκτρικό δίκτυο

Ο ρόλος των παραδοσιακών Σύγχρονων Γεννητριών



Χ. Δημουλιάς: Επικουρικές Υπηρεσίες από ΑΠΕ προς το ηλεκτρικό δίκτυο

Προβλήματα λόγων της αύξησης της διείσδυσης ΑΠΕ

Distributed Renewable Energy Sources (DRES)

Biomass

Small Hydro

PV

Wind

Dispatchable.
Mostly use SGs directly coupled to the grid.

Non-Dispatchable
They use Power-Electronic Converters as interface to the grid

Χ. Δημουλιάς: Επικουρικές Υπηρεσίες από ΑΠΕ προς το ηλεκτρικό δίκτυο

Προβλήματα λόγων της αύξησης της διείσδυσης ΑΠΕ

Distributed Renewable Energy Sources (DRES)

Biomass

Small Hydro

PV

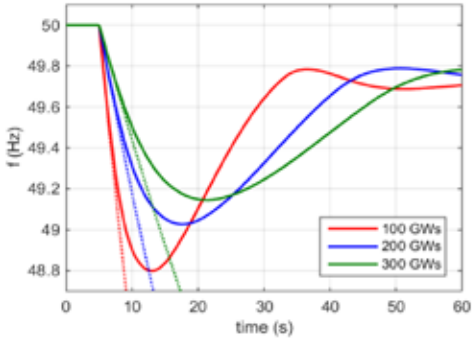
Wind

Εκτοπίζουν συμβατικές Σύγχρονες Γεννήτριες, αλλά

- Ελέγχονται μέσω ηλεκτρονικών ισχύος (inverters) και επομένως **δεν παρουσιάζουν αδράνεια**
- Η ισχύς των PV και Wind είναι μη ελεγχόμενη και έχει **σημαντικές διακυμάνσεις**.
- Οι περισσότερες έχουν πολύ μικρή ισχύ (<1MW) με αποτέλεσμα οι TSO (μέχρι σήμερα) να μην τις δίνουν σημασία- ένας επιπλέον λόγος είναι ότι ανήκουν στην **δικαιοδοσία του DSO**.

Χ. Δημουλιάς: Επικουρικές Υπηρεσίες από ΑΠΕ προς το ηλεκτρικό δίκτυο

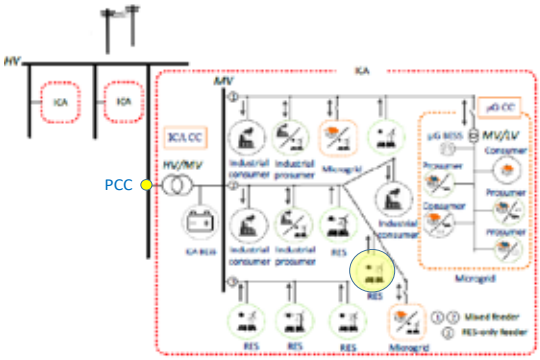
Προβλήματα λόγων της αύξησης της διείσδυσης ΑΠΕ



Η μείωση της κινητικής ενέργειας στο ΣΗΕ έχει επίπτωση τόσο στον ρυθμό μεταβολής της συχνότητας (διακεκομμένη γραμμή) όσο και στο nadir της συχνότητας.

Χ. Δημουλιάς: Επικουρικές Υπηρεσίες από ΑΠΕ προς το ηλεκτρικό δίκτυο

Προτεινόμενη λύση μέσω του EASY-RES[2]



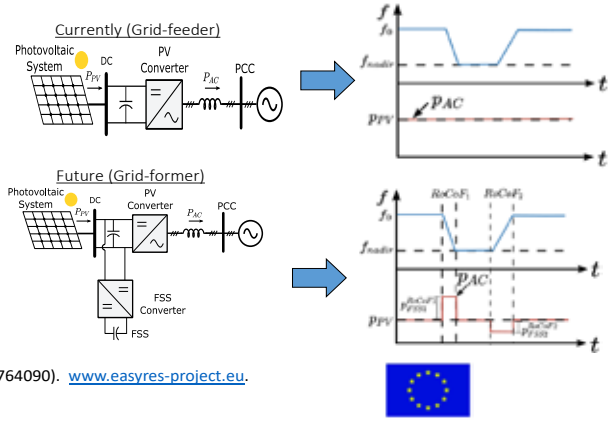
1) Οι Inverters των ΦΒ και Α/Γ ελέγχονται εσωτερικά με νέο τρόπο έτσι ώστε να συμπεριφέρονται σαν ελεγχόμενες ΣΓ προσφέροντας νέες AS.
2) Αναπτυχθήκαν μέθοδοι για τον προσδιορισμό, στο PCC και σε πραγματικό χρόνο, της σωρευτικής (aggregated) AS όλου του δικτύου διανομής
3) Διαχωρισμός AS που προσφέρονται σωρευτικά στον TSO και αυτών που προσφέρονται στον DSO.

[2] EASY-RES is a EU funded project (GA 764090). www.easyres-project.eu. Aristotle University is the coordinator.

Προτεινόμενη λύση μέσω του EASY-RES[2]

Οι Inverters των ΦΒ και Α/Γ ελέγχονται εσωτερικά με νέο τρόπο έτσι ώστε να συμπεριφέρονται σαν ελεγχόμενες ΣΓ προσφέροντας:

1. Ελεγχόμενη και σταθερή αδράνεια
2. Λειτουργία σαν FCR με ελεγχόμενο τρόπο
3. Περιορισμό της μεταβλητότητας της ισχύος (ramp-rate limitation)
4. Άεργο ισχύ για ρύθμιση της τάσης στο εσωτερικό του δικτύου διανομής
5. Ελεγχόμενη και συντονισμένη έγχυση ρευμάτων για αντιμετώπιση σφαλμάτων
6. Μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης στο δίκτυο διανομής μέσω της λειτουργίας ως ενεργά φίλτρα.

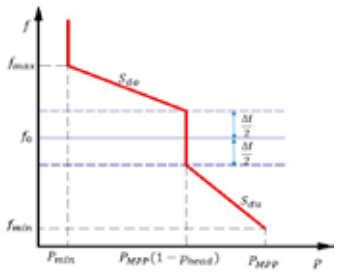


[2] EASY-RES is a EU funded project (GA 764090). www.easyres-project.eu. Aristotle University is the coordinator.

Προτεινόμενη λύση μέσω του EASY-RES[2]

Οι Inverters των ΦΒ και Α/Γ ελέγχονται εσωτερικά με νέο τρόπο έτσι ώστε να συμπεριφέρονται σαν ελεγχόμενες ΣΓ προσφέροντας:

1. Ελεγχόμενη και σταθερή αδράνεια
2. Λειτουργία σαν FCR με ελεγχόμενο τρόπο
3. Περιορισμό της μεταβλητότητας της ισχύος (ramp-rate limitation)
4. Άεργο ισχύ για ρύθμιση της τάσης στο εσωτερικό του δικτύου διανομής
5. Ελεγχόμενη και συντονισμένη έγχυση ρευμάτων για αντιμετώπιση σφαλμάτων
6. Μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης στο δίκτυο διανομής μέσω της λειτουργίας ως ενεργά φίλτρα.

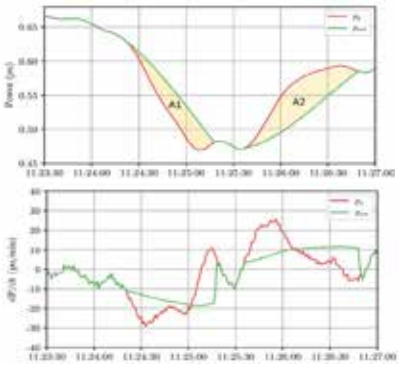


[2] EASY-RES is a EU funded project (GA 764090). www.easyres-project.eu. Aristotle University is the coordinator.

Προτεινόμενη λύση μέσω του EASY-RES[2]

Οι Inverters των ΦΒ και Α/Γ ελέγχονται εσωτερικά με νέο τρόπο έτσι ώστε να συμπεριφέρονται σαν ελεγχόμενες ΣΓ προσφέροντας:

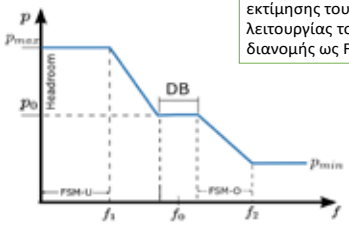
1. Ελεγχόμενη και σταθερή αδράνεια
2. Λειτουργία σαν FCR με ελεγχόμενο τρόπο
3. Περιορισμό της μεταβλητότητας της ισχύος (ramp-rate limitation)
4. Άεργο ισχύ για ρύθμιση της τάσης στο εσωτερικό του δικτύου διανομής
5. Ελεγχόμενη και συντονισμένη έγχυση ρευμάτων για αντιμετώπιση σφαλμάτων
6. Μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης στο δίκτυο διανομής μέσω της λειτουργίας ως ενεργά φίλτρα.



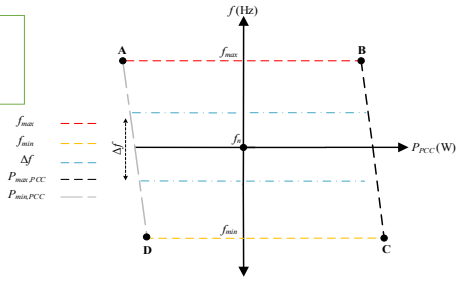
[2] EASY-RES is a EU funded project (GA 764090). www.easyres-project.eu. Aristotle University is the coordinator.

Προτεινόμενη λύση μέσω του EASY-RES[2]

Παράδειγμα σωρευτικής εκτίμησης του εύρους λειτουργίας του δικτύου διανομής ως FCR



Συμβατική ΣΓ



Δυνατότητα ελεγχόμενης λειτουργίας ολόκληρου του δικτύου διανομής σαν FCR εντός των ορίων ABCD

[2] EASY-RES is a EU funded project (GA 764090). www.easyres-project.eu.
Aristotle University is the coordinator.

Προτεινόμενη λύση μέσω του EASY-RES[2]

- Η FCR είναι υφιστάμενη AS.
- Η αδράνεια αναμένεται να γίνει και αυτή AS.
- Ο περιορισμός της διακύμανσης ισχύος αναμένεται να γίνει και αυτός AS.

Επομένως μέσω σώρευσης μπορεί να συμμετάσχει σε αυτή ακόμη και ένας μικρός ιδιοκτήτης ΑΠΕ.

Οι υπόλοιπες νέες δυνατότητες

1. Άεργος ισχύς για ρύθμιση της τάσης στο εσωτερικό του δικτύου διανομής
2. Ελεγχόμενη και συντονισμένη έγχυση ρευμάτων για αντιμετώπιση σφαλμάτων
3. Μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης στο δίκτυο διανομής μέσω της λειτουργίας ως ενεργά φίλτρα.

Παρέχονται εντός του δικτύου διανομής. Στόχος του EASY-RES είναι να δημιουργήσει business models για κάθε μια από αυτές για να λειτουργούν σε νέες αγορές εντός των δικτύων διανομής.

[2] EASY-RES is a EU funded project (GA 764090). www.easyres-project.eu.
Aristotle University is the coordinator.

Συμπέρασμα

1. Για να λειτουργήσουν ΣΗΕ με πολύ μεγάλη διείσδυση ΑΠΕ εκτοπίζοντας συμβατικούς σταθμούς με ΣΓ, θα πρέπει να οι ΑΠΕ-ειδικά αυτές με μεταβλητή ισχύ- να μπορούν να προσφέρουν υφιστάμενες και νέες AS στα δίκτυα.
2. Αν δεν γίνει το ανωτέρω, θα χρειαστούν τεράστιες αποθήκες ενέργειας (μπαταρίες, ΥΗΣ) για την αντιμετώπιση της ευστάθειας του δικτύου.
3. Με την προτεινόμενη λύση, στην διατήρηση της ευστάθειας των δικτύων, συμμετέχουν όλοι οι ιδιοκτήτες ΑΠΕ ανεξαρτήτως μεγέθους.
4. Χρειάζεται αλλαγή μοντέλου: από παραγωγοί ενέργειας πρέπει να γίνουν και πάροχοι AS. Με αντίστοιχη οικονομική αποζημίωση φυσικά.

[2] EASY-RES is a EU funded project (GA 764090). www.easyres-project.eu.
Aristotle University is the coordinator.

Ευχαριστώ για την προσοχή σας.
Καθηγητής Χάρης Δημουλιάς

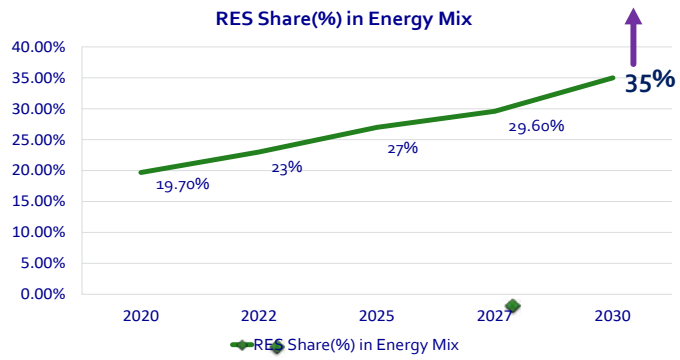
PAE
RAE
ΡΥΘΜΙΣΤΙΚΗ ΑΡΧΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ
Ινστιτούτο Ηλιακής Τεχνικής, 2 Απριλίου 2021
Ρυθμιστικές Προκλήσεις στην Μετάβαση του Ενεργειακού Συστήματος
Δρ. Δημήτριος Ψυχογιός
Αντιπρόεδρος Α'
Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας
Αναπλ. Καθηγητής
Τμήμα Βιομηχανικής Διοίκησης & Τεχνολογίας
Πανεπιστήμιο Πειραιά

Περιεχόμενα

- Ο στόχος της Ελλάδας για το 2030 αναφορικά με την χρήση ΑΠΕ
- Σταθερό Ρυθμιστικό Πλαίσιο
- Ψηφιακός μετασχηματισμός του Ρυθμιστή
- Διασυνδέσεις των νησιών
- Θαλάσσια Αιολικά πάρκα
- Αποθήκευση
- στο Εγγύς Μέλλον

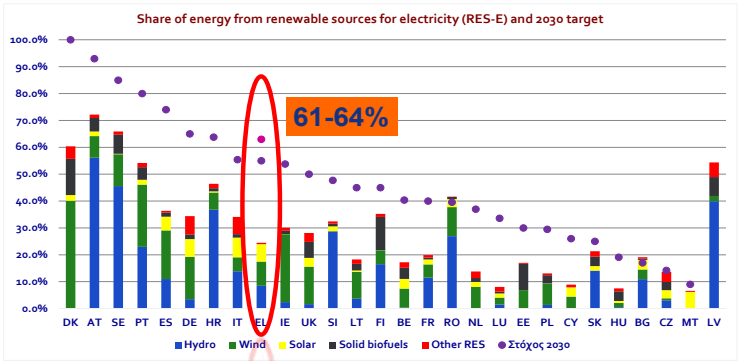
GR Νέο ΕΣΕΚ

Target for RES Share (%) in Energy Mix (2030)

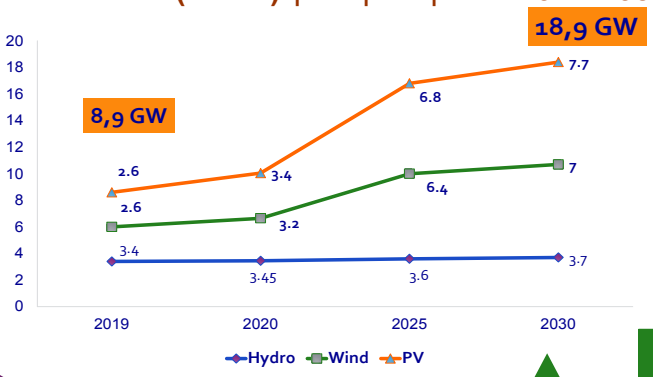


GR Νέο ΕΣΕΚ

Ποσοστό παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή και στόχοι του 2030



Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ) για την περίοδο 2021-2030



ΕΣΕΚ 2021-2030

~ 43 bn €

~1GW κάθε χρόνο νέα έργα ΑΠΕ

Green deal

Σταθερό θεσμικό πλαίσιο για τις ΑΠΕ

- Νέος Μηχανισμός στήριξης των ΑΠΕ εγκεκριμένος από την ΕΕ
  - Η ενέργεια πωλείται απ' ευθείας στο σύστημα
  - Αναλαμβάνουν υποχρεώσεις εξισορρόπησης όταν είναι συνεχής η λειτουργία της ενδοημερήσιας αγοράς
  - Ανάλογα με την ισχύ υπογράφουν είτε Σύμβαση Ενίσχυσης Διαφορικής Προσαύξησης (ΣΕΔΠ) (Feed-in premium, FiP) είτε Σύμβαση Ενίσχυσης Σταθερής Τιμής (ΣΕΣΤ) με τη ΔΑΠΕΕΠ ΑΕ διάρκειας 20 ετών

6

Ψηφιακός μετασχηματισμός της ΡΑΕ

1. Ηλεκτρονικές Δημοπρασίες ΑΠΕ
2. Ηλεκτρονική αδειοδότησης ΑΠΕ
3. Εργαλείο σύγκρισης τιμών

- ✓ Ενισχύει τη διαφάνεια
- ✓ Μείωση τιμών ενέργειας
- ✓ Απλοποιεί και αυτοματοποιεί την επικοινωνία ΡΑΕ-αιτούντων
- ✓ Βελτιώνει θεαματικά την απόκριση της Αρχής
- ✓ Μειώνει δραστικά τη γραφειοκρατία
- ✓ Μειώνει τις πιθανότητες λαθών και από την πλευρά της ΡΑΕ και από την πλευρά των αιτούντων

7

Διασυνδέσεις νησιών: Κυκλάδες (Φάση Α, Β)

Φάση Α (ολοκληρώθηκε)
(Διπλή τροφοδότηση Σύρου από Λαύριο, Σύρος-Τήνος και ακτινική τροφοδότηση Μυκόνου & Πάρου από Σύρο)

Φάση Β (ολοκληρώθηκε)
(Σύνδεση Νάξος-Πάρος & Νάξος - Μύκονος, αναβάθμιση της διασύνδεσης Άνδρου με Εύβοια και Τήνο)

Διασυνδέσεις νησιών: Κυκλάδες (Φάση Γ, Δ)

Φάση Γ (ολοκληρώθηκε)
(2ο καλώδιο Λαύριο-Σύρος και Μύκονος-Νάξος)

Φάση Δ (σε εξέλιξη)
Νάξος-Θήρα, Θήρα-Φολέγανδρο, Φολέγανδρο-Μήλο, Μήλο-Σέριφο, Σέριφο-Λαύριο)

Διασυνδέσεις νησιών: Β. και Α. Αιγαίου

Εναλλακτικοί τρόποι σύνδεσης Ρόδου-Κω

ύνδεση Λέσβου - Σκύρου
– Διασύνδεση Χίου – Σάμου

Διασυνδέσεις νησιών: Κρήτη και Ιόνιο

- Διασυνδέσεις όλων των νησιών εκτός από 5 νησιά:
  - Αιγαίο: Καστελόριζο, Αι Στράτης, Γαύδος
  - Ιόνιο: Ερεικούσα, Οθονοί

Διασυνδέσεις νησιών

- **Σημαντική διείσδυση των ΑΠΕ στα νησιά**
- **Κρήτη:**
  - άμεσα **100 MW Φ/Β** εγκαταστάσεων
  - άμεσα **100 MW Αιολικών** εγκαταστάσεων
  - Μετά τη μεγάλη διασύνδεση **σημαντικό** επιπλέον δυναμικό ΑΠΕ θα μπορεί να εγκατασταθεί
- **Εύβοια:** άμεσα **200-250MW**, νέα έργα ΑΠΕ
- **Κυκλάδες:** άμεσα περίπου **250 MW,** νέα έργα ΑΠΕ

12

Θαλάσσια Αιολικά Πάρκα

Νέο ρυθμιστικό πλαίσιο

- Νέο ρυθμιστικό πλαίσιο με βάση και τη Διεθνή εμπειρία
- Εκμετάλλευση του σημαντικού αιολικού δυναμικού και ένα νέο όχημα για την επίτευξη των στόχων διείσδυσης ΑΠΕ

Εκμετάλλευση υποδομών

- Συσχέτιση με τις διασυνδέσεις των νησιών
- Δυνατότητα ανάπτυξης εγχώριας τεχνογνωσίας και εκμετάλλευσης των υφιστάμενων υποδομών Ναυπηγείων

Στόχος

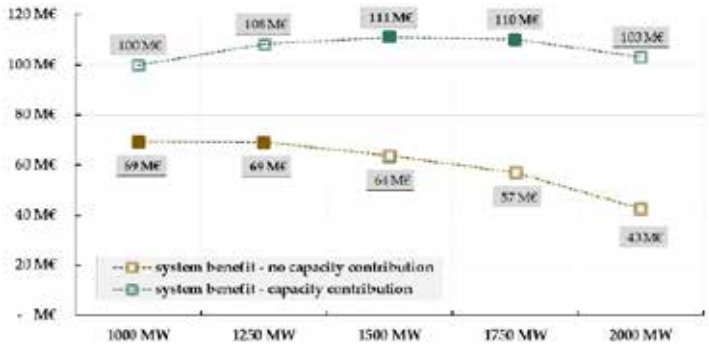
- Διείσδυση στο ενεργειακό μείγμα της Ελλάδας με το χαμηλότερο δυνατό κόστος για τους καταναλωτές και «εξαγωγή» τεχνογνωσίας
- Αύξηση της διείσδυσης των ΑΠΕ

Αποθήκευση ενέργειας

- Το όφελος αυτό υπερκαλύπτει το κόστος των σχετικών επενδύσεων και παράγει πλεόνασμα το μπορεί σε ετήσια βάση να διαμορφώνεται σε επίπεδα της τάξης των 100 εκ. €.
- Το ενδεδειγμένο μέγεθος αποθήκευσης συναρτάται στενά με τη διείσδυση ΑΠΕ στο σύστημα ηλεκτροπαραγωγής.
- Για τα προσδοκώμενα επίπεδα διείσδυσης ΑΠΕ του 2030, περί το 60% της τελικής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, η εγκατεστημένη ισχύς νέων αποθηκευτικών σταθμών ανέρχεται σε 1500-1750 MW,
  - 30%-40% συσσωρευτές περιορισμένης χωρητικότητας,
  - το υπόλοιπο αντλησιοταμίευση σημαντικής αποθηκευτικής χωρητικότητας.
- Το όφελος από την ανάπτυξη της αποθήκευσης μεγεθύνεται σε σενάρια ανάπτυξης των ΑΠΕ με έμφαση στα ΦΒ, όπως επίσης και σε καταστάσεις ακόμη πιο αυξημένης διείσδυσης πέραν του 2030.
- Σκόπιμο ο νέος Μόνιμος Μηχανισμός Ισχύος να έχει ειδική πρόβλεψη για αποθηκευτικούς σταθμούς.

14

Ετήσιο όφελος από την εγκατάσταση αποθήκευσης



Εξηλεκτρισμός μεταφορών

- Προώθηση της ηλεκτροκίνησης/εξηλεκτρισμού
  - Οδικές και σιδηροδρομικές μεταφορές
  - Λιμάνια
    - Βασικές υπηρεσίες (πχ. ηλεκτροκίνηση υποστηρικτικών πλωτών μέσων)
    - Ελλιμενισμός πλοίων
- Σχετικά έργα ανάπτυξης των απαιτούμενων υποδομών και έξυπνων δικτύων
- Διαμόρφωση ρυθμιστικού πλαισίου ανάπτυξης και διαχείρισης των υποδομών και ενσωμάτωσης των φορέων διαχείρισης και της κατανάλωσης στην αγορά ενέργειας

Ψηφιοποίηση του ενεργειακού συστήματος

- Προϋπόθεση για
  - Ανάπτυξη εύρυθμων και ανταγωνιστικών αγορών ενέργειας και σύζευξή τους.
  - βέλτιστη εφαρμογή και χρήση όλων των τεχνολογικών εφαρμογών και μηχανισμών αγοράς που δύναται να αναπτυχθούν.
- Σχετικά έργα υποδομών μέσω των προγραμμάτων ανάπτυξης των διαχειριστών που θα επιτρέπουν την πλήρη μετάβαση του σημερινού ενεργειακού συστήματος σε ένα πλήρως ψηφιοποιημένο σύστημα - πληροφοριακά συστήματα, κέντρα ελέγχου, μετρητικές υποδομές
- Βέλτιστη συνεργασία μεταξύ των διαχειριστών στη διαχείριση δεδομένων και αντιμετώπιση τεχνικών θεμάτων, καθώς και στην ανάπτυξη των απαραίτητων υπηρεσιών.
  - Σημαντικό ζήτημα η ασφαλή διαχείριση των δεδομένων των καταναλωτών
- Αναβάθμιση ρόλου καταναλωτών, παροχή ευέλικτων υπηρεσιών προς τα δίκτυα και συστήματα – Δυνατότητα ανάπτυξης αποκεντρωμένων δικτύων και αγορών.

Σύζευξη τομέων

- Διασύνδεση του τομέα της ηλεκτροπαραγωγής με διαφορετικούς ενεργειακούς τομείς, όπως η θέρμανση-Ψύξη (Power-to-Heat), ο τομέας των αερίων (Power-to-Gas) και οι μεταφορές (Ηλεκτροκίνηση).
  - Πρόσθετη ευελιξία στα συστήματα
  - Ενίσχυση δυνατότητα απορρόφησης της παραγωγής από μονάδες ΑΠΕ.
  - Συνδυασμός με συστήματα αποθήκευσης και ευφυών συστημάτων διαχείρισης ενέργειας.
- Διασύνδεση του τομέα της ηλεκτροπαραγωγής και του αερίου, μέσω εφαρμογών αποθήκευσης με μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε ανανεώσιμο αέριο, όπως το υδρογόνο..
- Η διαμόρφωση ρυθμιστικού πλαισίου, θα πρέπει να δίνει δυνατότητα σε διάφορες πηγές και διαφορετικούς φορείς ενέργειας (υδρογόνο, βιοκαύσιμα, βιομεθάνιο) να λειτουργούν συμπληρωματικά, συμβάλλοντας στη βέλτιστη οικονομικά και πιο βιώσιμη λειτουργία του ενιαίου συστήματος.

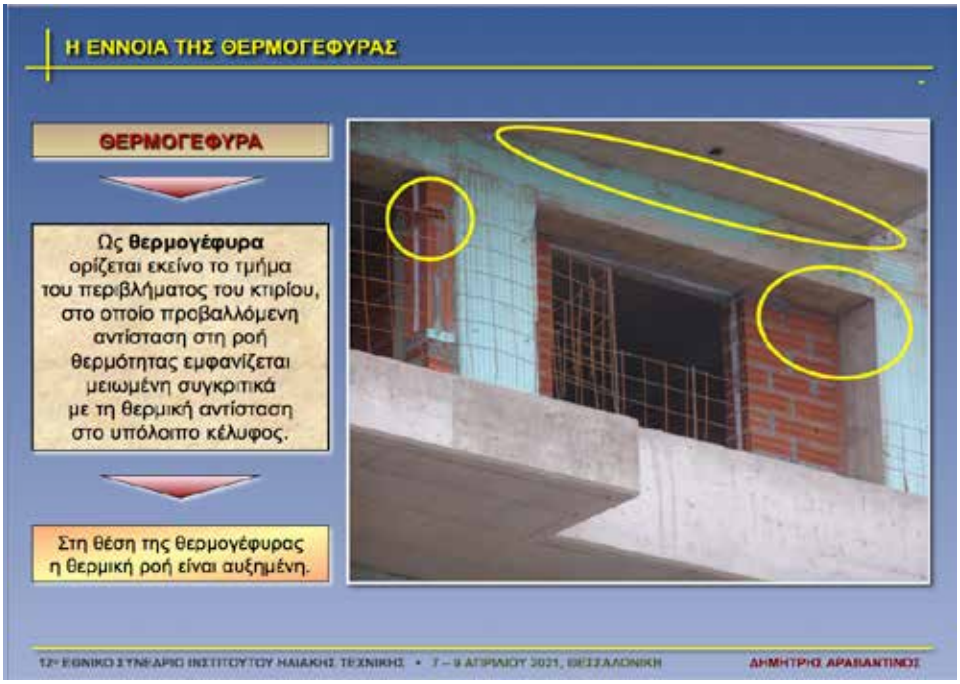
Ευχαριστώ θερμά για την προσοχή σας !!!

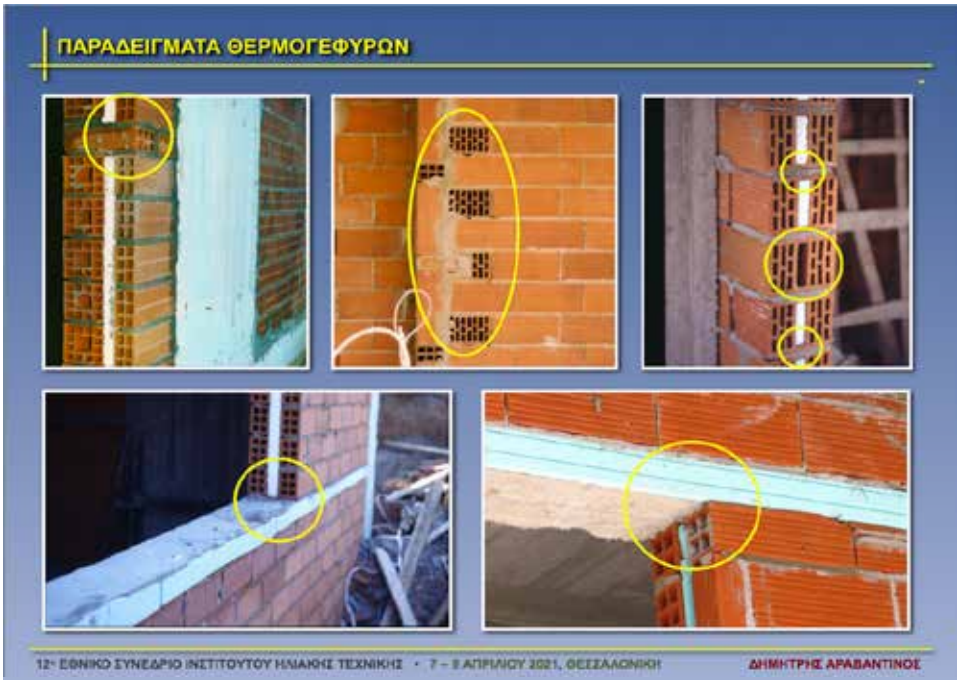
Πειραιώς 132, 118 54, Αθήνα
Τηλ.: +30 210 3727400
E-mail: info@rae.gr

Δρ. Δημήτριος Ψυχογυιός
Αντιπρόεδρος Α'
Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας

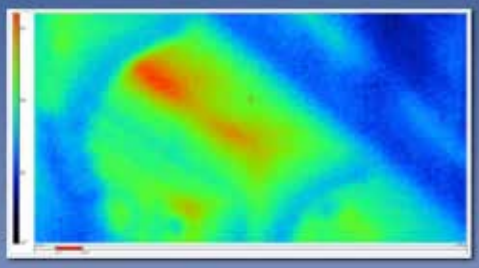
Αναπλ. Καθηγητής
Τμήμα Βιομηχανικής Διοίκησης & Τεχνολογίας
Πανεπιστήμιο Πειραιά

ΔΙΟΡΓΑΝΩΣΗ:
ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ
ΗΛΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΗΣ
ΔΥΝΔΙΟΡΓΑΝΩΣΗ:
ΤΜΗΜΑ
ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Α.Π.Θ.
7 – 9 ΑΠΡΙΛΙΟΥ 2021
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
12ο ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ
ΓΙΑ ΤΙΣ ΗΠΙΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ
Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΘΕΡΜΟΓΕΦΥΡΩΝ
ΣΤΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ
ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ
ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ
Δημήτρης Αραβαντινός
καθηγητής
Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ.
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΙΚΟΔΟΜΙΚΗΣ & ΦΥΣΙΚΗΣ ΤΩΝ ΚΤΙΡΙΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Α.Π.Θ.


Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΓΕΦΥΡΑΣ
ΘΕΡΜΟΓΕΦΥΡΑ
Ως θερμογέφυρα ορίζεται εκείνο το τμήμα του περιβλήματος του κτιρίου, στο οποίο προβαλλόμενη αντίσταση στη ροή θερμότητας εμφανίζεται μειωμένη συγκριτικά με τη θερμική αντίσταση στο υπόλοιπο κέλυφος.
Στη θέση της θερμογέφυρας η θερμική ροή είναι αυξημένη.
12ο ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟΥ ΗΛΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ • 7 – 9 ΑΠΡΙΛΙΟΥ 2021, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΑΡΑΒΑΝΤΙΝΟΣ


ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΘΕΡΜΟΓΕΦΥΡΩΝ
12ο ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟΥ ΗΛΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ • 7 – 9 ΑΠΡΙΛΙΟΥ 2021, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΑΡΑΒΑΝΤΙΝΟΣ

ΑΙΤΙΕΣ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ ΤΩΝ ΘΕΡΜΟΓΕΦΥΡΩΝ



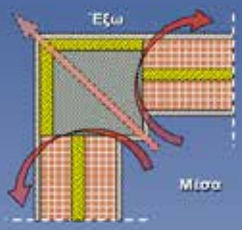
Τη δημιουργία θερμογέφυρας μπορεί να προκαλέσουν:

- Κατασκευαστικές αδυναμίες
- Κακοτεχνίες
- Αστοχίες υλικών ή κατασκευής
- Αμέλεια και παραλείψεις
- Άγνοια
- Φθορές οφειλόμενες στο χρόνο
- Η γεωμετρία του κτιρίου

ΘΕΡΜΟΓΕΦΥΡΕΣ ΛΟΓΩ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΚΑΙ ΛΟΓΩ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ

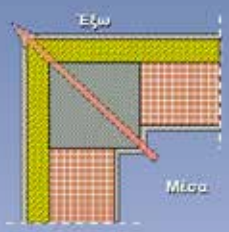
✔ Κατασκευαστική θερμογέφυρα

- Οφείλεται σε διακοπή της συνέχειας της θερμομονωτικής στρώσης
- Η έντασή της εξαρτάται από το δημιουργούμενο άλμα της ασυνέχειας.



✔ Γεωμετρική θερμογέφυρα

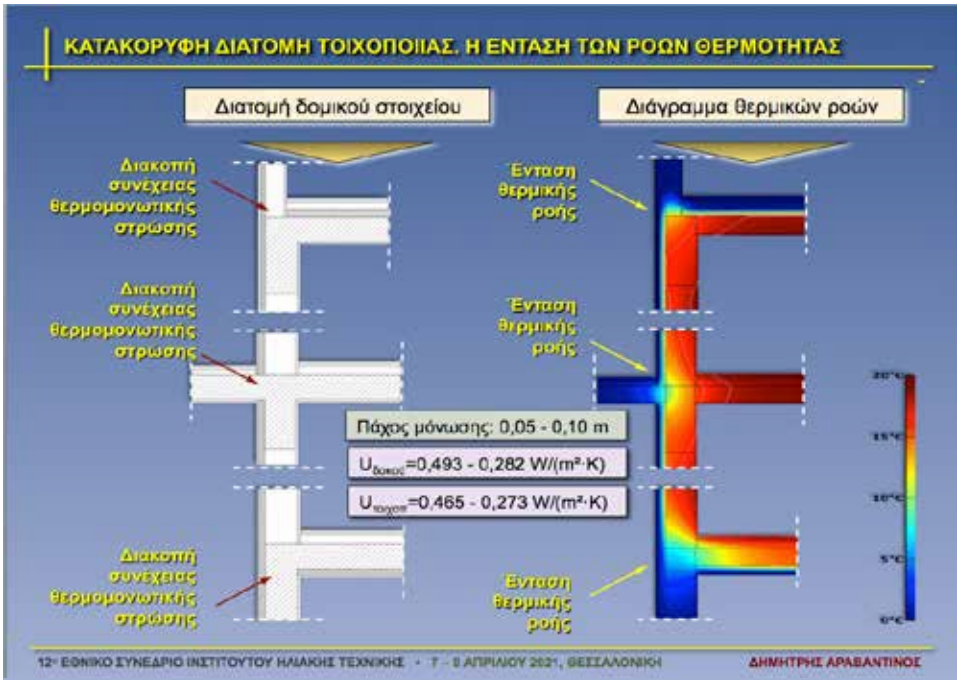
- Οφείλεται στη γεωμετρία του κτιρίου, χωρίς να υπάρχει διακοπή της συνέχειας της θερμομονωτικής στρώσης.
- Η έντασή της εξαρτάται από τη διαφορά μεγέθους εξωτερικής και εσωτερικής επιφάνειας .

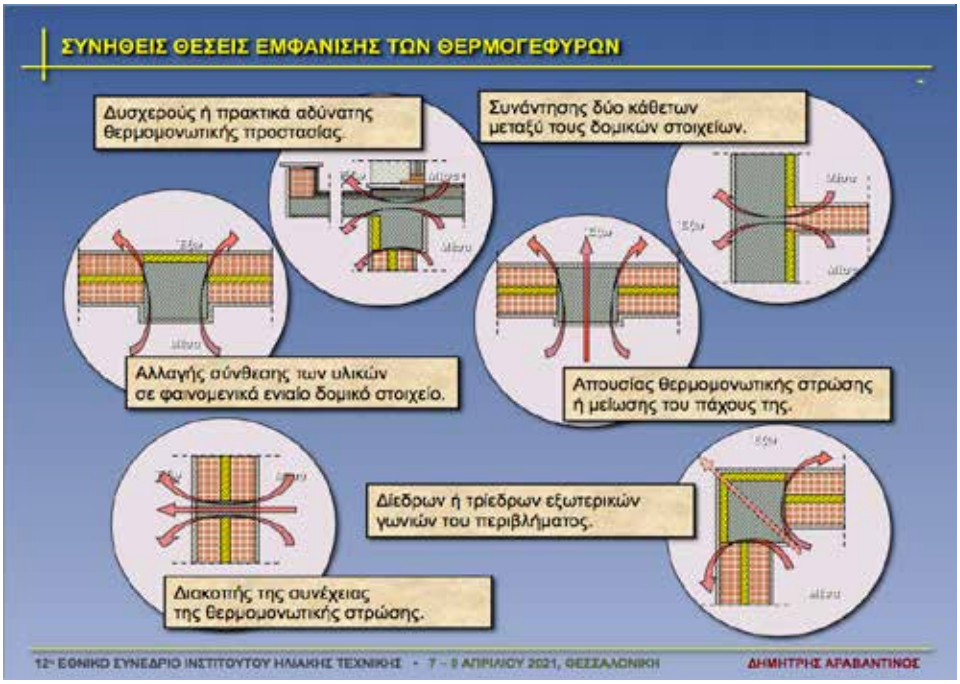


ΔΙΚΕΛΥΦΗ ΟΠΤΟΠΛΙΝΘΟΔΟΜΗ ΜΕ ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΣΗ ΣΤΟΝ ΠΥΡΗΝΑ
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΤΙΚΩΝ ΕΛΕΓΧΩΝ (ΘΕΡΜΟΦΩΤΟΓΡΑΦΗΣΗ)
Φωτογραφική αποτύπωση
Θερμοφωτογραφική αποτύπωση
Η θερμοφωτογραφία από τον εξωτερικό χώρο
12ο ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟΥ ΗΛΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ • 7 – 9 ΑΠΡΙΛΙΟΥ 2021, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΑΡΑΒΑΝΤΙΝΟΣ

ΓΩΝΙΑΚΟ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑ ΜΕ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΣΗ
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΤΙΚΩΝ ΕΛΕΓΧΩΝ (ΘΕΡΜΟΦΩΤΟΓΡΑΦΗΣΗ)
Φωτογραφική αποτύπωση
Θερμοφωτογραφική αποτύπωση
Η θερμοφωτογραφία από τον εσωτερικό χώρο
Αντιστροφή της χρωματικής κλίμακας
12ο ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟΥ ΗΛΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ • 7 – 9 ΑΠΡΙΛΙΟΥ 2021, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΑΡΑΒΑΝΤΙΝΟΣ

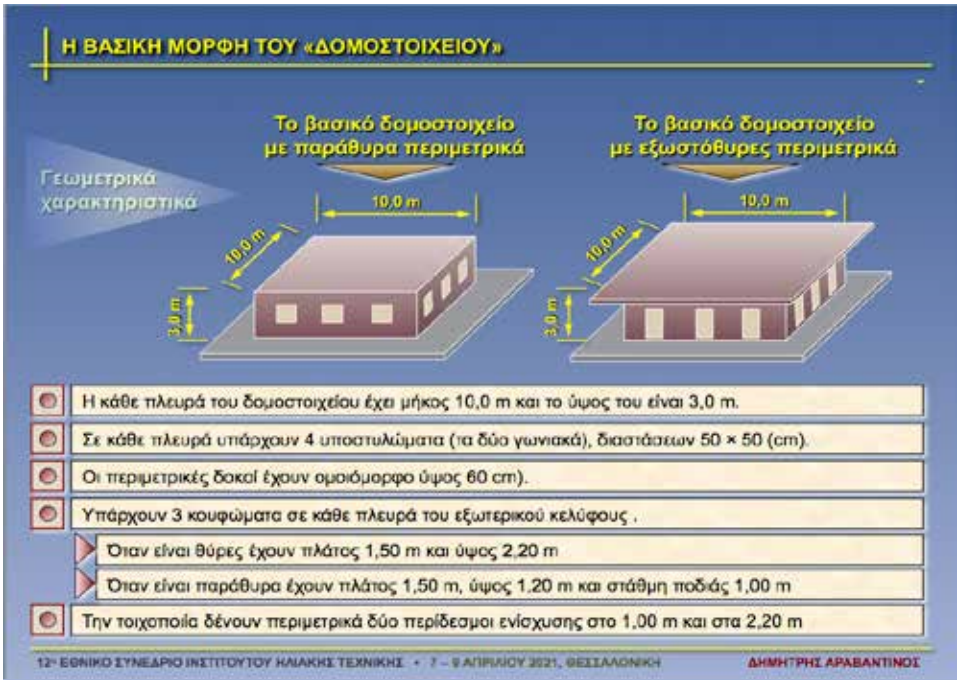
ΟΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΥΠΑΡΞΗ ΤΩΝ ΘΕΡΜΟΓΕΦΥΡΩΝ
Στη θέση της θερμογέφυρας το δομικό στοιχείο εμφανίζει περιορισμένη θερμική προστασία
ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ
ta = - 10°C
~ - 5°C
~ 0°C
~ + 5°C
~ +15°C
~ +10°C
Θερμική ροή
Ισοθερμικές καμπύλες
ti = + 20°C
Αύξηση των θερμικών απωλειών
Πτώση της επιφανειακής θερμοκρασίας
Μείωση του αισθήματος θερμικής άνεσης
Εκδήλωση του φαινομένου συμπύκνωσης
12ο ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟΥ ΗΛΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ • 7 - 9 ΑΠΡΙΛΙΟΥ 2021, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΑΡΑΒΑΝΤΙΝΟΣ

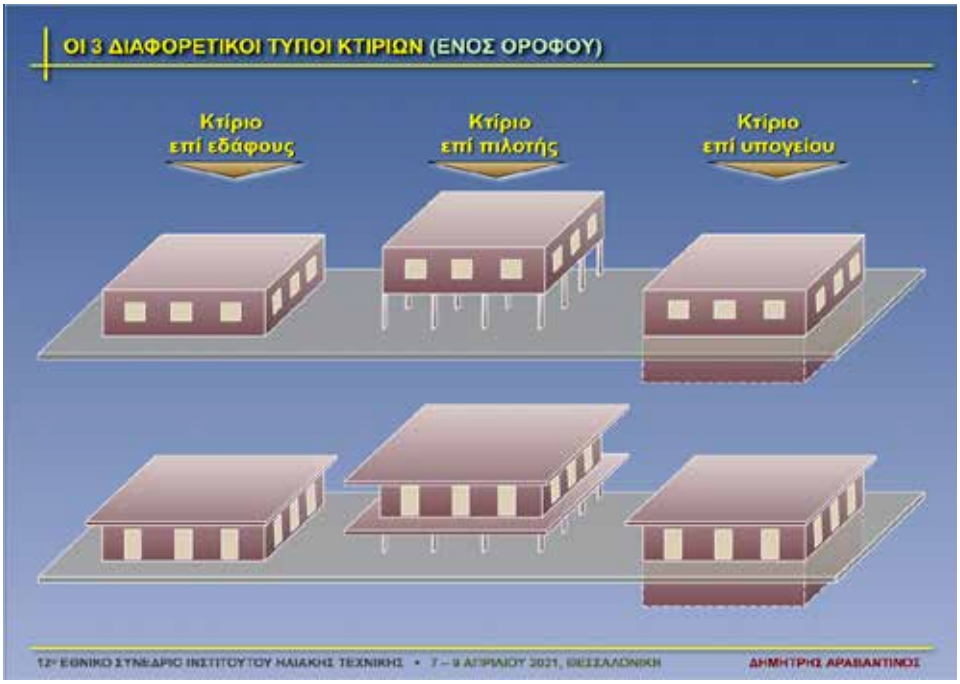

ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΔΙΑΤΟΜΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ. Η ΕΝΤΑΣΗ ΤΩΝ ΡΟΩΝ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ
Διατομή δομικού στοιχείου
Διάγραμμα θερμικών ροών
Διακοπή συνέχειας θερμομονωτικής στρώσης
Διακοπή συνέχειας θερμομονωτικής στρώσης
Διακοπή συνέχειας θερμομονωτικής στρώσης
Ένταση θερμικής ροής
Ένταση θερμικής ροής
Ένταση θερμικής ροής
Πάχος μόνωσης: 0,05 - 0,10 m
U=0,493 - 0,282 W/(m²·K)
U=0,465 - 0,273 W/(m²·K)
15°C
10°C
5°C
0°C
12ο ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟΥ ΗΛΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ • 7 - 9 ΑΠΡΙΛΙΟΥ 2021, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΑΡΑΒΑΝΤΙΝΟΣ

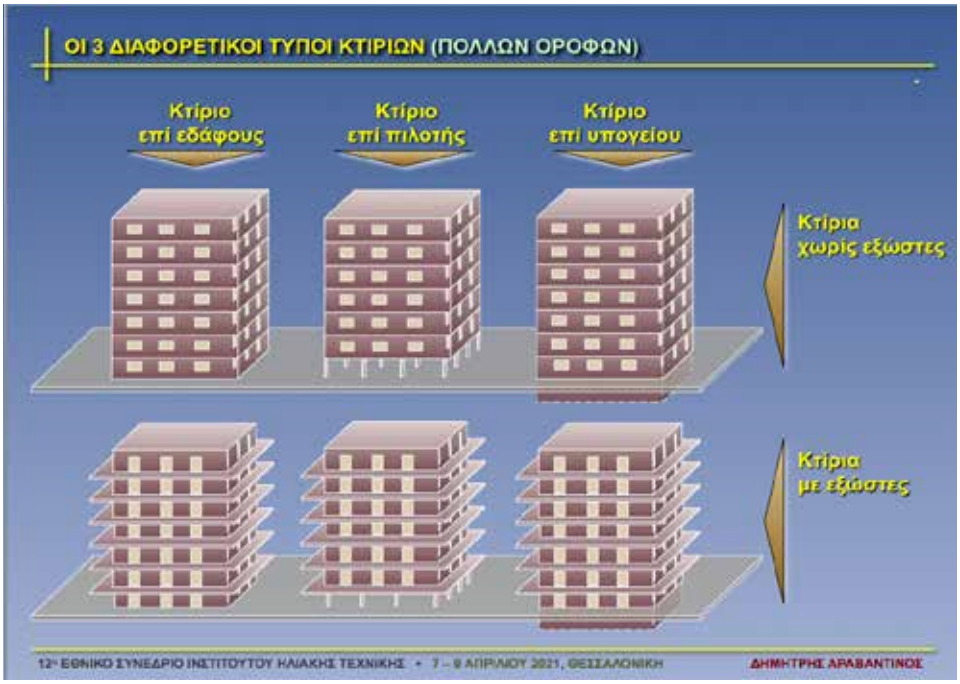

ΣΥΝΗΘΕΙΣ ΘΕΣΕΙΣ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ ΤΩΝ ΘΕΡΜΟΓΕΦΥΡΩΝ
Δυσχερούς ή πρακτικά αδύνατης θερμομονωτικής προστασίας.
Συνάντησης δύο κάθετων μεταξύ τους δομικών στοιχείων.
Αλλαγής σύνθεσης των υλικών σε φαινομενικά ενιαίο δομικό στοιχείο.
Απουσίας θερμομονωτικής στρώσης ή μείωσης του πάχους της.
Δίεδρων ή τρίεδρων εξωτερικών γωνιών του περιβλήματος.
Διακοπής της συνέχειας της θερμομονωτικής στρώσης.
12ο ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟΥ ΗΛΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ • 7 – 9 ΑΠΡΙΛΙΟΥ 2021, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΑΡΑΒΑΝΤΙΝΟΣ

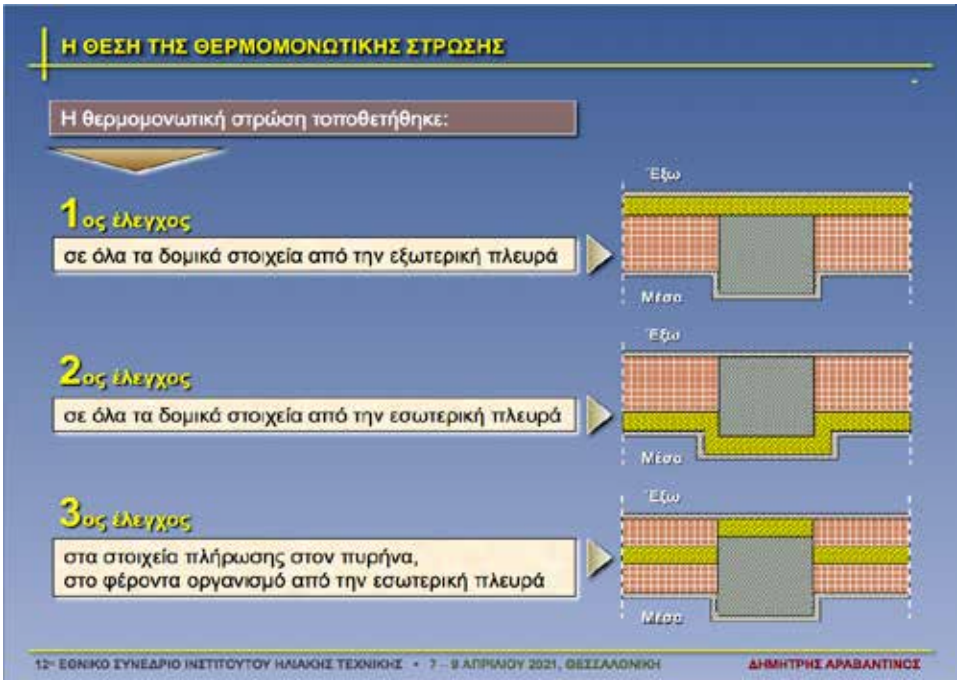
ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΘΕΡΜΟΓΕΦΥΡΩΝ
Οι θερμογέφυρες διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:
Γραμμικές θερμογέφυρες
Εκτείνονται κατ' ομοιόμορφο τρόπο σε όλο το μήκος ενός δομικού στοιχείου.
Ορίζονται από το γινόμενο: Ψ × ℓ W/K
όπου:
Ψ ο συντελεστής γραμμικής θερμοπερατότητας [W/(m·K)]
l το μήκος της θερμογέφυρας [m]
Σημειακές θερμογέφυρες
Ο ελληνικός κανονισμός τις θεωρεί πρακτικά αμελητέες και δεν τις λαμβάνει υπόψη στον υπολογισμό.
12ο ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟΥ ΗΛΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ • 7 – 9 ΑΠΡΙΛΙΟΥ 2021, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΑΡΑΒΑΝΤΙΝΟΣ

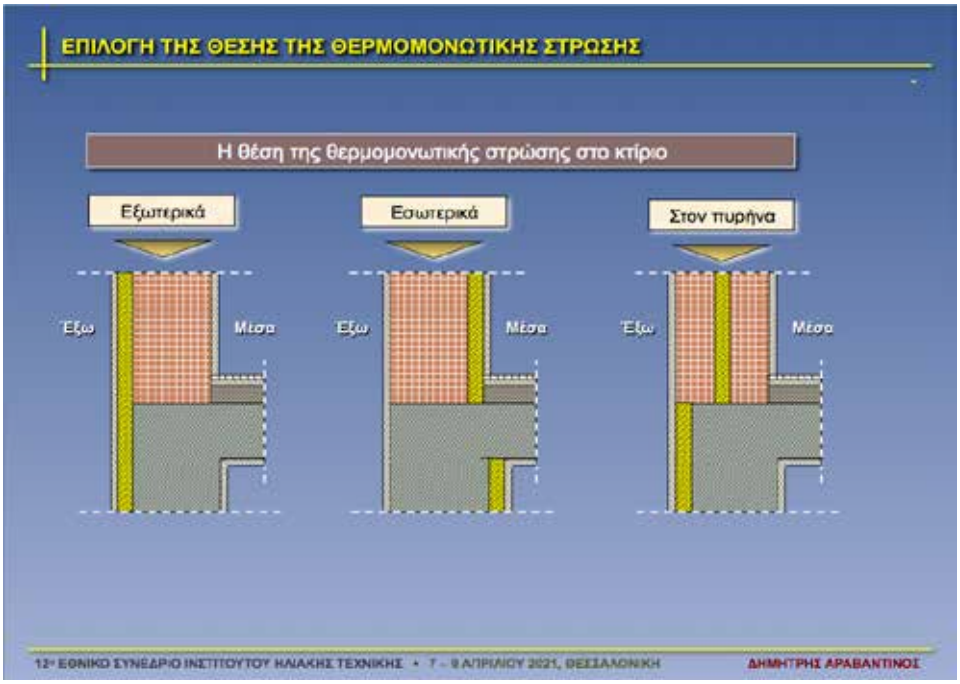
Η ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΤΩΝ ΘΕΡΜΟΓΕΦΥΡΩΝ ΩΣ ΠΟΣΟΣΤΟ ΤΩΝ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ
Επεξεργασία σε πρόγραμμα στον ηλεκτρονικό υπολογιστή
Στόχος
Η ποσοστιαία συμμετοχή των θερμογεφυρών στις θερμικές απώλειες από το κέλυφος του κτιρίου
Σε κτίρια διαφορετικού τύπου
Σε κτίρια διαφορετικού ύψους
Σε κτίρια διαφορετικού όγκου
Βασική μονάδα ελέγχου το «δομοστοιχείο»
Έλεγχος σε πολλαπλασιαστική μορφή
Έλεγχος της θέσης της θερμομόνωσης
Θερμικές απώλειες
12ο ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟΥ ΗΛΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ • 7 – 9 ΑΠΡΙΛΙΟΥ 2021, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΑΡΑΒΑΝΤΙΝΟΣ

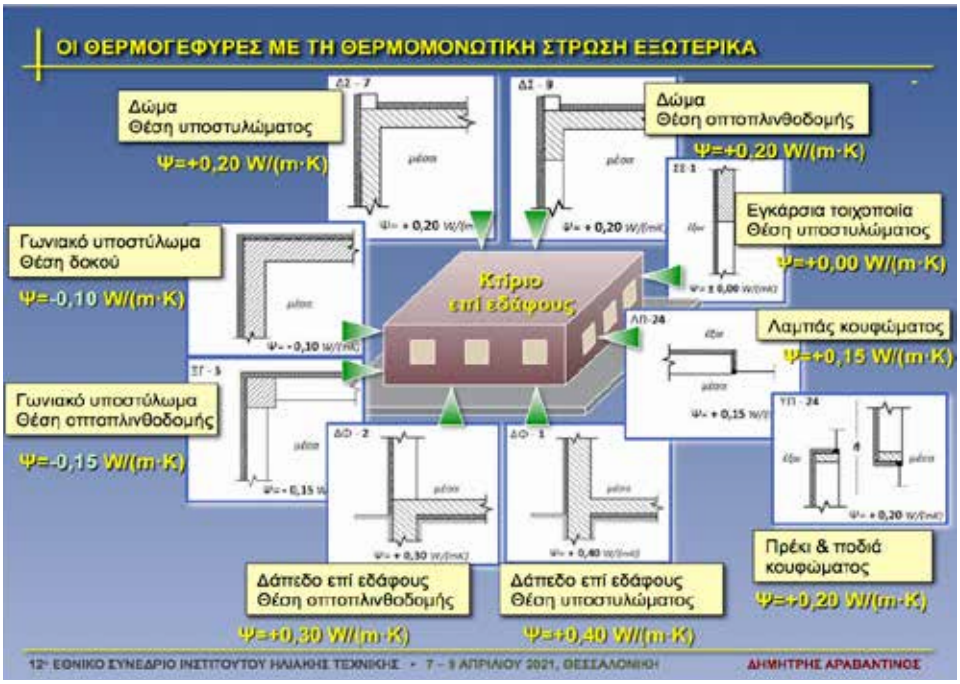

Η ΒΑΣΙΚΗ ΜΟΡΦΗ ΤΟΥ «ΔΟΜΟΣΤΟΙΧΕΙΟΥ»
Το βασικό δομοστοιχείο με παράθυρα περιμετρικά
Το βασικό δομοστοιχείο με εξωστόθυρες περιμετρικά
Γεωμετρικά χαρακτηριστικά
10,0 m
10,0 m
3,0 m
Η κάθε πλευρά του δομοστοιχείου έχει μήκος 10,0 m και το ύψος του είναι 3,0 m.
Σε κάθε πλευρά υπάρχουν 4 υποστυλώματα (τα δύο γωνιακά), διαστάσεων 50 × 50 (cm).
Οι περιμετρικές δοκοί έχουν ομοιόμορφο ύψος 60 cm).
Υπάρχουν 3 κουφώματα σε κάθε πλευρά του εξωτερικού κελύφους .
Όταν είναι θύρες έχουν πλάτος 1,50 m και ύψος 2,20 m
Όταν είναι παράθυρα έχουν πλάτος 1,50 m, ύψος 1,20 m και στάθμη ποδιάς 1,00 m
Την τοιχοποιία δένουν περιμετρικά δύο περίδεσμοι ενίσχυσης στο 1,00 m και στα 2,20 m
12ο ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟΥ ΗΛΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ • 7 – 9 ΑΠΡΙΛΙΟΥ 2021, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΑΡΑΒΑΝΤΙΝΟΣ

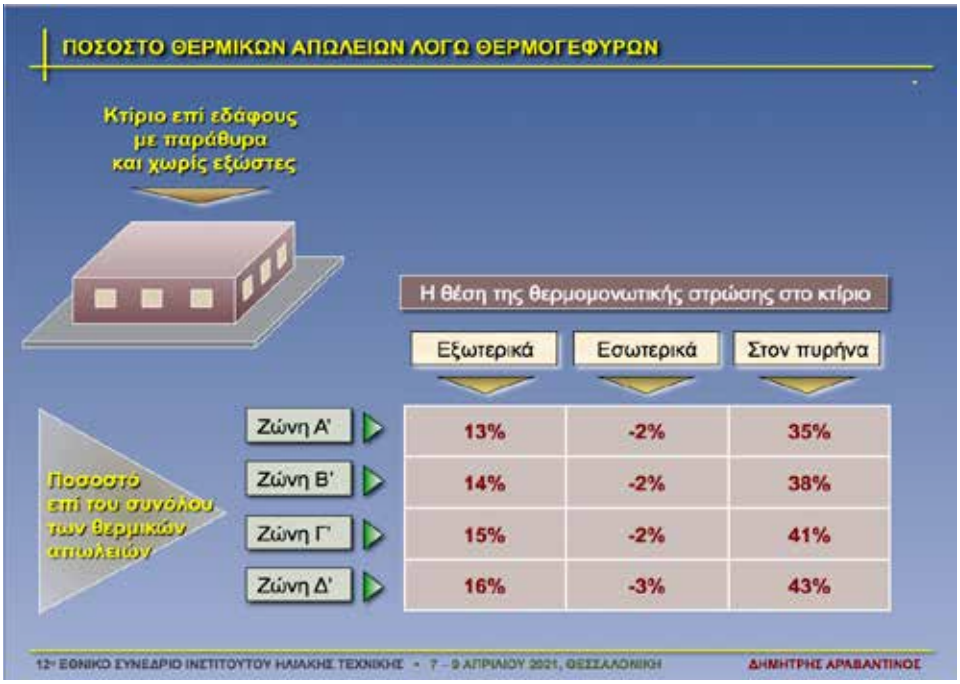

ΟΙ 3 ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟΙ ΤΥΠΟΙ ΚΤΙΡΙΩΝ (ΕΝΟΣ ΟΡΟΦΟΥ)
Κτίριο επί εδάφους
Κτίριο επί πιλοτής
Κτίριο επί υπογείου
12ο ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟΥ ΗΛΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ • 7 – 9 ΑΠΡΙΛΙΟΥ 2021, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΑΡΑΒΑΝΤΙΝΟΣ

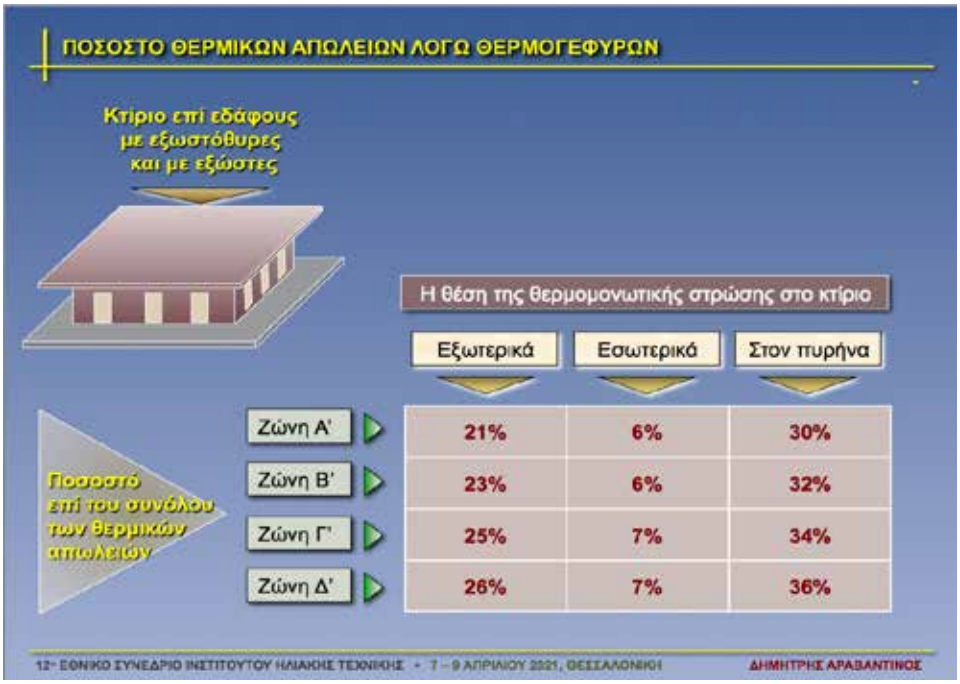

ΟΙ 3 ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟΙ ΤΥΠΟΙ ΚΤΙΡΙΩΝ (ΠΟΛΛΩΝ ΟΡΟΦΩΝ)
Κτίριο επί εδάφους
Κτίριο επί πιλοτής
Κτίριο επί υπογείου
Κτίρια χωρίς εξώστες
Κτίρια με εξώστες
12ο ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟΥ ΗΛΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ • 7 – 9 ΑΠΡΙΛΙΟΥ 2021, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΑΡΑΒΑΝΤΙΝΟΣ

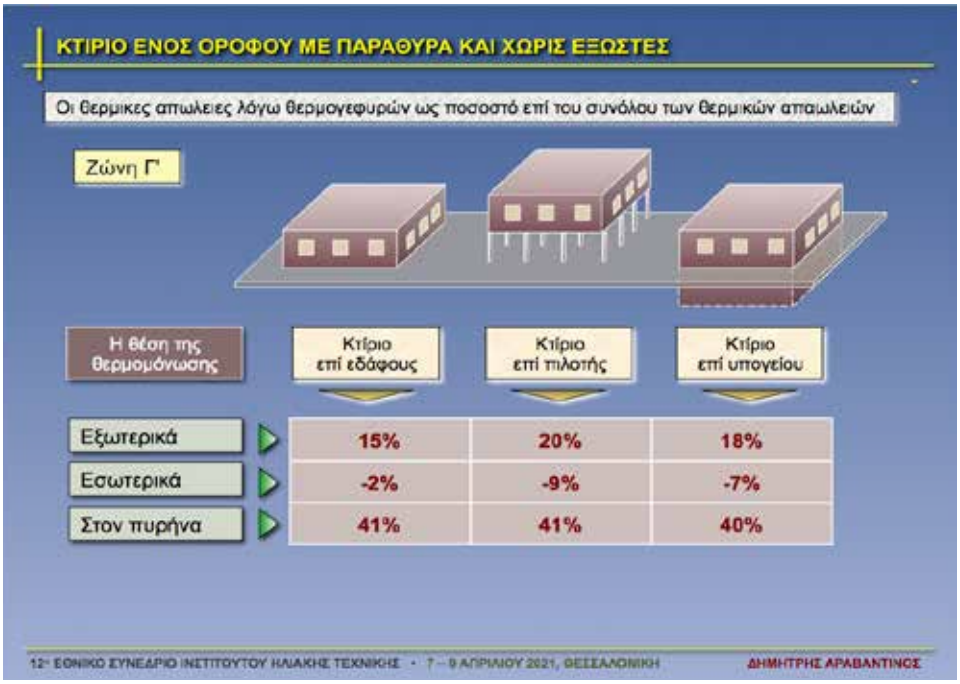

Η ΘΕΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΤΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ
Η θερμομονωτική στρώση τοποθετήθηκε:
1ος έλεγχος
σε όλα τα δομικά στοιχεία από την εξωτερική πλευρά
2ος έλεγχος
σε όλα τα δομικά στοιχεία από την εσωτερική πλευρά
3ος έλεγχος
στα στοιχεία πλήρωσης στον πυρήνα,
στο φέροντα οργανισμό από την εσωτερική πλευρά
Έξω
Μέσα
12ο ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟΥ ΗΛΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ • 7 - 9 ΑΠΡΙΛΙΟΥ 2021, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΑΡΑΒΑΝΤΙΝΟΣ

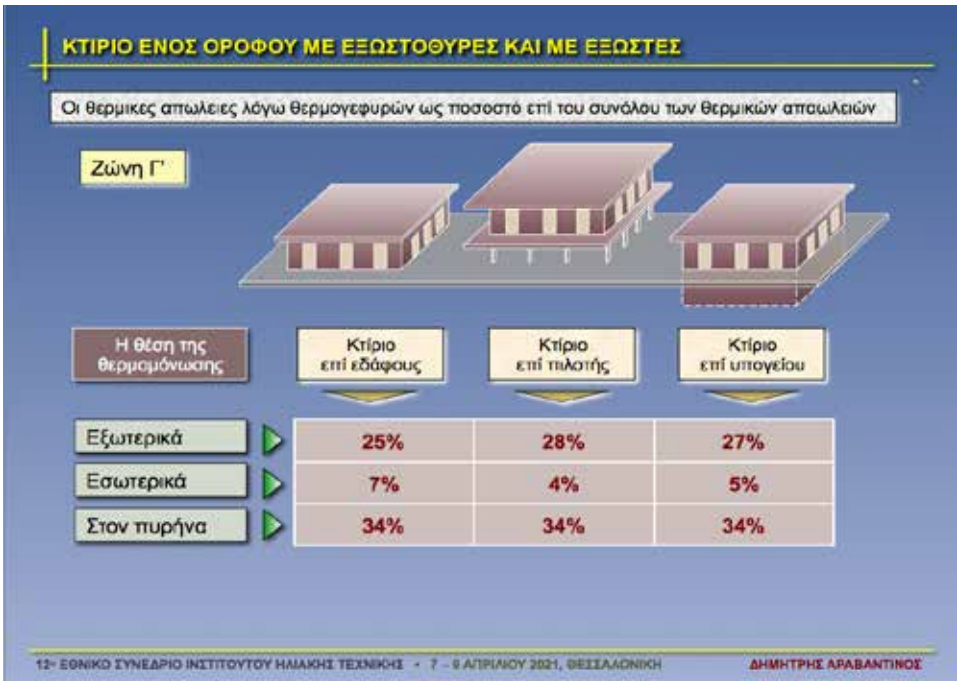

ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΤΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ
Η θέση της θερμομονωτικής στρώσης στο κτίριο
Εξωτερικά
Εσωτερικά
Στον πυρήνα
Έξω
Μέσα
12ο ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟΥ ΗΛΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ • 7 - 9 ΑΠΡΙΛΙΟΥ 2021, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΑΡΑΒΑΝΤΙΝΟΣ

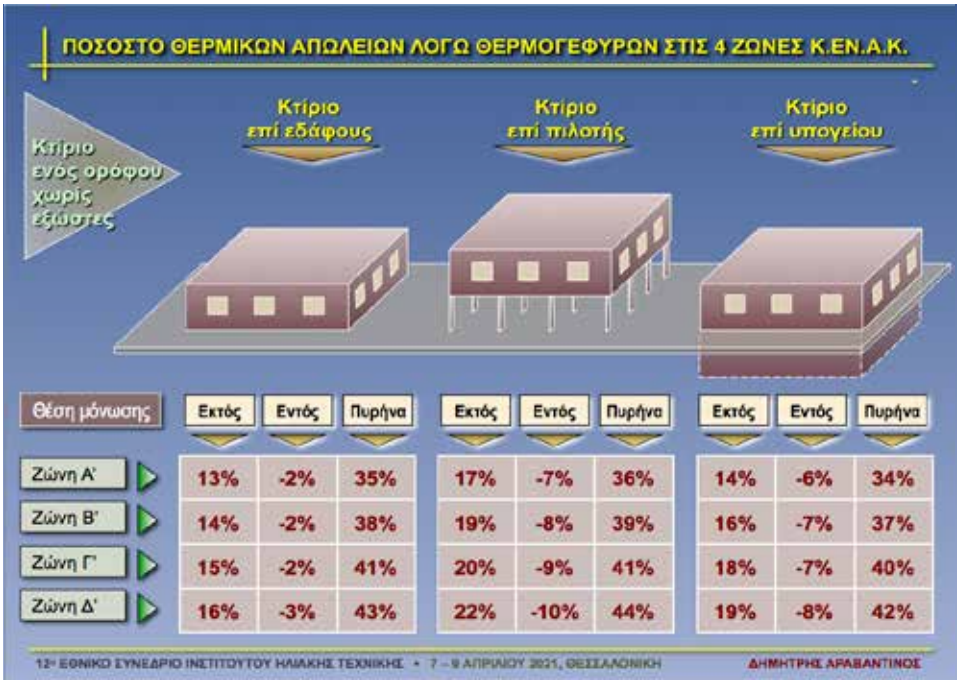

ΟΙ ΘΕΡΜΟΓΕΦΥΡΕΣ ΜΕ ΤΗ ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΤΙΚΗ ΣΤΡΩΣΗ ΕΞΩΤΕΡΙΚΑ
Δώμα
Θέση υποστυλώματος
Ψ=+0,20 W/(m·K)
Δώμα
Θέση οπτοπλινθοδομής
Ψ=+0,20 W/(m·K)
Εγκάρσια τοιχοποιία
Θέση υποστυλώματος
Ψ=+0,00 W/(m·K)
Γωνιακό υποστύλωμα
Θέση δοκού
Ψ=-0,10 W/(m·K)
Κτίριο
επί εδάφους
Λαμπάς κουφώματος
Ψ=+0,15 W/(m·K)
Γωνιακό υποστύλωμα
Θέση οπτοπλινθοδομής
Ψ=-0,15 W/(m·K)
Πρέκι & ποδιά
κουφώματος
Ψ=+0,20 W/(m·K)
Δάπεδο επί εδάφους
Θέση οπτοπλινθοδομής
Ψ=+0,30 W/(m·K)
Δάπεδο επί εδάφους
Θέση υποστυλώματος
Ψ=+0,40 W/(m·K)
12ο ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟΥ ΗΛΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ • 7 – 9 ΑΠΡΙΛΙΟΥ 2021, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΑΡΑΒΑΝΤΙΝΟΣ

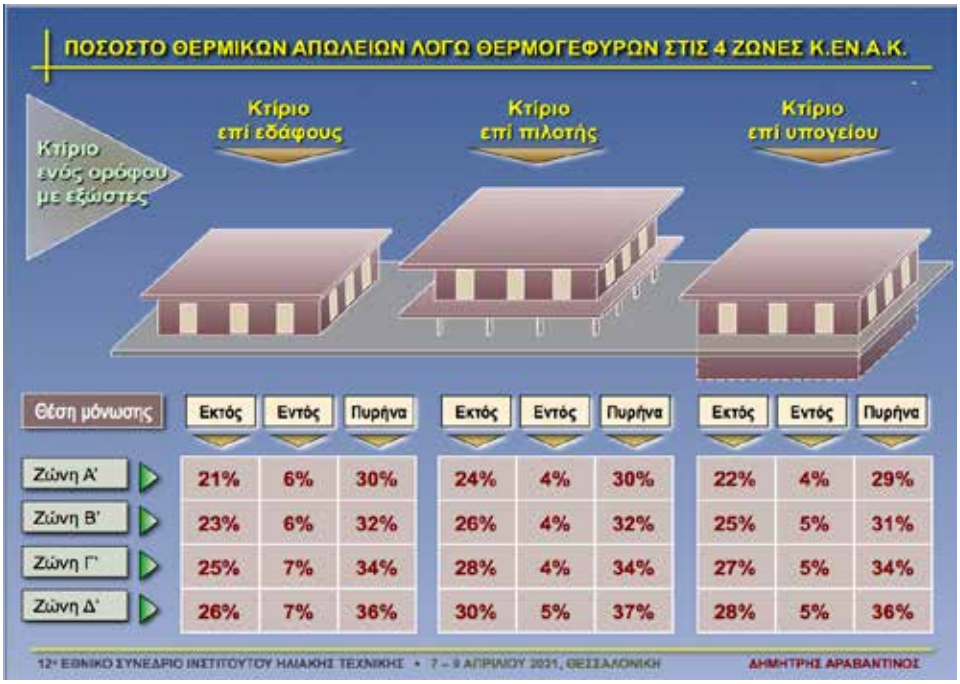

ΠΟΣΟΣΤΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΛΟΓΩ ΘΕΡΜΟΓΕΦΥΡΩΝ
Κτίριο επί εδάφους
με παράθυρα
και χωρίς εξώστες
Η θέση της θερμομονωτικής στρώσης στο κτίριο
Εξωτερικά
Εσωτερικά
Στον πυρήνα
Ποσοστό επί του συνόλου των θερμικών απωλειών
Ζώνη Α'
13%
-2%
35%
Ζώνη Β'
14%
-2%
38%
Ζώνη Γ'
15%
-2%
41%
Ζώνη Δ'
16%
-3%
43%
12ο ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟΥ ΗΛΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ • 7 – 9 ΑΠΡΙΛΙΟΥ 2021, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΑΡΑΒΑΝΤΙΝΟΣ

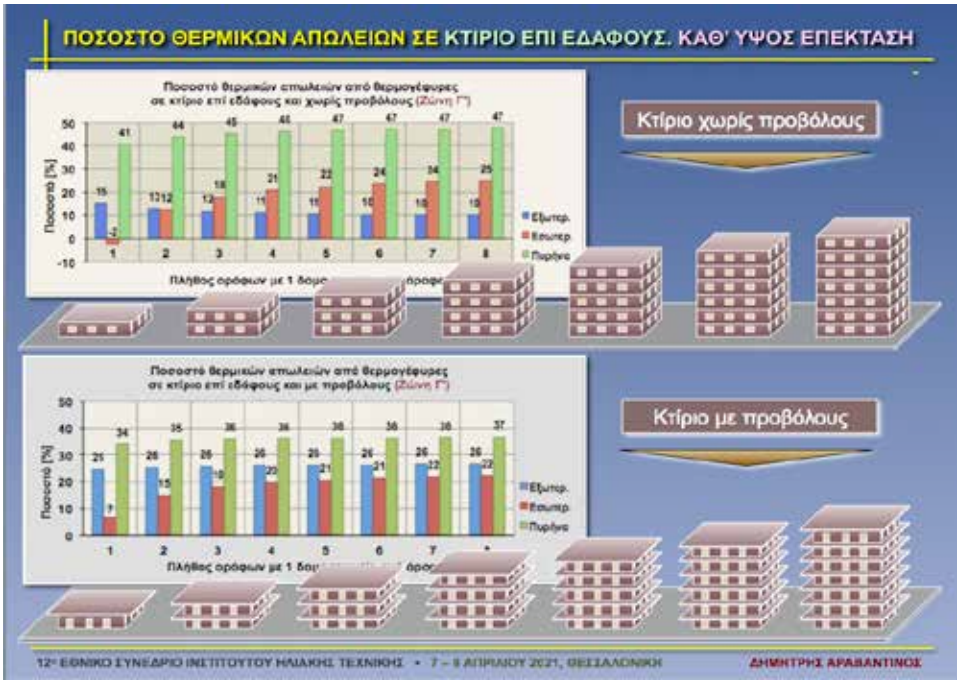

ΠΟΣΟΣΤΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΛΟΓΩ ΘΕΡΜΟΓΕΦΥΡΩΝ
Κτίριο επί εδάφους με εξωστόθυρες και με εξώστες
Η θέση της θερμομονωτικής στρώσης στο κτίριο
Εξωτερικά
Εσωτερικά
Στον πυρήνα
Ποσοστό επί του συνόλου των θερμικών απωλειών
Ζώνη Α'
21%
6%
30%
Ζώνη Β'
23%
6%
32%
Ζώνη Γ'
25%
7%
34%
Ζώνη Δ'
26%
7%
36%
12ο ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟΥ ΗΛΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ • 7 – 9 ΑΠΡΙΛΙΟΥ 2021, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΑΡΑΒΑΝΤΙΝΟΣ

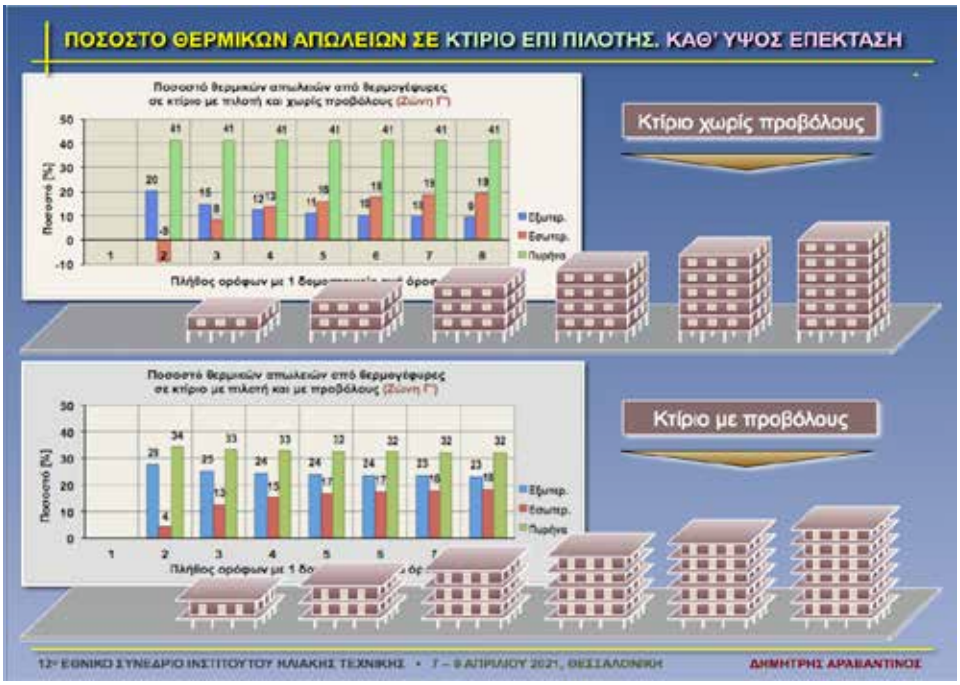

ΚΤΙΡΙΟ ΕΝΟΣ ΟΡΟΦΟΥ ΜΕ ΠΑΡΑΘΥΡΑ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΕΞΩΣΤΕΣ
Οι θερμικες απωλειες λόγω θερμογεφυριών ως ποσοστό επί του συνόλου των θερμικών απωλειών
Ζώνη Γ'
Η θέση της θερμομόνωσης
Κτίριο επί εδάφους
Κτίριο επί πιλοτής
Κτίριο επί υπογείου
Εξωτερικά
15%
20%
18%
Εσωτερικά
-2%
-9%
-7%
Στον πυρήνα
41%
41%
40%
12ο ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟΥ ΗΛΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ • 7 – 9 ΑΠΡΙΛΙΟΥ 2021, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΑΡΑΒΑΝΤΙΝΟΣ

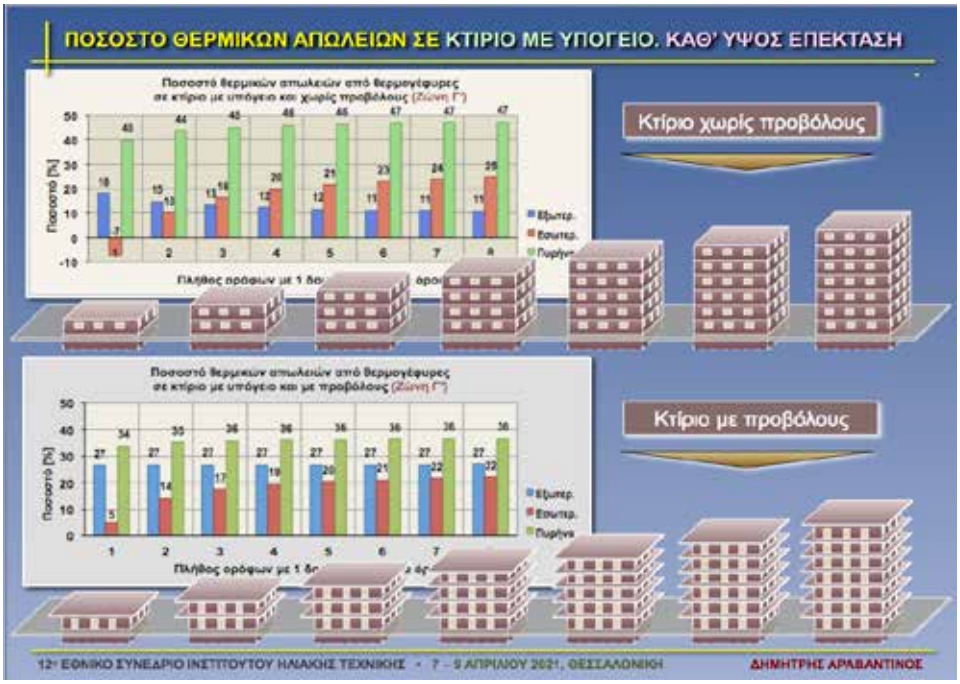

ΚΤΙΡΙΟ ΕΝΟΣ ΟΡΟΦΟΥ ΜΕ ΕΞΩΣΤΟΘΥΡΕΣ ΚΑΙ ΜΕ ΕΞΩΣΤΕΣ
Οι θερμικές απωλείες λόγω θερμογεφυρών ως ποσοστό επί του συνόλου των θερμικών απωλειών
Ζώνη Γ'
Η θέση της θερμομόνωσης
Κτίριο επί εδάφους
Κτίριο επί πιλοτής
Κτίριο επί υπογείου
Εξωτερικά 25% 28% 27%
Εσωτερικά 7% 4% 5%
Στον πυρήνα 34% 34% 34%
12ο ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟΥ ΗΛΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ • 7 – 9 ΑΠΡΙΛΙΟΥ 2021, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΑΡΑΒΑΝΤΙΝΟΣ

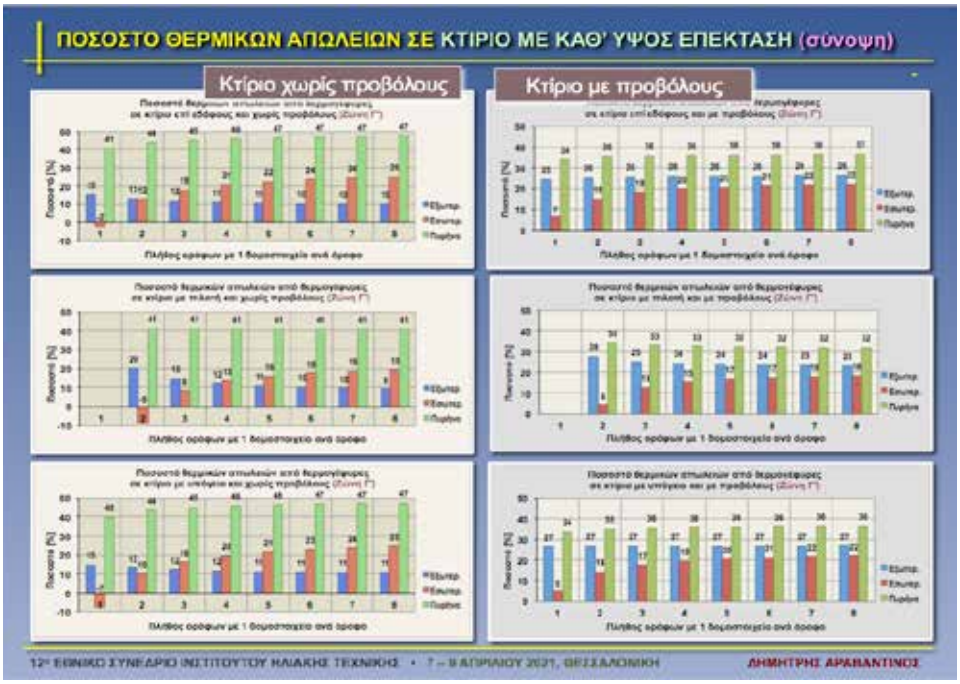

ΠΟΣΟΣΤΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΛΟΓΩ ΘΕΡΜΟΓΕΦΥΡΩΝ ΣΤΙΣ 4 ΖΩΝΕΣ Κ.ΕΝ.Α.Κ.
Κτίριο ενός ορόφου χωρίς εξώστες
Κτίριο επί εδάφους
Κτίριο επί πιλοτής
Κτίριο επί υπογείου
Θέση μόνωσης
Εκτός Εντός Πυρήνα
Ζώνη Α' 13% -2% 35% 17% -7% 36% 14% -6% 34%
Ζώνη Β' 14% -2% 38% 19% -8% 39% 16% -7% 37%
Ζώνη Γ' 15% -2% 41% 20% -9% 41% 18% -7% 40%
Ζώνη Δ' 16% -3% 43% 22% -10% 44% 19% -8% 42%
12ο ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟΥ ΗΛΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ • 7 – 9 ΑΠΡΙΛΙΟΥ 2021, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΑΡΑΒΑΝΤΙΝΟΣ

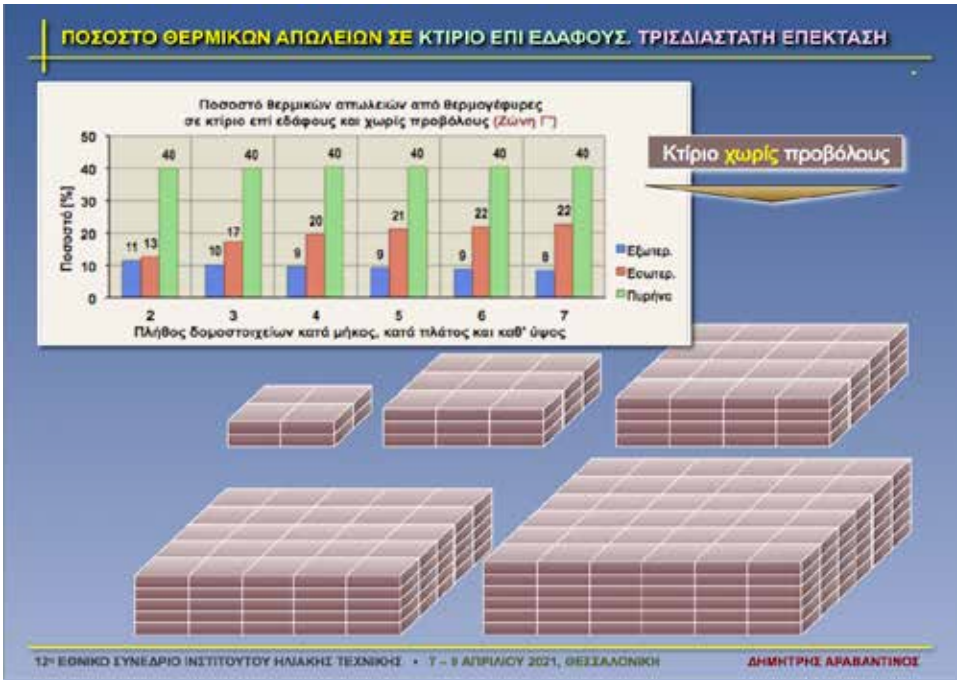

ΠΟΣΟΣΤΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΛΟΓΩ ΘΕΡΜΟΓΕΦΥΡΩΝ ΣΤΙΣ 4 ΖΩΝΕΣ Κ.ΕΝ.Α.Κ.
Κτίριο ενός ορόφου με εξώστες
Κτίριο επί εδάφους
Κτίριο επί πιλοτής
Κτίριο επί υπογείου
Θέση μόνωσης
Εκτός
Εντός
Πυρήνα
Ζώνη Α'
21%
6%
30%
24%
4%
30%
22%
4%
29%
Ζώνη Β'
23%
6%
32%
26%
4%
32%
25%
5%
31%
Ζώνη Γ'
25%
7%
34%
28%
4%
34%
27%
5%
34%
Ζώνη Δ'
26%
7%
36%
30%
5%
37%
28%
5%
36%
12ο ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟΥ ΗΛΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ • 7 – 9 ΑΠΡΙΛΙΟΥ 2021, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΑΡΑΒΑΝΤΙΝΟΣ

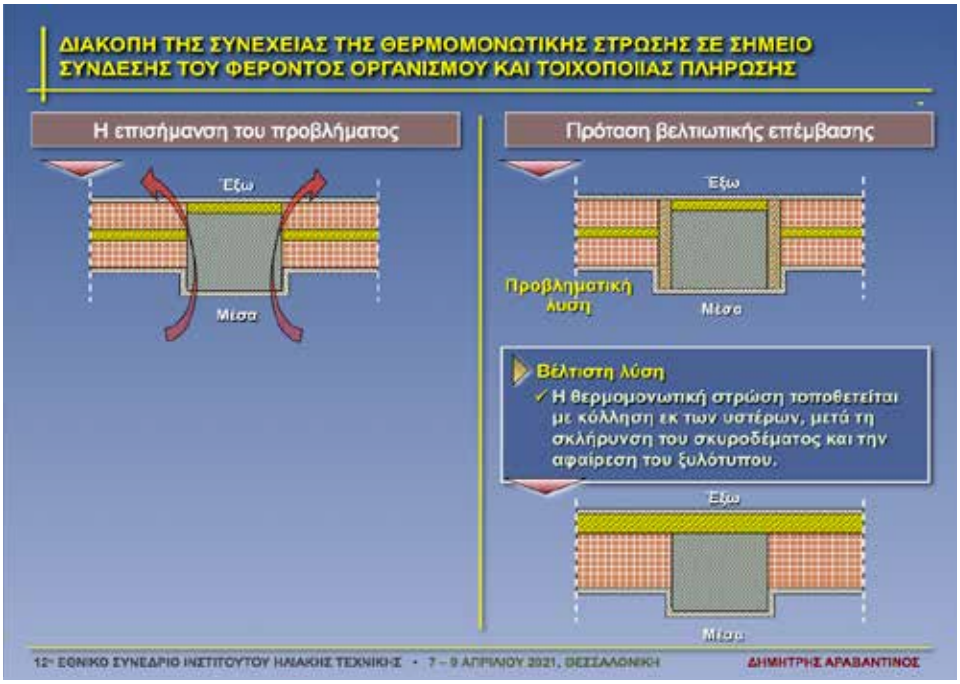

ΠΟΣΟΣΤΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΣΕ ΚΤΙΡΙΟ ΕΠΙ ΕΔΑΦΟΥΣ. ΚΑΘ' ΥΨΟΣ ΕΠΕΚΤΑΣΗ
Κτίριο χωρίς προβόλους
Κτίριο με προβόλους
Ποσοστό [%]
Πλήθος ορόφων με 1 δομ
Εξωτερ.
Εσωτερ.
Πυρήνα
12ο ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟΥ ΗΛΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ • 7 – 9 ΑΠΡΙΛΙΟΥ 2021, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΑΡΑΒΑΝΤΙΝΟΣ

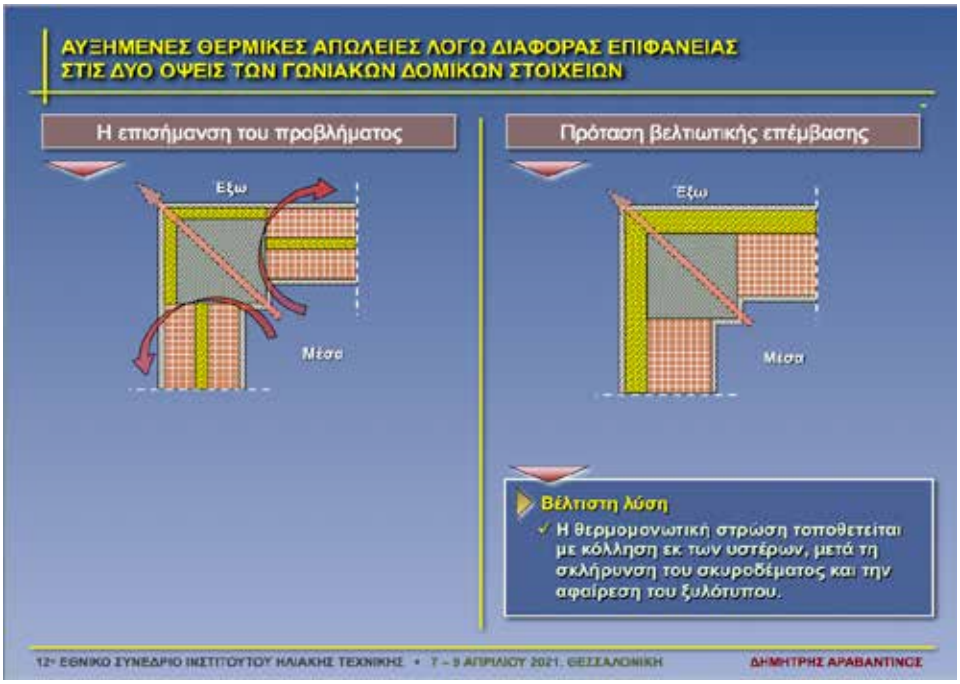

ΠΟΣΟΣΤΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΣΕ ΚΤΙΡΙΟ ΕΠΙ ΠΙΛΟΤΗΣ. ΚΑΘ' ΥΨΟΣ ΕΠΕΚΤΑΣΗ
Ποσοστό θερμικών απωλειών από θερμογέφυρες σε κτίριο με πιλοτή και χωρίς προβόλους (Ζώνη Γ')
Ποσοστό [%]
Πλήθος ορόφων με 1 δομ
Εξωτερ.
Εσωτερ.
Πυρήνα
Κτίριο χωρίς προβόλους
Ποσοστό θερμικών απωλειών από θερμογέφυρες σε κτίριο με πιλοτή και με προβόλους (Ζώνη Γ')
Κτίριο με προβόλους
12ο ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟΥ ΗΛΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ • 7 – 9 ΑΠΡΙΛΙΟΥ 2021, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΑΡΑΒΑΝΤΙΝΟΣ


ΠΟΣΟΣΤΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΣΕ ΚΤΙΡΙΟ ΜΕ ΥΠΟΓΕΙΟ. ΚΑΘ' ΥΨΟΣ ΕΠΕΚΤΑΣΗ
Ποσοστό θερμικών απωλειών από θερμογέφυρες σε κτίριο με υπόγειο και χωρίς προβόλους (Ζώνη Γ')
Ποσοστό [%]
Εξωτερ.
Εσωτερ.
Πυρήνα
Κτίριο χωρίς προβόλους
Ποσοστό θερμικών απωλειών από θερμογέφυρες σε κτίριο με υπόγειο και με προβόλους (Ζώνη Γ')
Κτίριο με προβόλους
12ο ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟΥ ΗΛΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ • 7 – 9 ΑΠΡΙΛΙΟΥ 2021, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΑΡΑΒΑΝΤΙΝΟΣ


ΠΟΣΟΣΤΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΣΕ ΚΤΙΡΙΟ ΜΕ ΚΑΘ' ΥΨΟΣ ΕΠΕΚΤΑΣΗ (σύνοψη)
Κτίριο χωρίς προβόλους
Κτίριο με προβόλους
Εξωτερ.
Εσωτερ.
Πυρήνα
12ο ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟΥ ΗΛΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ • 7 – 9 ΑΠΡΙΛΙΟΥ 2021, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΑΡΑΒΑΝΤΙΝΟΣ

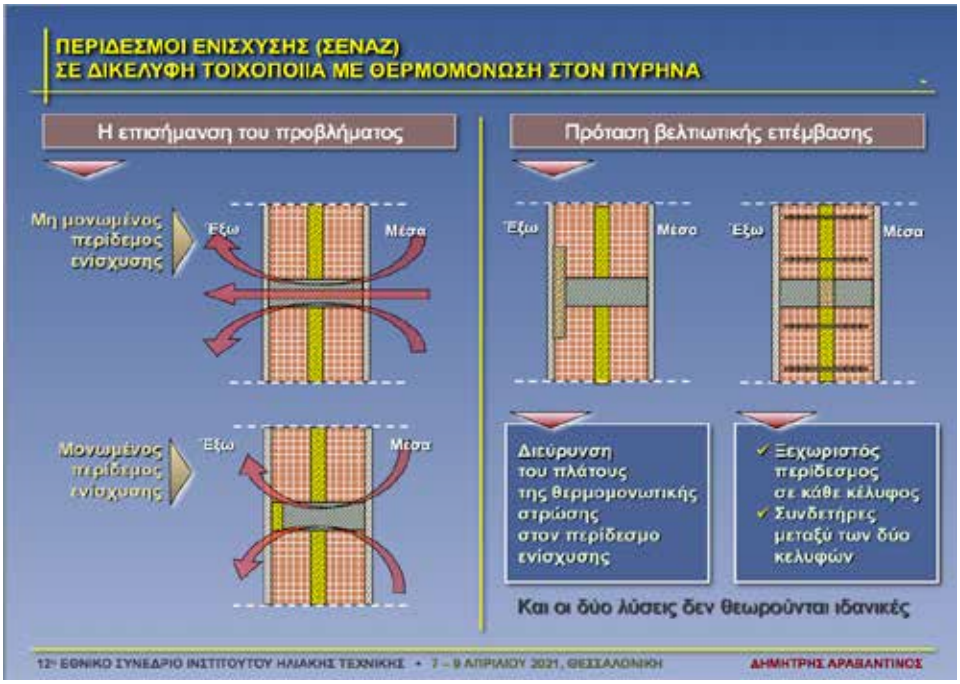

ΠΟΣΟΣΤΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΣΕ ΚΤΙΡΙΟ ΕΠΙ ΕΔΑΦΟΥΣ. ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΠΕΚΤΑΣΗ
Ποσοστό θερμικών απωλειών από θερμογέφυρες
σε κτίριο επί εδάφους και χωρίς προβόλους (Ζώνη Γ')
Ποσοστό [%]
Πλήθος δομοστοιχείων κατά μήκος, κατά πλάτος και καθ' ύψος
Εξωτερ.
Εσωτερ.
Πυρήνα
Κτίριο χωρίς προβόλους
12ο ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟΥ ΗΛΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ • 7 – 9 ΑΠΡΙΛΙΟΥ 2021, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΑΡΑΒΑΝΤΙΝΟΣ

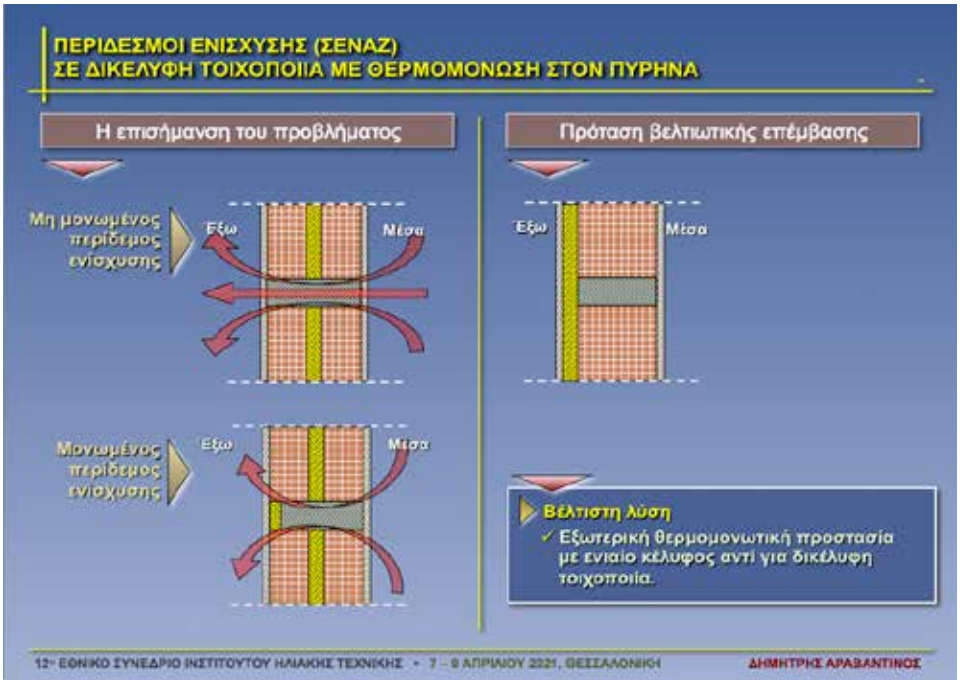

ΔΙΑΚΟΠΗ ΤΗΣ ΣΥΝΕΧΕΙΑΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΤΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ ΣΕ ΣΗΜΕΙΟ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΤΟΥ ΦΕΡΟΝΤΟΣ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ ΠΛΗΡΩΣΗΣ
Η επισήμανση του προβλήματος
Έξω
Μέσα
Πρόταση βελτιωτικής επέμβασης
Έξω
Προβληματική λύση
Μέσα
Βέλτιστη λύση
✓ Η θερμομονωτική στρώση τοποθετείται με κόλληση εκ των υστέρων, μετά τη σκλήρυνση του σκυροδέματος και την αφαίρεση του ξυλότυπου.
Έξω
Μέσα
12ο ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟΥ ΗΛΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ • 7 – 9 ΑΠΡΙΛΙΟΥ 2021, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΑΡΑΒΑΝΤΙΝΟΣ

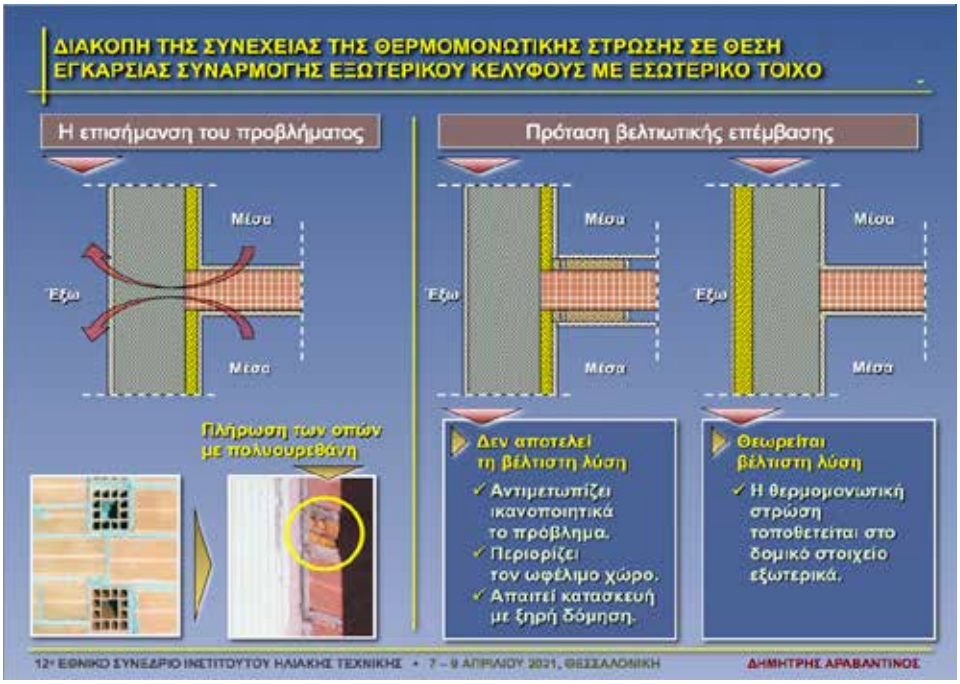

ΑΥΞΗΜΕΝΕΣ ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΛΟΓΩ ΔΙΑΦΟΡΑΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΣΤΙΣ ΔΥΟ ΟΨΕΙΣ ΤΩΝ ΓΩΝΙΑΚΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ
Η επισήμανση του προβλήματος
Έξω
Μέσα
Πρόταση βελτιωτικής επέμβασης
Έξω
Μέσα
Βέλτιστη λύση
✓ Η θερμομονωτική στρώση τοποθετείται με κόλληση εκ των υστέρων, μετά τη σκλήρυνση του σκυροδέματος και την αφαίρεση του ξυλότυπου.
12ο ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟΥ ΗΛΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ • 7 – 9 ΑΠΡΙΛΙΟΥ 2021, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΑΡΑΒΑΝΤΙΝΟΣ

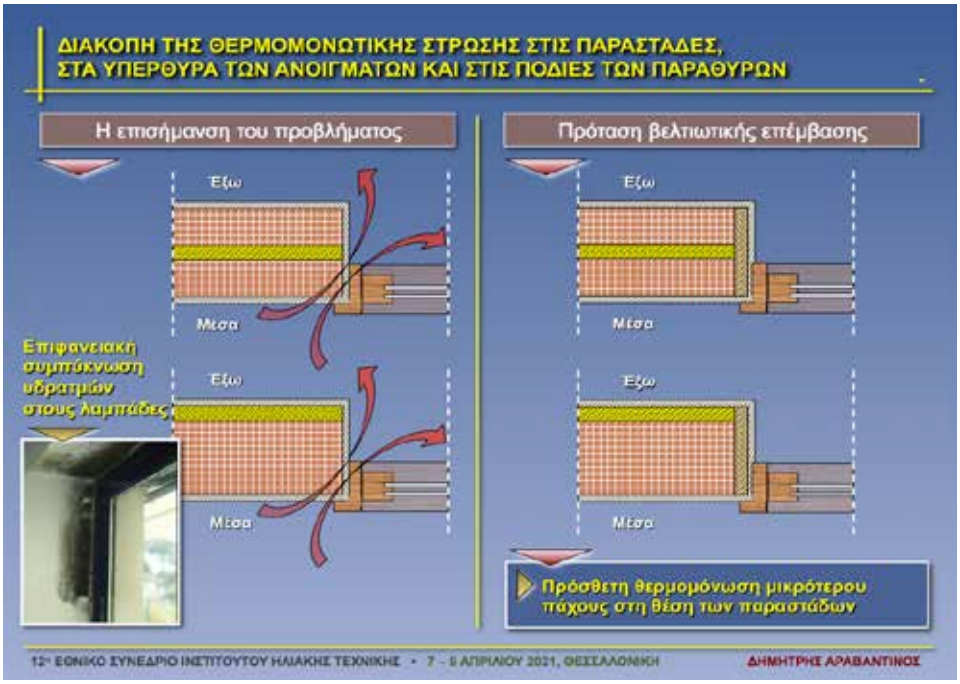
ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΘΕΡΜΟΓΕΦΥΡΑΣ ΣΤΟΝ ΠΕΡΙΔΕΣΜΟ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ (ΣΕΝΑΖ)
ΣΕ ΔΙΚΕΛΥΦΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ ΜΕ ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΣΗ ΣΤΟΝ ΠΥΡΗΝΑ
Η επισήμανση του προβλήματος
Το τούβλο ως περίδεσμος ενίσχυσης
Μέσα
Έξω
Μέσα
Έξω
12ο ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟΥ ΗΛΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ - 7 - 9 ΑΠΡΙΛΙΟΥ 2021, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΑΡΑΒΑΝΤΙΝΟΣ

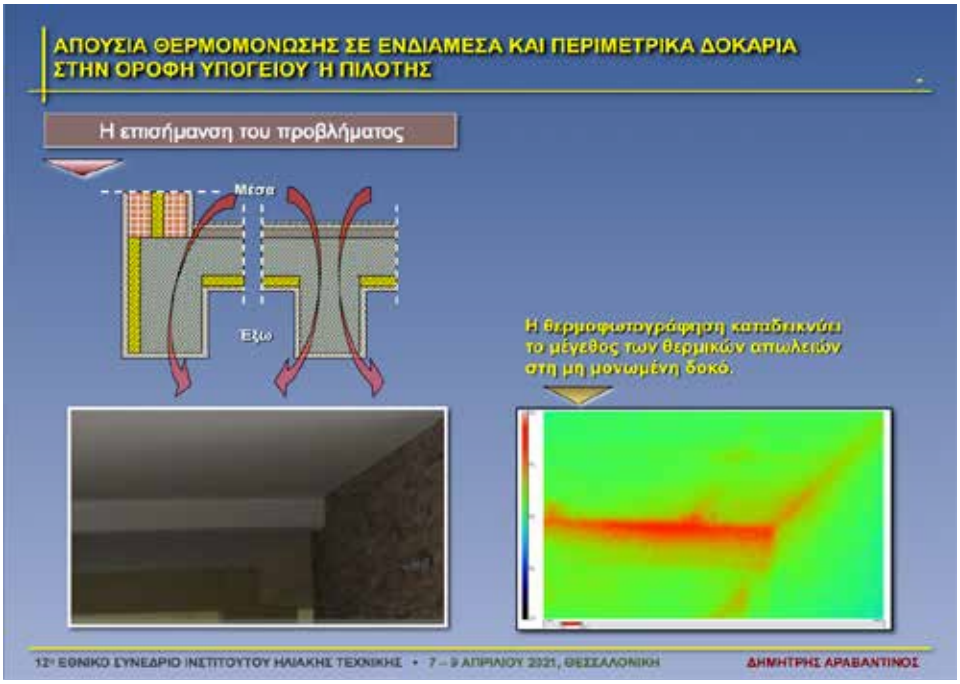
ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΓΕΦΥΡΑΣ ΣΤΟΝ ΠΕΡΙΔΕΣΜΟ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ (ΣΕΝΑΖ)
ΣΕ ΔΙΚΕΛΥΦΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ ΜΕ ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΣΗ ΣΤΟΝ ΠΥΡΗΝΑ
Η συνήθης αντιμετώπιση
12ο ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟΥ ΗΛΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ - 7 - 9 ΑΠΡΙΛΙΟΥ 2021, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΑΡΑΒΑΝΤΙΝΟΣ

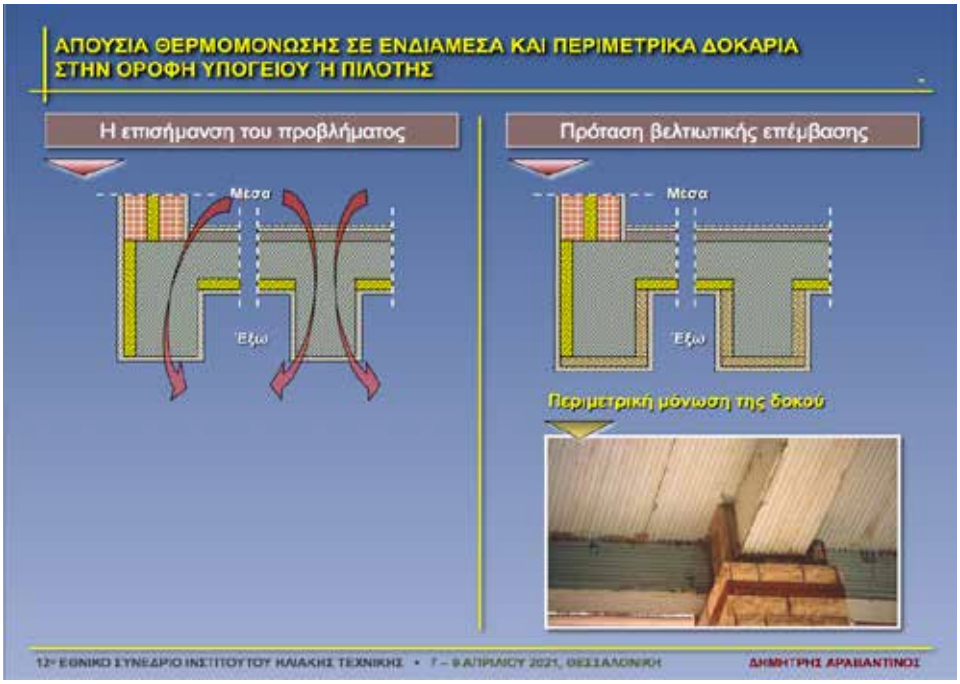

ΠΕΡΙΔΕΣΜΟΙ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ (ΣΕΝΑΖ)
ΣΕ ΔΙΚΕΛΥΦΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ ΜΕ ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΣΗ ΣΤΟΝ ΠΥΡΗΝΑ
Η επισήμανση του προβλήματος
Πρόταση βελτιωτικής επέμβασης
Μη μονωμένος περίδεσμος ενίσχυσης
Έξω
Μέσα
Μονωμένος περίδεσμος ενίσχυσης
Έξω
Μέσα
Έξω
Μέσα
Έξω
Μέσα
Διεύρυνση του πλάτους της θερμομονωτικής στρώσης στον περίδεσμο ενίσχυσης
✓ Ξεχωριστός περίδεσμος σε κάθε κέλυφος
✓ Συνδετήρες μεταξύ των δύο κελυφών
Και οι δύο λύσεις δεν θεωρούνται ιδανικές
12ο ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟΥ ΗΛΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ • 7 – 9 ΑΠΡΙΛΙΟΥ 2021, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΑΡΑΒΑΝΤΙΝΟΣ

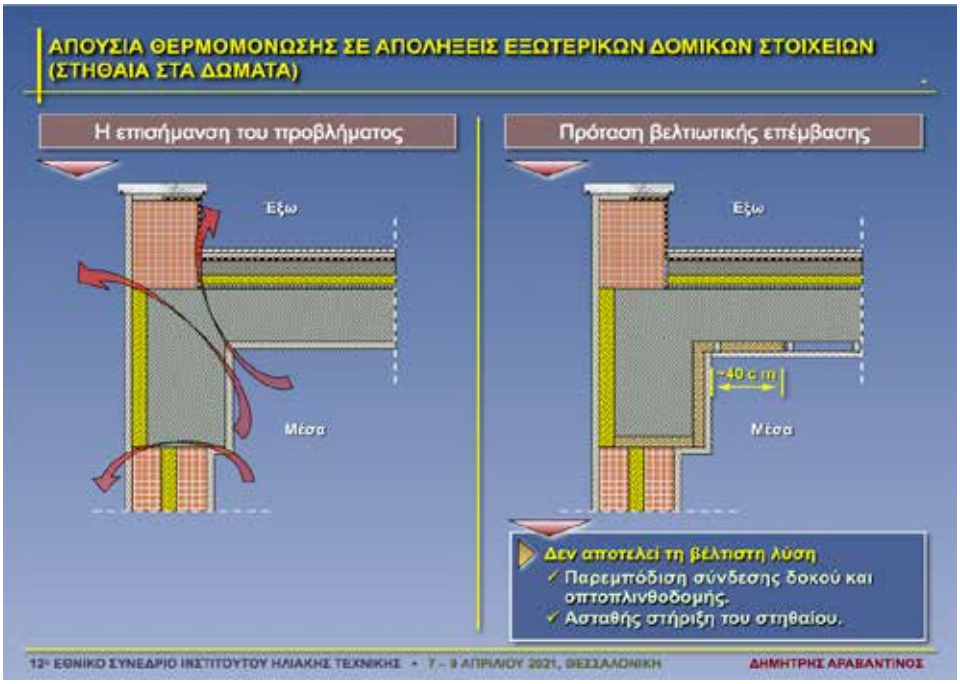

ΠΕΡΙΔΕΣΜΟΙ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ (ΣΕΝΑΖ)
ΣΕ ΔΙΚΕΛΥΦΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ ΜΕ ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΣΗ ΣΤΟΝ ΠΥΡΗΝΑ
Η επισήμανση του προβλήματος
Πρόταση βελτιωτικής επέμβασης
Μη μονωμένος περίδεσμος ενίσχυσης
Έξω
Μέσα
Μονωμένος περίδεσμος ενίσχυσης
Έξω
Μέσα
Έξω
Μέσα
Βέλτιστη λύση
✓ Εξωτερική θερμομονωτική προστασία με ενιαίο κέλυφος αντί για δικέλυφη τοιχοποιία
12ο ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟΥ ΗΛΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ • 7 – 9 ΑΠΡΙΛΙΟΥ 2021, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΑΡΑΒΑΝΤΙΝΟΣ

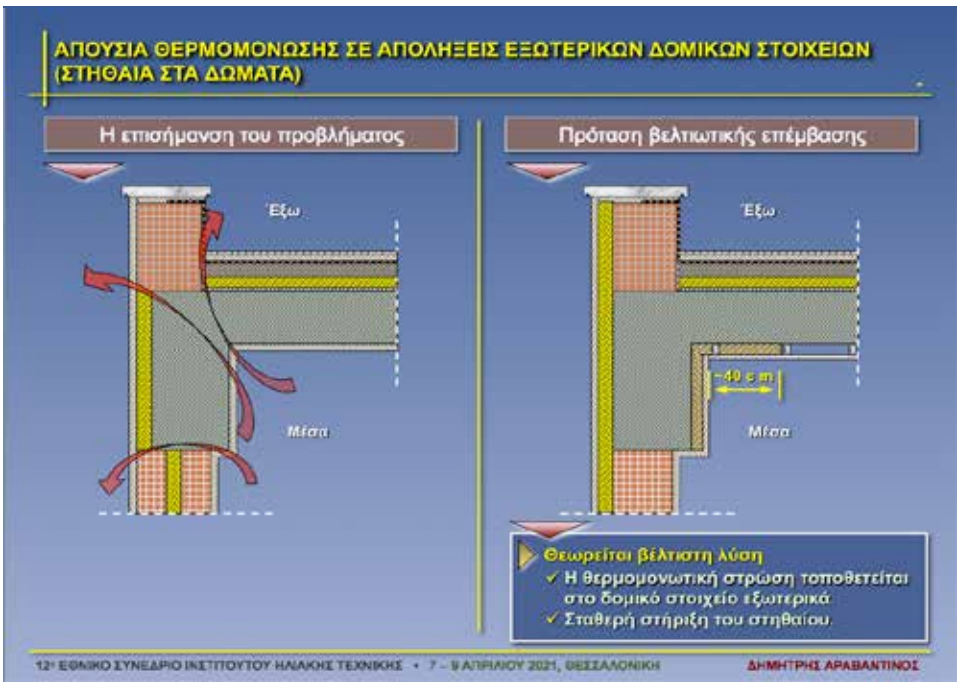

ΔΙΑΚΟΠΗ ΤΗΣ ΣΥΝΕΧΕΙΑΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΤΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ ΣΕ ΘΕΣΗ ΕΓΚΑΡΣΙΑΣ ΣΥΝΑΡΜΟΓΗΣ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΥ ΚΕΛΥΦΟΥΣ ΜΕ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΙΧΟ
Η επισήμανση του προβλήματος
Πρόταση βελτιωτικής επέμβασης
Μέσα
Έξω
Μέσα
Πλήρωση των οπών με πολυουρεθάνη
Μέσα
Έξω
Μέσα
Δεν αποτελεί τη βέλτιστη λύση
✓ Αντιμετωπίζει ικανοποιητικά το πρόβλημα.
✓ Περιορίζει τον ωφέλιμο χώρο.
✓ Απαιτεί κατασκευή με ξηρή δόμηση.
Μέσα
Έξω
Μέσα
Θεωρείται βέλτιστη λύση
✓ Η θερμομονωτική στρώση τοποθετείται στο δομικό στοιχείο εξωτερικά.
12ο ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟΥ ΗΛΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ • 7 – 9 ΑΠΡΙΛΙΟΥ 2021, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΑΡΑΒΑΝΤΙΝΟΣ

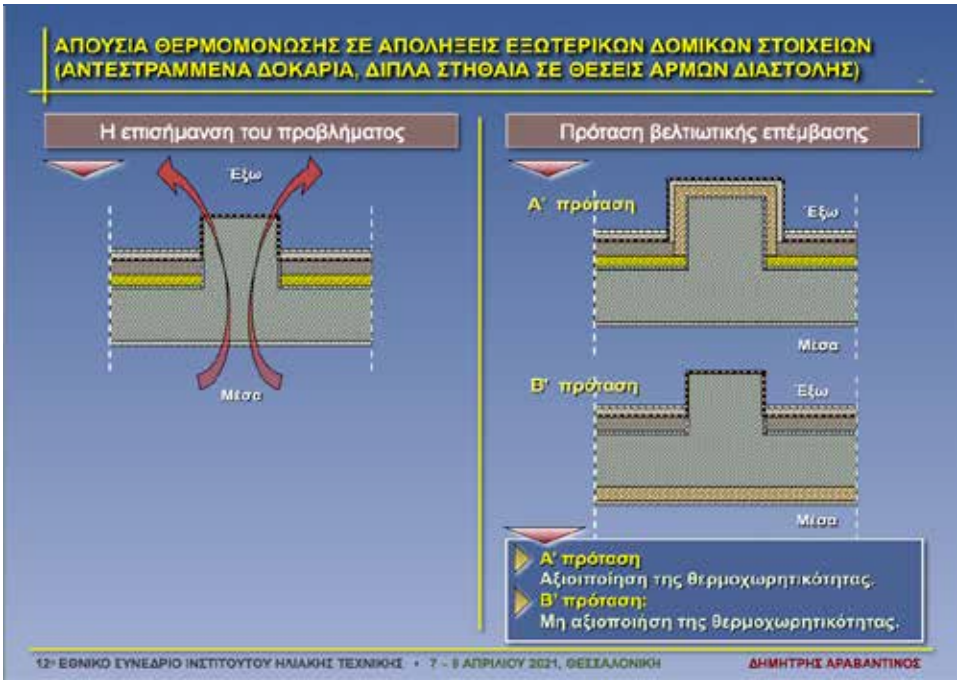

ΔΙΑΚΟΠΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΤΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ ΣΤΙΣ ΠΑΡΑΣΤΑΔΕΣ, ΣΤΑ ΥΠΕΡΘΥΡΑ ΤΩΝ ΑΝΟΙΓΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΤΙΣ ΠΟΔΙΕΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΘΥΡΩΝ
Η επισήμανση του προβλήματος
Πρόταση βελτιωτικής επέμβασης
Έξω
Μέσα
Έξω
Μέσα
Επιφανειακή συμπύκνωση υδρατμών στους λαμπάδες
Μέσα
Έξω
Μέσα
Πρόσθετη θερμομόνωση μικρότερου πάχους στη θέση των παραστάδων
12ο ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟΥ ΗΛΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ • 7 – 9 ΑΠΡΙΛΙΟΥ 2021, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΑΡΑΒΑΝΤΙΝΟΣ

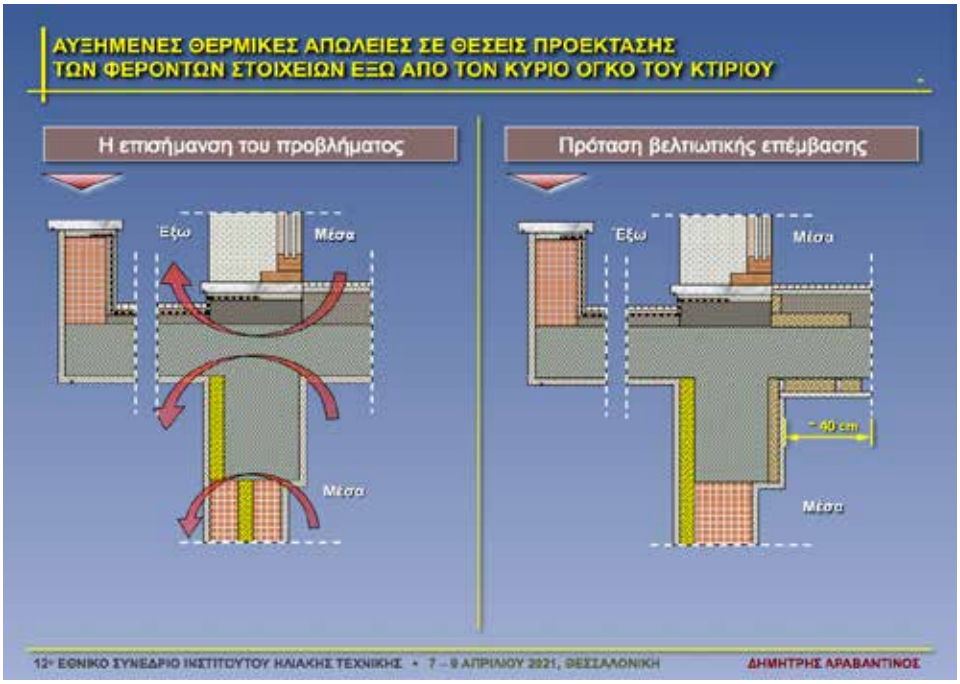

ΑΠΟΥΣΙΑ ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΣΗΣ ΣΕ ΕΝΔΙΑΜΕΣΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΜΕΤΡΙΚΑ ΔΟΚΑΡΙΑ ΣΤΗΝ ΟΡΟΦΗ ΥΠΟΓΕΙΟΥ Ή ΠΙΛΟΤΗΣ
Η επισήμανση του προβλήματος
Μέσα
Έξω
Η θερμοφωτογράφηση καταδεικνύει το μέγεθος των θερμικών απωλειών στη μη μονωμένη δοκό.
12ο ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟΥ ΗΛΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ • 7 – 9 ΑΠΡΙΛΙΟΥ 2021, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΑΡΑΒΑΝΤΙΝΟΣ

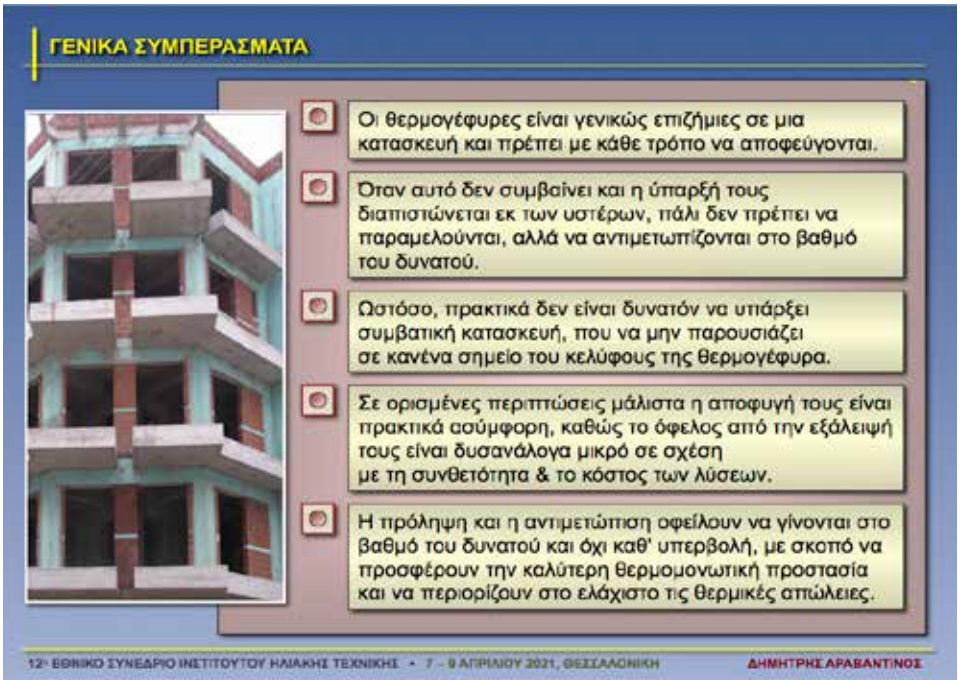

ΑΠΟΥΣΙΑ ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΣΗΣ ΣΕ ΕΝΔΙΑΜΕΣΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΜΕΤΡΙΚΑ ΔΟΚΑΡΙΑ ΣΤΗΝ ΟΡΟΦΗ ΥΠΟΓΕΙΟΥ Ή ΠΙΛΟΤΗΣ
Η επισήμανση του προβλήματος
Μέσα
Έξω
Πρόταση βελτιωτικής επέμβασης
Μέσα
Έξω
Περιμετρική μόνωση της δοκού
12ο ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟΥ ΗΛΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ • 7 – 9 ΑΠΡΙΛΙΟΥ 2021, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΑΡΑΒΑΝΤΙΝΟΣ

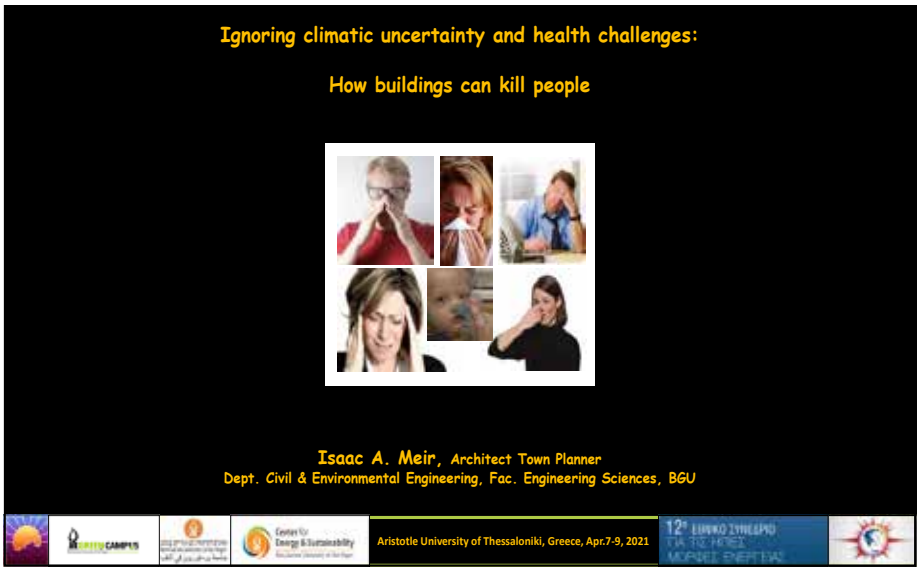

ΑΠΟΥΣΙΑ ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΣΗΣ ΣΕ ΑΠΟΛΗΞΕΙΣ ΕΞΩΤΕΡΙΚΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ
(ΣΤΗΘΑΙΑ ΣΤΑ ΔΩΜΑΤΑ)
Η επισήμανση του προβλήματος
Πρόταση βελτιωτικής επέμβασης
Έξω
Μέσα
~40 cm
Δεν αποτελεί τη βέλτιστη λύση
✓ Παρεμπόδιση σύνδεσης δοκού και οπτοπλινθοδομής.
✓ Ασταθής στήριξη του στηθαίου.
12ο ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟΥ ΗΛΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ • 7 – 9 ΑΠΡΙΛΙΟΥ 2021, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΑΡΑΒΑΝΤΙΝΟΣ


ΑΠΟΥΣΙΑ ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΣΗΣ ΣΕ ΑΠΟΛΗΞΕΙΣ ΕΞΩΤΕΡΙΚΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ
(ΣΤΗΘΑΙΑ ΣΤΑ ΔΩΜΑΤΑ)
Η επισήμανση του προβλήματος
Πρόταση βελτιωτικής επέμβασης
Έξω
Μέσα
~40 cm
Θεωρείται βέλτιστη λύση
✓ Η θερμομονωτική στρώση τοποθετείται στο δομικό στοιχείο εξωτερικά.
✓ Σταθερή στήριξη του στηθαίου.
12ο ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟΥ ΗΛΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ • 7 – 9 ΑΠΡΙΛΙΟΥ 2021, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΑΡΑΒΑΝΤΙΝΟΣ

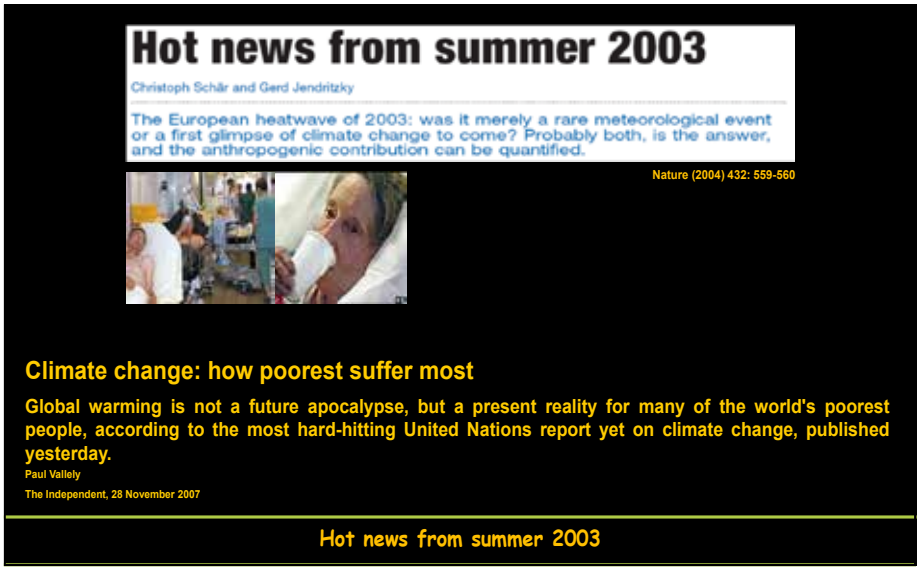

ΑΠΟΥΣΙΑ ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΣΗΣ ΣΕ ΑΠΟΛΗΞΕΙΣ ΕΞΩΤΕΡΙΚΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ
(ΑΝΤΕΣΤΡΑΜΜΕΝΑ ΔΟΚΑΡΙΑ, ΔΙΠΛΑ ΣΤΗΘΑΙΑ ΣΕ ΘΕΣΕΙΣ ΑΡΜΩΝ ΔΙΑΣΤΟΛΗΣ)
Η επισήμανση του προβλήματος
Εξω
Μεσα
Πρόταση βελτιωτικής επέμβασης
Α' πρόταση
Εξω
Μεσα
Β' πρόταση
Εξω
Μεσα
Α' πρόταση
Αξιοποίηση της θερμοχωρητικότητας.
Β' πρόταση:
Μη αξιοποίηση της θερμοχωρητικότητας.
12ο ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟΥ ΗΛΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ • 7 – 9 ΑΠΡΙΛΙΟΥ 2021, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΑΡΑΒΑΝΤΙΝΟΣ


ΑΥΞΗΜΕΝΕΣ ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΣΕ ΘΕΣΕΙΣ ΠΡΟΕΚΤΑΣΗΣ
ΤΩΝ ΦΕΡΟΝΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΕΞΩ ΑΠΟ ΤΟΝ ΚΥΡΙΟ ΟΓΚΟ ΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ
Η επισήμανση του προβλήματος
Εξω
Μεσα
Μεσα
Πρόταση βελτιωτικής επέμβασης
Εξω
Μεσα
~ 40 cm
Μεσα
12ο ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟΥ ΗΛΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ • 7 – 9 ΑΠΡΙΛΙΟΥ 2021, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΑΡΑΒΑΝΤΙΝΟΣ


ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ
Οι θερμογέφυρες είναι γενικώς επιζήμιες σε μια κατασκευή και πρέπει με κάθε τρόπο να αποφεύγονται.
Όταν αυτό δεν συμβαίνει και η ύπαρξή τους διαπιστώνεται εκ των υστέρων, πάλι δεν πρέπει να παραμελούνται, αλλά να αντιμετωπίζονται στο βαθμό του δυνατού.
Ωστόσο, πρακτικά δεν είναι δυνατόν να υπάρξει συμβατική κατασκευή, που να μην παρουσιάζει σε κανένα σημείο του κελύφους της θερμογέφυρα.
Σε ορισμένες περιπτώσεις μάλιστα η αποφυγή τους είναι πρακτικά ασύμφορη, καθώς το όφελος από την εξάλειψή τους είναι δυσανάλογα μικρό σε σχέση με τη συνθετότητα & το κόστος των λύσεων.
Η πρόληψη και η αντιμετώπιση οφείλουν να γίνονται στο βαθμό του δυνατού και όχι καθ' υπερβολή, με σκοπό να προσφέρουν την καλύτερη θερμομονωτική προστασία και να περιορίζουν στο ελάχιστο τις θερμικές απώλειες.
12ο ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟΥ ΗΛΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ • 7 - 9 ΑΠΡΙΛΙΟΥ 2021, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΑΡΑΒΑΝΤΙΝΟΣ


Ignoring climatic uncertainty and health challenges:
How buildings can kill people
Isaac A. Meir, Architect Town Planner
Dept. Civil & Environmental Engineering, Fac. Engineering Sciences, BGU
Aristotle University of Thessaloniki, Greece, Apr.7-9, 2021

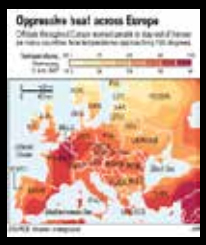
1


Hot news from summer 2003
Christoph Schär and Gerd Jendritzky
The European heatwave of 2003: was it merely a rare meteorological event or a first glimpse of climate change to come? Probably both, is the answer, and the anthropogenic contribution can be quantified.
Nature (2004) 432: 559-560
Climate change: how poorest suffer most
Global warming is not a future apocalypse, but a present reality for many of the world's poorest people, according to the most hard-hitting United Nations report yet on climate change, published yesterday.
Paul Vallely
The Independent, 28 November 2007
Hot news from summer 2003

2

[…] most of those who died in the August heat wave in France were senior citizens […] most of these elderly victims were women […] most of the victims lived in small (often less than 100 square feet) apartments on the upper floors of Paris's many Haussmann-era buildings. There, without air-conditioning or even adequate cross-ventilation, they became dehydrated and disoriented in the stifling heat […] many were so isolated in these buildings that their bodies were not discovered until days or even weeks after they had died – when more prosperous tenants returned home from their August vacations.

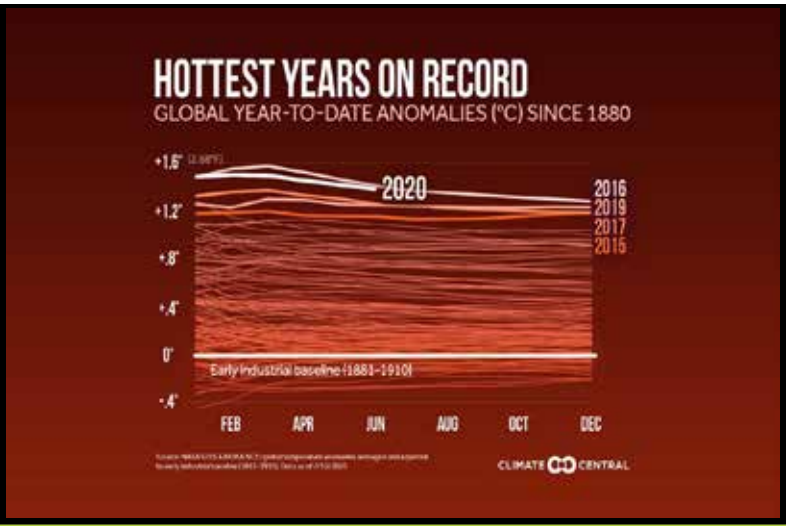
It was the combination of these social, architectural, and cultural factors, Keller argues, that made the meteorological event – the three-week August heat wave – so lethal. But in the post-mortem reports on the heat wave, Keller says, the larger failings of the system were transcribed as unforeseeable contingencies and individual culpabilities. Not a successful strategy for meeting the challenge of climate change, which makes such heat waves more likely.



Michael Svoboda, *Science*, August 27, 2015, New analysis of '03 fatal Paris heat wave. Yale Climate Connections.

The dynamics of disaster – trying to explain excess mortality
France: 15k death cases more than the yearly average for the month of August alone

3

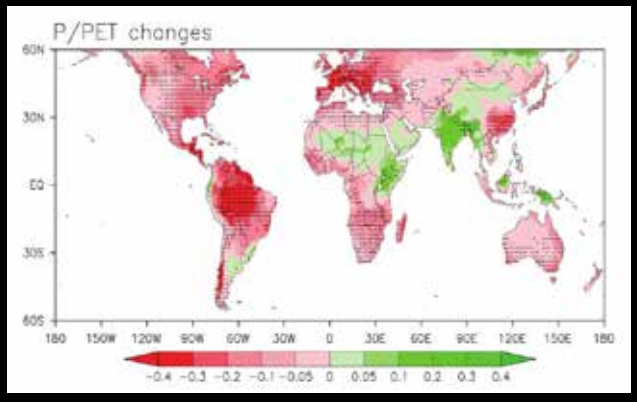


The summer 2003 long surpassed, 2016 the hottest on record, 2020 second hottest

4

Climatic uncertainty, extremes, exacerbation

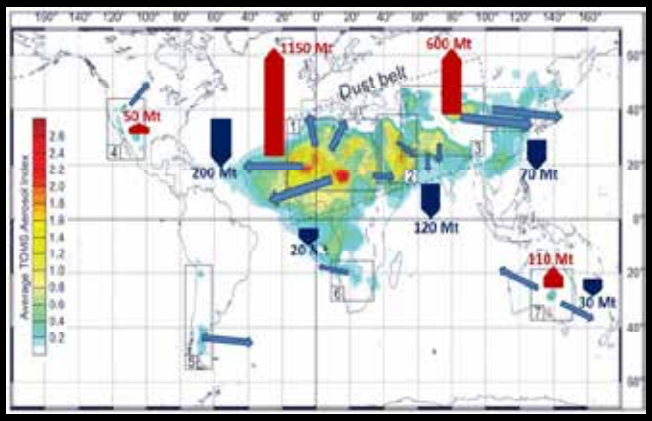
8



http://inwrdam.org.jo/2020/05/desertification/

Climatic uncertainty, extremes, exacerbation – aridization, desertification

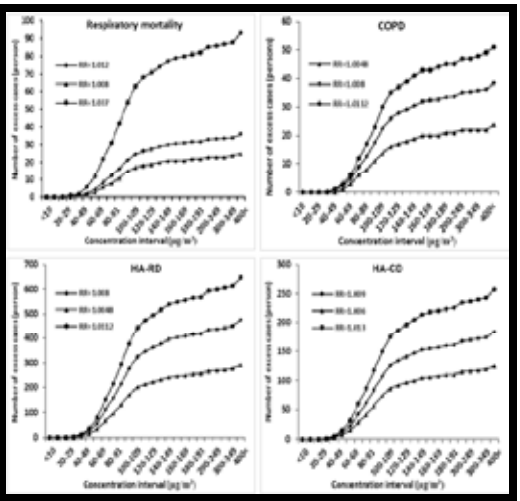
9



Middleton N, Kang U. Sand and Dust Storms: Impact Mitigation. *Sustainability*. 2017; 9(6):1053.

Climatic uncertainty, extremes, exacerbation – intensification of dust/sand storms

10



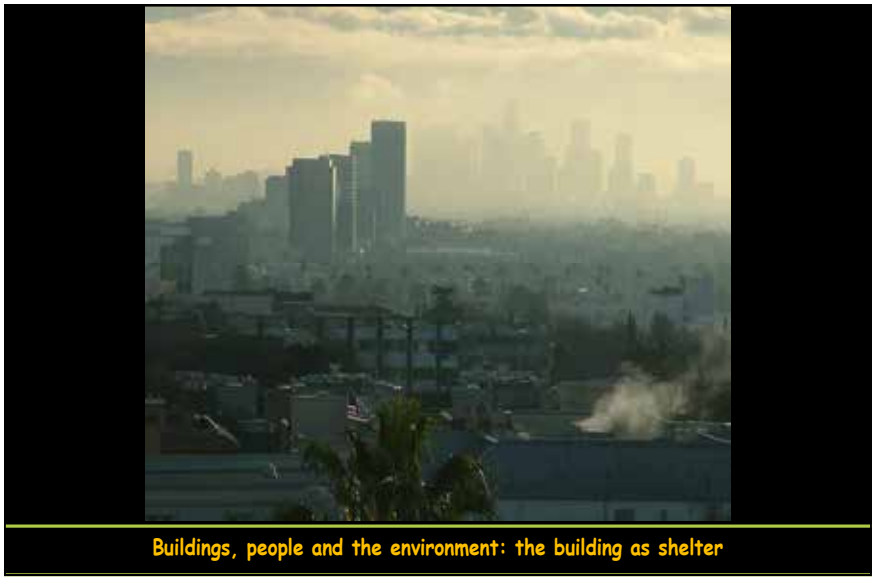
Goudarzi, G., Daryanoosh, S.M., Godini, H., Hopke, P.K., Sicard, P., De Marco, A., Rad, H.D., Harbizadeh, A., Jahedi, F., Mohammadi, M.J., Savari, J., Sadeghi, S., Kaabi, Z., Omidi Khaniabadi, Y. (2017) Health risk assessment of exposure to the Middle-Eastern dust storms in the Iranian megacity of Kermanshah. Public Health 148: 109-116.

Relationship between the number of health effects and PM10 concentration interval. COPD, chronic obstructive pulmonary disease; HA-RD, hospital admissions for respiratory disease; HA-CVD, hospital admissions for cardiovascular diseases.

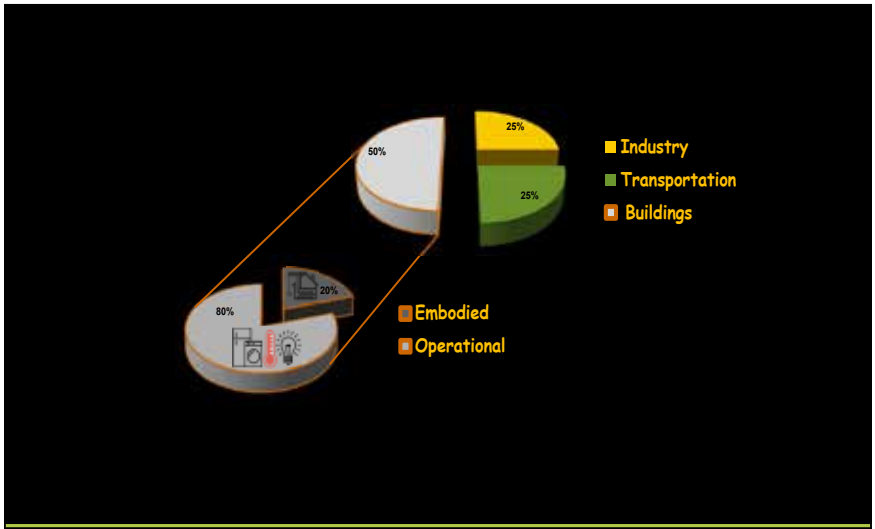
11

12. 11. 2002
Climatic uncertainty, extremes, exacerbation – intensification of dust/sand storms

12

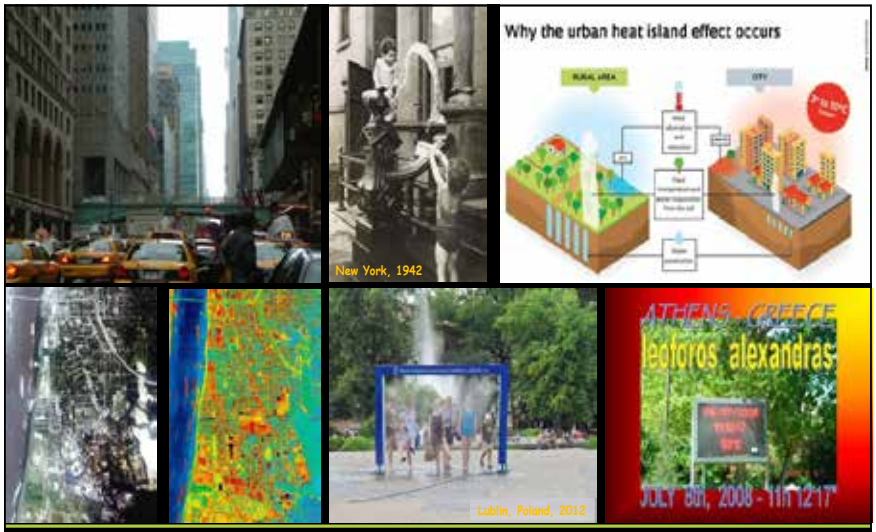

Buildings, people and the environment: the building as shelter

13



Buildings are responsible for 50% of the overall energy used in OECD countries

14



Dense urban development exacerbates the Urban Heat Island (UHI) effect

15

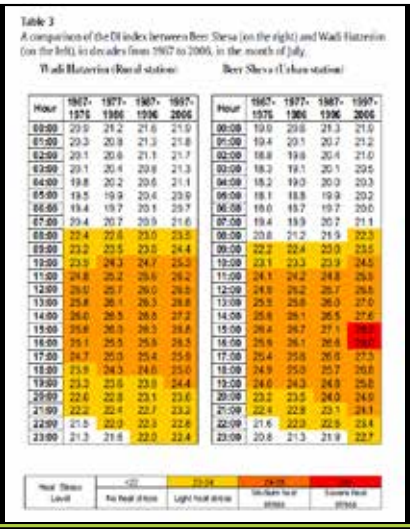


Table 3
A comparison of the DI index between Beer Sheva (on the right) and Wadi Hatzeiva (on the left), in decades from 1967 to 2006, in the month of July.

Wadi Hatzeiva (Rural station)

Hour	1967-1976	1977-1986	1987-1996	1997-2006
00:00	20.9	21.2	21.6	21.9
01:00	20.3	20.8	21.3	21.8
02:00	20.1	20.6	21.1	21.7
03:00	20.1	20.4	20.8	21.3
04:00	19.8	20.2	20.6	21.1
05:00	19.5	19.9	20.4	20.9
06:00	19.4	19.7	20.1	20.7
07:00	20.4	20.7	20.9	21.6
08:00	22.4	22.6	23.0	23.5
09:00	23.2	23.5	23.9	24.4
10:00	23.9	24.3	24.7	25.2
11:00	24.8	25.2	25.6	26.2
12:00	25.5	25.7	26.0	26.5
13:00	25.8	26.1	26.3	26.8
14:00	26.0	26.3	26.6	27.2
15:00	25.8	26.0	26.3	26.8
16:00	25.1	25.5	25.8	26.3
17:00	24.7	25.0	25.4	25.9
18:00	23.9	24.3	24.6	25.0
19:00	23.3	23.6	23.9	24.4
20:00	22.6	22.8	23.1	23.6
21:00	22.2	22.4	22.7	23.2
22:00	21.5	22.0	22.3	22.8
23:00	21.3	21.6	22.0	22.4

Beer Sheva (Urban station)

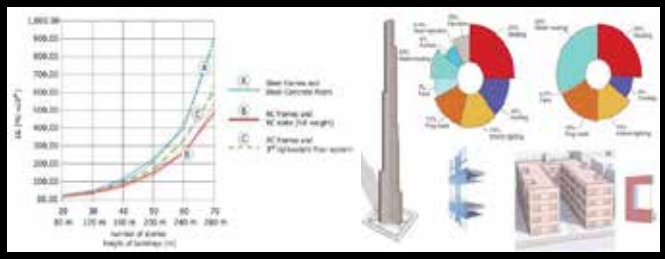
Hour	1967-1976	1977-1986	1987-1996	1997-2006
00:00	19.0	20.6	21.3	21.9
01:00	19.4	20.1	20.7	21.2
02:00	18.8	19.6	20.4	21.0
03:00	18.3	19.1	20.1	20.5
04:00	18.2	19.0	20.0	20.3
05:00	18.1	18.8	19.9	20.2
06:00	18.0	18.7	19.7	20.0
07:00	19.4	19.9	20.7	21.1
08:00	20.8	21.2	21.9	22.3
09:00	22.2	22.4	23.0	23.5
10:00	23.1	23.3	23.9	24.5
11:00	24.1	24.2	24.8	25.5
12:00	24.8	25.2	25.7	26.5
13:00	25.5	25.8	26.0	27.0
14:00	25.8	26.1	26.5	27.6
15:00	26.4	26.7	27.1	28.0
16:00	25.6	26.1	26.6	28.0
17:00	25.4	25.8	26.0	27.3
18:00	24.9	25.3	25.7	26.8
19:00	24.6	24.3	24.8	25.8
20:00	23.2	23.5	24.0	24.9
21:00	22.4	22.8	23.1	24.1
22:00	21.6	22.0	22.5	23.4
23:00	20.8	21.3	21.9	22.7

Potchter & Itzhak Ben-Shalom (2013) Urban warming and global warming: Combined effect on thermal discomfort in the desert city of Beer Sheva, Israel. J. Arid Environments 98: 113-122

Temperature min., RH min. rise / wind drop

16

Tall vs Short Bldgs



Embodied Energy (EE)

70 stories Steel frames: 900 x 10^6 MJ
20 stories RC frames/slabs: 10 x 10^6 MJ
70 stories RC frames/slabs: 500 x 10^6 MJ

Operational Energy (OE)

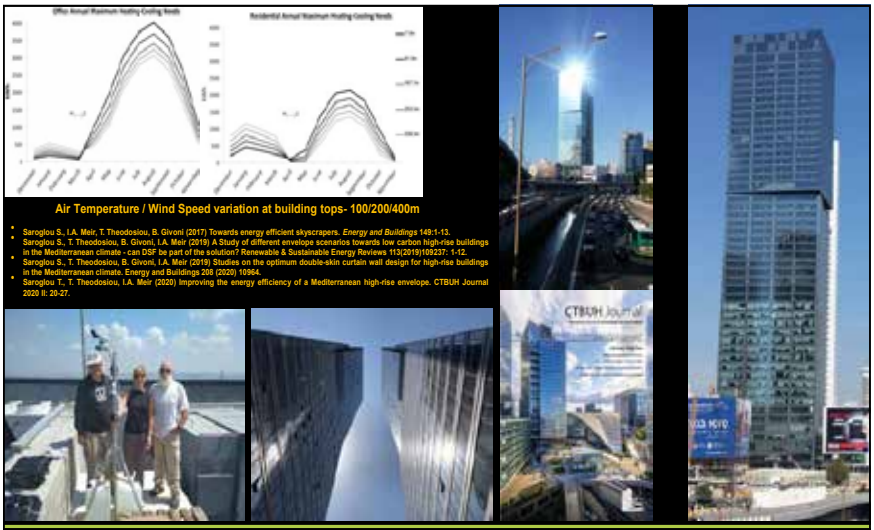
215 STOREY: 196kWh/m²/yr
4 STOREY courtyard: 103kWh/m²/yr

Drew et al. The Environmental Impact of Tall vs Small: A Comparative Study, Int. J. High Rise Build. 4 (2015) 109–116

The Shard, UK, 310m
Burj Khalifa, Dubai, 828m
Jeddah Tower, S.Arabia, 1,000m

The taller the building the more Embodied (EE) and Operational Energy (OE) it uses

17


Air Temperature / Wind Speed variation at building tops- 100/200/400m
Saroglou S., I.A. Meir, T. Theodosiou, B. Givoni (2017) Towards energy efficient skyscrapers. Energy and Buildings 149:1-13.
Saroglou S., T. Theodosiou, B. Givoni, I.A. Meir (2019) A Study of different envelope scenarios towards low carbon high-rise buildings in the Mediterranean climate - can DSF be part of the solution? Renewable & Sustainable Energy Reviews 113(2019)109237: 1-12.
Saroglou S., T. Theodosiou, B. Givoni, I.A. Meir (2019) Studies on the optimum double-skin curtain wall design for high-rise buildings in the Mediterranean climate. Energy and Buildings 208 (2020) 109664.
Saroglou T., T. Theodosiou, I.A. Meir (2020) Improving the energy efficiency of a Mediterranean high-rise envelope. CTBUH Journal 2020 II: 20-27.
Tall buildings are exposed to climate changing with altitude, need differential energy input

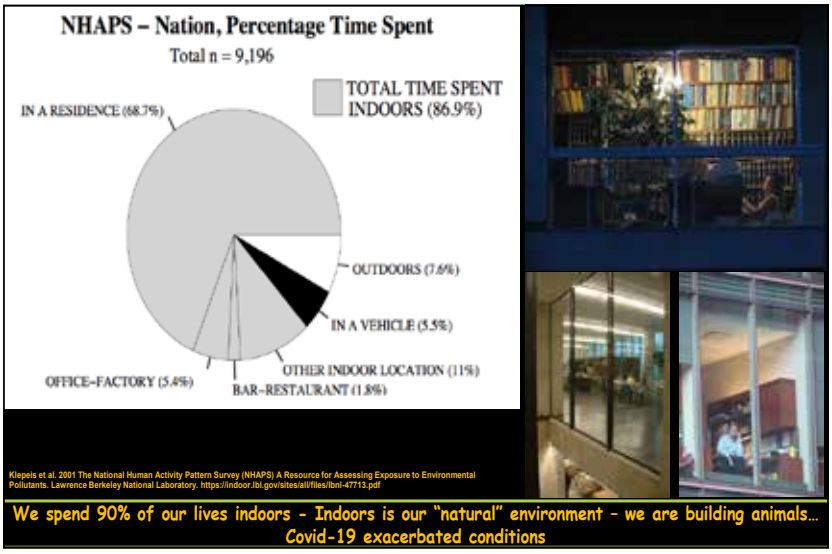
18

So let's focus – mainly – on newer and taller buildings

19

YOU'RE PROBABLY INDOORS MUCH MORE THAN YOU THINK
So, what happens because of and inside buildings affects our daily lives, wellbeing, health and productivity!
We spend 90% of our lives indoors - The Indoor Generation Survey, May 14, 2018

20


NHAPS – Nation, Percentage Time Spent
Total n = 9,196
TOTAL TIME SPENT INDOORS (86.9%)
IN A RESIDENCE (68.7%)
OUTDOORS (7.6%)
IN A VEHICLE (5.5%)
OTHER INDOOR LOCATION (11%)
OFFICE–FACTORY (5.4%)
BAR–RESTAURANT (1.8%)
Klepeis et al. 2001 The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS) A Resource for Assessing Exposure to Environmental Pollutants. Lawrence Berkeley National Laboratory. https://indoor.lbl.gov/sites/all/files/lbnl-47713.pdf
We spend 90% of our lives indoors - Indoors is our "natural" environment – we are building animals…
Covid-19 exacerbated conditions

21

We spend 90% of our lives indoors - Indoors is our "natural" environment – we are building animals…
Covid-19 exacerbated conditions

22

Thermal Comfort

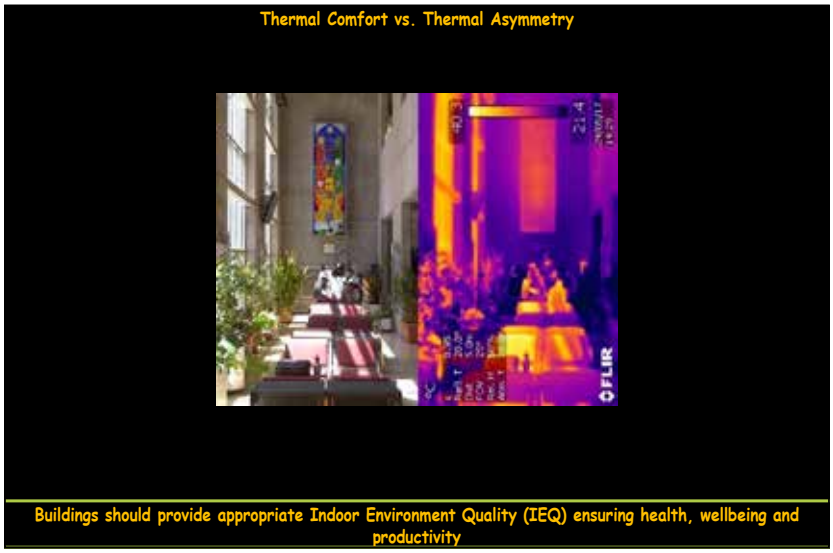
Prof. Michael Humphreys, OBU

Human Thermal Sensation (HTS) is a complex, non-linear, wide-ranging and intelligent behavioral response to climate, affected by a roster of factors, which, on par with heat regulation physiology and clothing insulation, also comprise such elements as mood, personality, culture and other individual, organizational and social peculiarities.

Neutrality is NOT necessarily to be equated with comfort!

Buildings should provide appropriate Indoor Environment Quality (IEQ) ensuring health, wellbeing and productivity

23

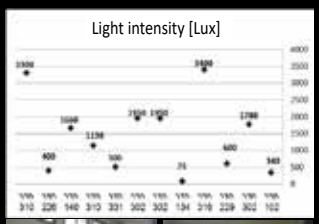

Thermal Comfort vs. Thermal Asymmetry
FLIR
Buildings should provide appropriate Indoor Environment Quality (IEQ) ensuring health, wellbeing and productivity

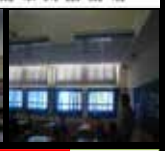
24

Visual Comfort
Buildings should provide appropriate Indoor Environment Quality (IEQ) ensuring health, wellbeing and productivity

25

Visual Comfort vs. Light Asymmetry



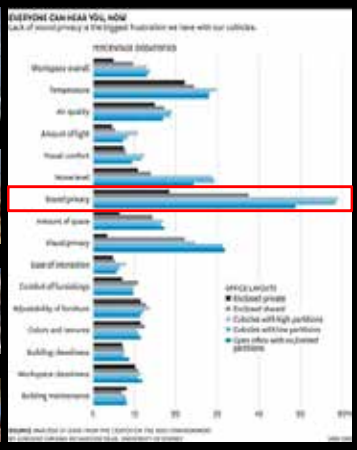


Wind velocity [m/sec]	Noise [dB]	Light intensity [Lux]	RH [%]	T_a [°C]	
0	78.1	1661	68.8	29.5	max
0	45	137	39	24.6	min
0	63.6	659.15	48.55	26.645	average

Buildings should provide appropriate Indoor Environment Quality (IEQ) ensuring health, wellbeing and productivity

26

Acoustic Comfort



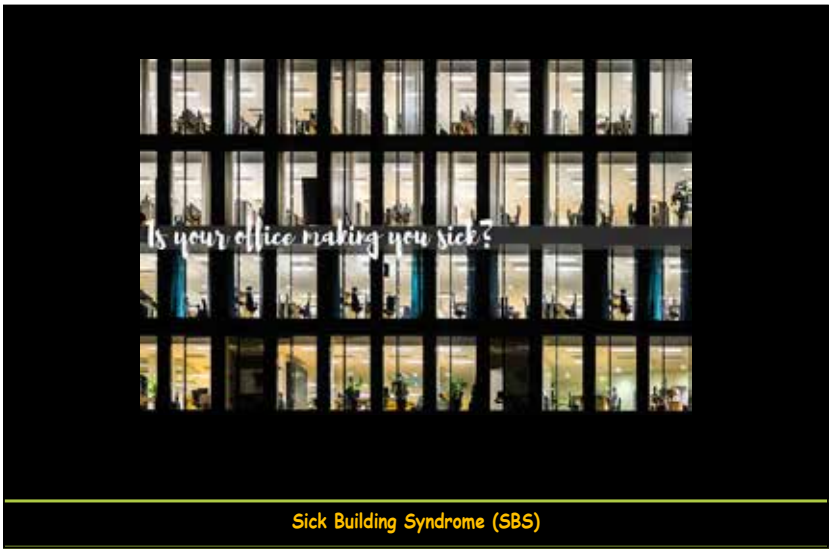
Jungsoo Kim & Richard De Dear, Center on the Built Environment, U. Sydney

Buildings should provide appropriate Indoor Environment Quality (IEQ) ensuring health, wellbeing and productivity

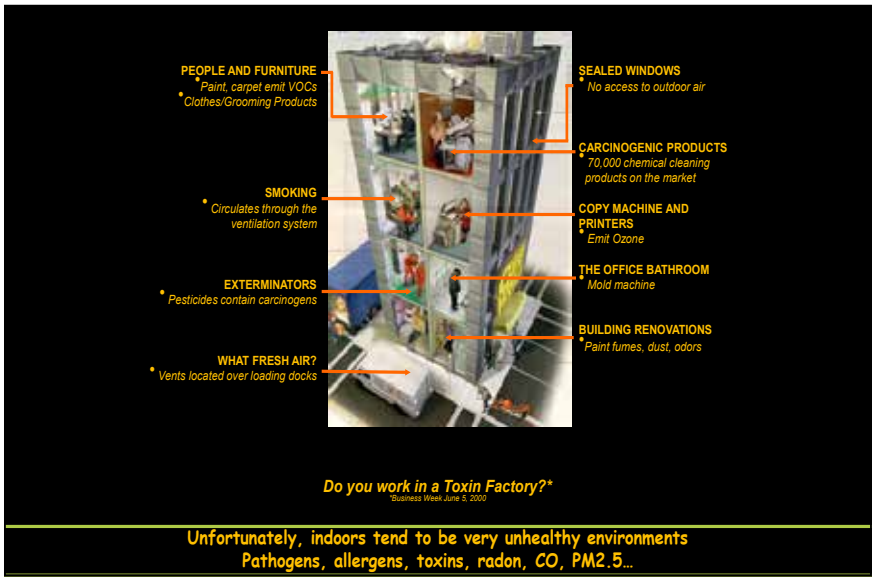
27

IAQ vs Health
16 Causes of Indoor Air Pollution
DANGER
RADON GAS
Unfortunately, indoors tend to be very unhealthy environments
Pathogens, allergens, toxins, radon, CO, PM2.5…

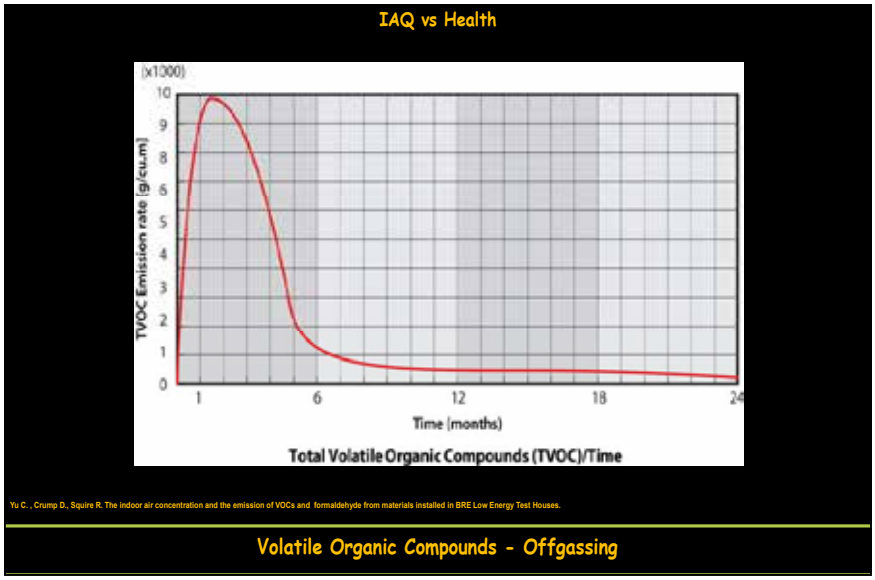
28


Is your office making you sick?
Sick Building Syndrome (SBS)

29


PEOPLE AND FURNITURE
Paint, carpet emit VOCs
Clothes/Grooming Products
SMOKING
Circulates through the ventilation system
EXTERMINATORS
Pesticides contain carcinogens
WHAT FRESH AIR?
Vents located over loading docks
SEALED WINDOWS
No access to outdoor air
CARCINOGENIC PRODUCTS
70,000 chemical cleaning products on the market
COPY MACHINE AND PRINTERS
Emit Ozone
THE OFFICE BATHROOM
Mold machine
BUILDING RENOVATIONS
Paint fumes, dust, odors
Do you work in a Toxin Factory?*
*Business Week June 5, 2000
Unfortunately, indoors tend to be very unhealthy environments
Pathogens, allergens, toxins, radon, CO, PM2.5…

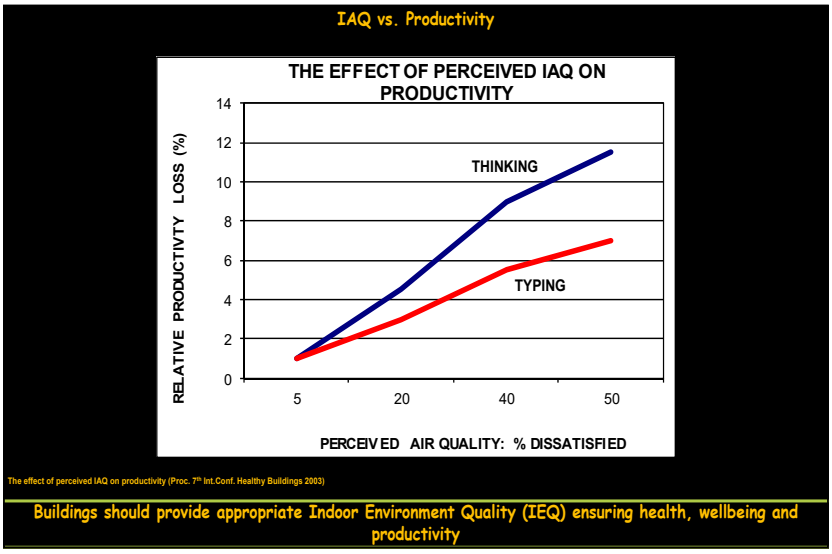
30


IAQ vs Health
(x1000)
TVOC Emission rate (g/cu.m)
10
9
8
6
5
4
3
2
1
0
1
6
12
18
Time (months)
Total Volatile Organic Compounds (TVOC)/Time
Yu C., Crump D., Squire R. The indoor air concentration and the emission of VOCs and formaldehyde from materials installed in BRE Low Energy Test Houses.
Volatile Organic Compounds - Offgassing

31

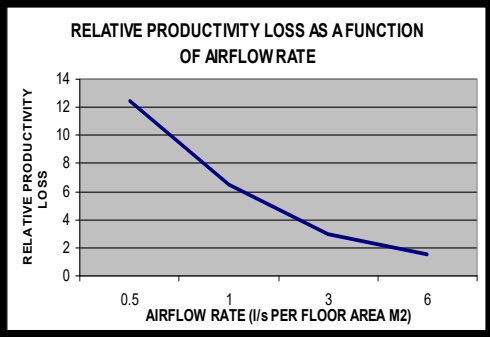
Production-to-supply all indoor finish materials and furniture must be stored in ventilated hangars for 6 months.
DR, Danish Broadcasting Corporation, Copenhagen, Denmark

32


IAQ vs. Productivity
THE EFFECT OF PERCEIVED IAQ ON PRODUCTIVITY
RELATIVE PRODUCTIVITY LOSS (%)
14
12
10
8
6
4
2
0
THINKING
TYPING
5
20
40
50
PERCEIVED AIR QUALITY: % DISSATISFIED
The effect of perceived IAQ on productivity (Proc. 7th Int.Conf. Healthy Buildings 2003)
Buildings should provide appropriate Indoor Environment Quality (IEQ) ensuring health, wellbeing and productivity

33

IAQ vs. Productivity



Insufficient fresh air supply = Pollutant concentration / Less O_2 for the brain = Low IEQ = Compromised tenant wellbeing = Productivity loss / Potential mid/long term health issues

Buildings should provide appropriate Indoor Environment Quality (IEQ) ensuring health, wellbeing and productivity

34

Psychological Comfort

Buildings should provide appropriate Indoor Environment Quality (IEQ) ensuring health, wellbeing and productivity

35

Safety

Grenfell Tower, Kensington, UK (June 14, 2017) 71 residents suffocated or burned alive. Inquiry revealed cladding failed safety tests, but the construction company saved £5,000.

Buildings should provide appropriate Indoor Environment Quality (IEQ) ensuring health, wellbeing and productivity

36

"… the architectural gap, or abyss, as it exists between those who design and those who use the 20th century's buildings …"

Ada Louise Huxtable (née Landman; March 14, 1921 – Jan.7, 2013). Architecture critic, writer

37

"Dwellings are built to serve a variety of functions, but one of the most important is to create living conditions that are acceptable to their occupiers, particularly in relation to the prevailing climates."

Κτήρια χτίζονται για να εξυπηρετήσουν διάφορες ανάγκες, αλλά μια από τις πιο σημαντικές είναι η δημιουργία συνθηκών διαβίωσης που να είναι αποδεκτές από τους χρήστες, κυρίως σε σχέση με το επικρατούν κλίμα.

Paul Oliver (2003)
Dwellings

A closing word about buildings, the environment and people

38

κτήρια
+
άνθρωποι
+
επιβίωση

= καταφύγιο, άσυλο!

And remember – it's all about buildings, and people, and survivability – thus, shelter

39

ΒΙΟΜΑΖΑ-ΥΔΡΟΓΟΝΟ

ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΣΩΜΑΤΩΜΑΤΩΝ ΒΙΟΜΑΖΑΣ (PELLET) ΟΙΚΙΑΚΗΣ ΧΡΗΣΗΣ

Στέλλα Μαργιώρου[1*], Ιωάννης Μπαρμπούτης[1]

[1]Τμήμα Δασολογίας και Φυσικού Περιβάλλοντος, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
*e-mail: margiors@for.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το ξύλο αποτελεί μία από τις πιο σημαντικές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) και χρησιμοποιείται ως καύσιμο από τότε που ανακαλύφθηκε η φωτιά από τον άνθρωπο .Μία σύγχρονη μορφή ενεργειακής αξιοποίησής του ξύλου αποτελούν τα συσσωματώματα (πέλλετ). Τις τελευταίες δεκαετίες λόγω της αυστηρής πολιτικής για την μείωση των εκπομπών των αέριων του θερμοκηπίου και την προσπάθεια για αποτροπή της κλιματικής αλλαγής παρουσιάστηκε αύξηση της χρήσης των πέλλετ, η οποία δημιούργησε την ανάγκη ταξινόμησής τους σε ποιοτικές κατηγορίες. Η τυποποίηση των προϊόντων και η εκπόνηση προτύπων διασφαλίζει τους καταναλωτές στην επιλογή της κατάλληλης ποιότητας για βέλτιστη και ασφαλή χρήση. Ο σημαντικότερος φορέας που ασχολείται με την έκδοση προτύπων που αφορούν τα στερεά βιοκαύσιμα είναι η Τεχνική Επιτροπή ΤC 238 του Διεθνή Οργανισμού Τυποποίησης ISO. Τα πιστοποιητικά των πέλλετ που χρησιμοποιούνται σε μεγάλη κλίμακα είναι το ευρωπαϊκό ENplus™, το αμερικάνικο PFI και το καναδικό CANplus™. Την τελευταία δεκαετία αυξήθηκε κατά 69% η παραγωγή πιστοποιημένων πέλλετ κατά ENplus™, ξεπερνώντας τους 13 εκατομμύρια τόνους πιστοποιημένων προϊόντων. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η ανασκόπηση των προτύπων καθώς και η ανάλυση και σύγκριση των πιστοποιητικών που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή συσσωματωμάτων (pellet) οικιακής χρήσης.

Λέξεις Κλειδιά: *ENplus™,ISO 17225:2014, πρότυπα, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, βιομάζα*

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το ξύλο χρησιμοποιείται ως καύσιμο από τότε που ανακαλύφθηκε η φωτιά από τον άνθρωπο [1].Στη Μεσοποταμία μέσω αρχαιολογικών ανασκαφών έχουν ανακαλυφθεί κλίβανοι (tannour-oven) από τα τέλη του 4000 π.Χ., οι οποίοι χρησιμοποιούνταν για το ψήσιμο ψωμιού [2]. Το 2000 π.Χ. οι κλίβανοι αυτοί εξελίχθηκαν και εμφανίζεται η χρήση καμινάδων [3]. Στη σύγχρονη ιστορία, το 1744 σημαντική ανακάλυψη αποτελεί η σιδερένια ξυλόσομπα "Franklin" η οποία συνέχιζε να παράγει θερμότητα ακόμα και μετά το τέλος της καύσης. Η κατασκευή αυτή βελτιώθηκε, το 1772 από τον David Ritterhouse, ο οποίος πρόσθεσε μία σωλήνα σχήματος "L" έτσι ώστε ο καπνός να οδηγείται σε μία καμινάδα και εξωτερικά της οικίας [3,4]. Τον 19^0 αιώνα ένα μεγάλο μέρος της καύση του ξύλου, για θερμαντικούς σκοπούς, αντικαταστάθηκε από την καύση γαιανθράκων [3]. Η αλλαγή αυτή ανατράπηκε την δεκαετία του 1970 όπου η πετρελαϊκή κρίση αύξησε τη ζήτηση για εναλλακτικές πηγές καυσίμων [5]. Την ίδια δεκαετία σημειώνεται η εμφάνιση των συσσωματωμάτων βιομάζας(pellet) και της πρώτης σόμπας καύσης πέλλετ για βιομηχανική χρήση (1973). Η ονομασία πέλλετ προέρχεται από τη λατινική ρίζα "pila" που σήμαινε σφαιρίδιο, η λατινική ρίζα τροποποιήθηκε στην παλαιά γαλλική γλώσσα ως "pelote" που σήμαινε μεταλλικό σφαιρίδιο, για να καταλήξει στην σύγχρονη ονομασία της αγγλικής"pellet" όπου χρησιμοποιείται για την περιγραφή συσσωματωμάτων βιομάζας κυλινδρικού σχήματος [6]. Είναι κατανοητό ότι η χρήση της λέξης στο σύγχρονο κόσμο διαφέρει από την αρχική ετυμολογία της ρίζας. Μια δεκαετία αργότερα, από την εμφάνιση της σόμπας πέλλετ για βιομηχανική χρήση (1983), οι σόμπες πέλλετ διατίθενται στην αγορά για οικιακή χρήση. Όμως η αύξηση της χρήσης των σομπών, από το ευρύ κοινό, ξεκίνησε την δεκαετία του 1990, όπως θα αναλυθεί παρακάτω [3,5]. Λίγα χρόνια αργότερα (1988) εκδίδεται, από το Environmental Protection Agency (EPA) το πρώτο πρότυπο για τις εκπομπές αερίων από τις σόμπες, το οποίο επέτρεπε την τιμή 8,5g/h, υποχρεώνοντας έτσι τους παραγωγούς να βελτιώσουν την κατασκευή των σομπών. Σύμφωνα με το ισχύον πρότυπο η παραπάνω τιμή ανέρχεται σε 2-2,5 g/h [7,8].

Η αύξηση της ζήτησης των πέλλετ στην αγορά της Ευρώπης παρατηρήθηκε την δεκαετία του '90 κυρίως στη Σουηδία, Δανία και Αυστρία σε αντίθεση με την Βόρεια Αμερική όπου η αύξηση της ζήτησης παρατηρήθηκε νωρίτερα την δεκαετία του '80 [9].Βασικός παράγοντας που βοήθησε την αγορά των πέλλετ αποτελεί το συνέδριο για την κλιματική αλλαγή των Ηνωμένων Εθνών το 1997 στην Ιαπωνία, όπου τα κράτη συμφώνησαν στην μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου κατά 5,2% μέχρι το 2012 [9-10].

Η συνεχής αύξηση των απαιτήσεων για ενέργεια με μειωμένες εκπομπές αέριων του θερμοκηπίου (CO_2, N_2Oκαι CH_4), οι Ευρωπαϊκές οδηγίες RED-1 (2009/28/EC) RED-2 (2018/2001/EC), η Συμφωνία του Παρισιού το 2016 και οι Ευρωπαϊκές πολιτικές για την κλιματική αλλαγή συνετέλεσαν στην αύξηση της χρήσης βιομάζας και κατ' επέκταση στην κίνηση της αγοράς των πέλλετ [11-14]. Στη Σουηδία την περίοδο από το 2001 έως το 2007 η παραγωγή των πέλλετ αυξήθηκε κατά 260% με αποτέλεσμα η ετήσια παραγωγή να αυξηθεί κατά 708.000 τόνους. Μέχρι τα τέλη του 2006 στην Ευρώπη καταγράφηκαν 285 επιχειρήσεις παραγωγής πέλλετ με μέση παραγωγή 20.000 τόνου ανά έτος [15]. Από το 2006 μέχρι το 2012 η παγκόσμια παραγωγή των πέλλετ αυξήθηκε από 7 εκατομμύρια τόνους σε 19 εκατομμύρια [12,16,17]. Το 2012 η Ιταλία κατανάλωσε 2 εκατομμύρια τόνους πέλλετ για οικιακή χρήση, καθιστώντας την τον μεγαλύτερο καταναλωτή της Ευρώπης [14]. Το μεγαλύτερο ποσοστό της παραγωγής και της κατανάλωσης των πέλλετ γίνεται στην Ευρώπη και την Βόρεια Αμερική [12,13,16,17].Την περίοδο 2015-2016 ο Καναδάς παρουσιάζει αύξηση των εξαγωγών του κατά 0,8 τόνους και στην λίστα των καταναλωτών προστίθενται χώρες της νοτιοανατολικής Ευρώπης και Ασίας [18].

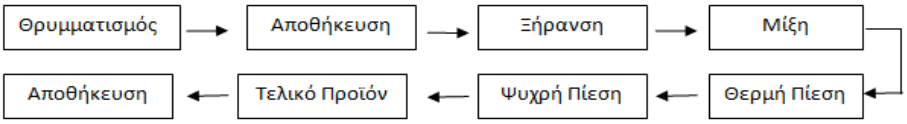
Η συνεχής ενδυνάμωση της αγοράς πέλλετ σε αντίθεση με άλλα βιοκαύσιμα παρατηρείται λόγω συγκεκριμένων πλεονεκτημάτων που διαθέτουν: i.ευκολία αποθήκευσης και ανθεκτικότητα, ii.διάφορα μεγέθη συσκευασίας,iii.διατήρηση ποιότητας αν παραμείνουν στεγνά, iv.γρήγορη ανάφλεξη λόγω του μεγέθους τους και v.τιμές ανταγωνιστικές του πετρελαίου [19]. Σε σχέση με άλλα καύσιμα θέρμανσης παρατηρείται ότι η θερμαντική αξία είναι χαμηλότερη. Τα πέλλετ οικιακής χρήσης έχουν θερμαντική αξία 3942-4400 Kcal/kg [20,21], ενώ το ξηρό ξύλο 4418-5016 Kcal/kg, ο άνθρακας 5565-5947 Kcal/kg, το πετρέλαιο 9554-10103 Kcal/kg [22] και το φυσικό αέριο 9078-12470 Kcal/kg [23,24]. Η μέτρηση των καθαρών εκπομπών CO_2 από την καύση για οικιακή θέρμανση πέλλετ υπολογίζεται σε 135g/kWh, του φυσικού αερίου 267 g/kWh,του πετρελαίου 357 g/kWh και του άνθρακα 414 g/kWh, που υποδηλώνει τη μεγάλη επιβάρυνση στο περιβάλλον των άλλων καυσίμων σε σχέση με τα πέλλετ [25]. Αντίστοιχες μετρήσεις εκπομπών CO_2 των καυστήρων, όπου καυστήρες πέλλετ εκπέμπουν 22.000 g/kWh, πετρελαίου 267.837 g/kWh και φυσικού αερίου 233.582 g/kWh [26], παρουσιάζουν ακόμα μεγαλύτερη

επιβάρυνση στο περιβάλλον. Συγκρίνοντας οικονομικούς και περιβαλλοντικούς παράγοντες είναι αντιληπτή η αύξηση της χρήσης των πέλλετ για θερμαντικούς σκοπούς.

Με στόχο την διασφάλιση της ποιότητας, την προστασία των καταναλωτών και την ελεύθερη ροή της παγκόσμιας αγοράς εισαγωγών–εξαγωγών δημιουργήθηκε η ανάγκη έκδοσης προτύπων και κατ' επέκταση πιστοποιητικών για τα πέλλετ, ώστε να αποτελούν ένα τυποποιημένο προϊόν που θα φέρει πιστοποίηση. Η τυποποίηση μέσω των προτύπων αποσκοπεί στην εξάλειψη των εμποδίων στις συναλλαγές με την θέσπιση ενιαίων εννοιών, ελέγχων και ασφαλέστερων προϊόντων [27]. Η ποιότητα των συσσωματωμάτων (πέλλετ) συνδέεται άμεσα με τις μηχανικές, φυσικές και χημικές ιδιότητές τους καθώς και με τις εκπομπές αερίων που προκύπτουν από την καύση τους [27,28]. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η ανασκόπηση των προτύπων και η ανάλυση και σύγκριση των πιστοποιητικών που αφορούν την παραγωγή συσσωματωμάτων (pellet) οικιακής χρήσης.

2. ΕΞΕΛΙΞΗ ΠΡΟΤΥΠΩΝ ΠΕΛΛΕΤ

Η δημιουργία τυποποιημένης ποιότητας στα πέλλετ αποτελούσε το βασικό πρόβλημα για την περαιτέρω ανάπτυξη της αγοράς τους, ειδικά στον τομέα της οικιακής θέρμανσης, όπου η ποιότητα σχετίζεται άμεσα με την απόδοση και την οικονομική χρήση των συστημάτων θέρμανσης [27]. Η επίτευξη ενός προϊόντος το οποίο θα πληροί τις απαιτήσεις προτύπων μπορεί να επιτευχθεί μέσω βελτιώσεων στα στάδια παραγωγής (Εικόνα 1) [29,30] και μέσω της πρώτης ύλης που χρησιμοποιείται [14].



Εικόνα 1: Βασική ροή παραγωγής πέλλετ

Το πρώτο πρότυπο που εκδόθηκε για την ποιότητα των πέλλετ ήταν το Γερμανικό DIN 51731:1996. Το γερμανικό πρότυπο δεν χρησιμοποιήθηκε όμως εκτεταμένα λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε τέφρα (<1,5%), σε σχέση με μεταγενέστερα πρότυπα και την απουσία ορίων στη φθορά από τριβή [28,31]. Το 1998 στη Σουηδία εκδόθηκε το πρότυπο SS 187120:1998 στο οποίο υπήρχαν τρεις κατηγορίες ανάλογα με τις οριακές τιμές σε φυσικές, μηχανικές και χημικές ιδιότητες που θέσπιζε το πρότυπο. Η Αυστρία δημιούργησε το πρότυπο ÖNORM M 7135:2000 στο οποίο σε σχέση με τα προηγούμενα η επιτρεπόμενη περιεκτικότητα σε τέφρα είναι πολύ μικρότερη (<0,5%) [28]. Λίγα χρόνια αργότερα η Αυστρία είναι η πρώτη χώρα που παρουσιάζει πρότυπο απαιτήσεων, το ÖNORM M 7136:2002, για την μεταφορά και την αποθήκευση των πέλλετ ώστε να διασφαλίζεται η ποιότητά τους [32].Το 2004 η Ευρωπαϊκή Επιτροπή Τυποποίησης (CEN) και συγκεκριμένα η CEN/TC 335 εξέδωσε το προσχέδιο προτύπου για όλες τις μορφές στερεών βιοκαυσίμων στην Ευρώπη. Δημιούργησε την πειραματική τεχνική προδιαγραφή CEN/TS 14588:2004 για στερεά βιοκαύσιμα στην οποία υπήρχαν οι ορολογίες και οι προδιαγραφές τους [33,34]. Σε σχέση με τα εθνικά πρότυπα που είχαν εκδοθεί, το ευρωπαϊκό πρότυπο διαφοροποιούνταν και ταξινομούσε τα πέλλετ σε τρείς γενικές κατηγορίες με βάση την προέλευση των πρώτων υλών: α. ξυλώδης βιομάζα, β. φυτοζωική και γ. βιομάζα από φρούτα μαζί με μία από τις προηγούμενες κατηγορίες. Την ίδια χρονιά η Ιταλία εκδίδει το πρότυπο CTI-R04/05:2004 στο οποίο κατηγοριοποιεί τα πέλλετ σε τρείς κατηγορίες ανάλογα με τις προσμίξεις της πρώτης ύλης [28]. Το ιταλικό πρότυπο εναρμονιζόταν αρκετά με τις προδιαγραφές του ευρωπαϊκού. Η CEN//TC 335 κατά την περίοδό 2003-2006 δημοσίευσε 27 τεχνικές προδιαγραφές (pre-standards) για τα στερεά βιοκαύσιμα, οι οποίες αργότερα οδήγησαν στην δημιουργία ολοκηρωμένων ευρωπαϊκών προτύπων [28,35].

Η επιθυμία για δημιουργία ενιαίας ροής της οικονομίας εντός Ευρωπαϊκής Ένωσης οδήγησε στην θέσπιση ενιαίων ευρωπαϊκών προτύπων, τα οποία θα υιοθετούνταν από όλους τους εθνικούς οργανισμούς τυποποίησης της Ε.Ε. [17]. Όταν τίθεται σε ισχύ ένα ευρωπαϊκό πρότυπο τα εθνικά πρότυπα των χωρών που υπάγονται στην Ε.Ε. πρέπει να καταργηθούν ή να εναρμονιστούν με το ευρωπαϊκό πρότυπο [35]. Το 2010 η ευρωπαϊκή επιτροπή δημιούργησε το πρότυπο EN 14961. Το EN14961 αποτελεί μια σειρά έξι προτύπων που αναφέρονται σε στερεά βιοκαύσιμα για οικιακή καύση [33,36]. Από αυτό το πακέτο προτύπων στα πέλλετ αναφέρονται τα πρότυπα EN 14961-1:2010 Γενικές προδιαγραφές, EN 14961-2:2011 Συσσωματώματα ξύλου για μη βιομηχανική χρήση (οικιακή

χρήση) και EN 14961-6:2012 μη ξυλώδη πέλλετ οικιακής χρήσης [16,37]. Σύμφωνα με το πρότυπο EN 14961-2:2011 τα πέλλετ οικιακής χρήσης κατατάχθηκαν σε τρεις κατηγορίες A1, A2 και B ανάλογα με τις χημικές και μηχανικές τους ιδιότητες [33,36].

Το 2007 ο Παγκόσμιος Οργανισμός Τυποποίησης ISO με σκοπό την θέσπιση παγκόσμιων προτύπων δημιούργησε την επιτροπή ISO/TC 238 για στερεά βιοκάυσιμα [36]. Η ύπαρξη παγκόσμιου προτύπου για τα στερεά βιοκαύσιμα στόχευε στην απελευθέρωση του παγκόσμιου εμπορίου εισαγωγών-εξαγωγών. Το 2011 η επιτροπή εξέδωσε το πρώτο προσχέδιο του προτύπου ISO/CD 17225 για στερεά βιοκαύσιμα [16]. Για την δημιουργία του προσχέδιου και αργότερα του τελικού προτύπου η επιτροπή ISO/TC 238 εξέτασε όλα τα εθνικά προϋπάρχοντα πρότυπα καθώς και το αντίστοιχο ευρωπαϊκό [16,36]. Το 2014 η επιτροπή ISO/TC 238 εξέδωσε το πρότυπο ISO 17225. Με την έκδοση του παγκόσμιου προτύπου καταργήθηκε η σειρά EN 14961 και όλες οι ευρωπαϊκές χώρες εναρμόνισαν τα εθνικά τους πρότυπα με το παγκόσμιο [37].

Πίνακας 1 *Προδιαγραφές συσσωματωμάτων (πέλλετ) σύμφωνα με τα πρότυπα EN 14961-2:2011 και ISO 17225-2:2014 [20,40]*

Ιδιότητα	Μονάδες	EN A1	EN A2	EN B	ISO A1	ISO A2	ISO B
Diameter (D)	mm	6 (±1) or 8 (±1)			6 (±1) or 8 (±1)		
Length (L)	mm	3,15 ≤ L ≤ 40			3,15 <L ≤ 40		
Moisture (M)	w-%	≤ 10			≤ 10		
Ash (A)	w-%	≤0,7	≤1,5	≤3,0	≤0,7	≤1,2	≤2,0
Mechanical Durability (DU)	w-%	≥97,5		≥96,5	≥98,0	≥97,5	
Fines (<3,15 mm)	w-%	<1			≤ 1,0 (≤ 0,5)		
Net Calorific Value (Q)	kWh/kg	4,6≤Q≤5,3			≥4,6		
Bulk Density (BD)	kg/m^3	≥600			600≤BD≤750		
Additives	w-%	≤2			≤2		
Nitrogen (N)	w-%	≤0,3	≤0,5	≤1	≤0,3	≤0,5	≤1
Sulfur (S)	w-%	≤0,03		≤0,04	≤0,04	≤0,05	
Chlorine (Cl)	w-%	≤0,02		≤0,03	≤0,02		≤0,03
Ash Deformation Temperature (DT)	°C	≤1200		≤1100	≥1200		≥1100
Arsenic (As)	mg/kg	<1			<1		
Cadmium (Cd)	mg/kg	≤0,5			≤0,5		
Chromium (Cr)	mg/kg	≤10			≤10		
Copper (Cu)	mg/kg	≤10			≤10		
Lead (Lb)	mg/kg	≤10			≤10		
Mercury (Hg)	mg/kg	≤0,1			≤0,1		
Nickel (Ni)	mg/kg	≤10			≤10		
Zinc (Zn)	mg/kg	≤100			≤100		

Το ISO 17225 αποτελείται από μια σειρά εφτά προτύπων και δύο τεχνικών προδιαγραφών (ISO/TS) για στερεά βιοκαύσιμα οικιακής χρήσης [38]. Από τη σειρά προτύπων στα πέλλετ αναφέρονται το ISO

17225-1:2014 Γενικές προδιαγραφές, ISO 17225-2:2014 Συσσωματώματα ξύλου, ISO 17225-6:2014 μη ξυλώδη πέλλετ [16] και η τεχνική προδιαγραφή ISO/TS 17225-8:2016 Ταξινόμηση θερμικής επεξεργασίας και πυκνότητας βιοκαυσίμων. Υπάρχουν και άλλα πρότυπα για τα πέλλετ όπως το ISO 17829:2015 Στερεά βιοκαύσιμα – Προσδιορισμός μήκους και διαμέτρου των πέλλετ. Σύμφωνα με το πρότυπο ISO 17225-2:2014 τα συσσωματώματα κατατάσσονται σε τρείς κατηγορίες A1, A2 και B ανάλογα με τις φυσικές, χημικές και μηχανικές τους ιδιότητες [14,39].
Συγκρίνοντας το πρότυπο ISO με το πρότυπο EN για τις προδιαγραφές των τριών κατηγοριών πέλλετ οικιακής χρήσης (Πίνακας 1) υπάρχουν σημαντικές διαφορές. Το ISO απαιτεί μικρότερη περιεκτικότητα σε τέφρα (Ash), στις περισσότερες κατηγορίες, δημιουργώντας έτσι ένα προϊόν καλύτερης ποιότητας. Επίσης προβλέπεται μεγαλύτερη μηχανική αντοχή καθώς και προσπάθεια περαιτέρω διαχωρισμού των κατηγοριών A1 και A2. Η μετάβαση από το πρότυπο EN στο πρότυπο ISO πρώτον δημιούργησε προϊόντα με μεγαλύτερη αντοχή που διευκολύνουν την μεταφορά τους, άρα τις εισαγωγές-εξαγωγές και δεύτερον η μικρότερη περιεκτικότητα σε τέφρα έδωσε καλύτερες συνθήκες καύσης στις σόμπες.

3. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΕΛΛΕΤ ΟΙΚΙΑΚΗΣ ΧΡΗΣΗΣ

Η εφαρμογή των προτύπων στην παραγωγή των πέλλετ για οικιακή χρήση αποτελεί μια πολύπλοκη διαδικασία. Για την μέτρηση των επιμέρους ιδιοτήτων, για κατάταξη των πέλλετ σε κατηγορίες, απαιτείται η χρήση και άλλων προτύπων τα οποία διευκρινίζουν τις επί μέρους διαδικασίες που πρέπει να ακολουθηθούν για την αξιοποίησή τους. Η αγορά όλων αυτών των προτύπων έχει μεγάλο κόστος το οποίο δεν συμφέρει οικονομικά, ιδιαίτερα τις μικρομεσαίες επιχειρήσεις. Παράλληλα οι επί μέρους διαδικασίες απαιτούν γνώση και χρήση εξειδικευμένων οργάνων τα οποία δεν είναι απαραίτητη προϋπόθεση ότι διαθέτει κάθε παραγωγική μονάδα. Οι παραπάνω δυσκολίες μειώθηκαν με την δημιουργία οργανισμών πιστοποίησης σε εθνικό και διεθνές επίπεδο. Οι οργανισμοί πιστοποίησης διεκπεραιώνουν τις απαραίτητες μετρήσεις, μέσω συστημάτων πιστοποίησης τα οποία βασίζονται στα πρότυπα, με σκοπό την έκδοση πιστοποιητικού ποιότητας του προϊόντος. Τέτοιου είδος συστήματα πιστοποίησης αποτελούν το CANplus™, ENplus™, DINplus™ και τοPSI.

3.1. Εξέλιξη συστημάτων πιστοποίησης πέλλετ οικιακής χρήσης

Η Αυστρία ήταν από τις πρώτες χώρες που εξέδωσε πιστοποιητικό ποιότητας με βάση το πρότυπο ÖNorm M 7135 [36]. Ακόμα και σήμερα υπάρχουν κάποιοι παραγωγοί πέλλετ οι οποίοι το χρησιμοποιούν κυρίως σε εθνικό επίπεδο. Το 2002 η DINCERTCO εξέδωσε το πιστοποιητικό DINplus™ (Deutsch Industry Norm), το οποίο βασιζόταν στο γερμανικό πιστοποιητικό DIN 51731 και στο αυστριακό ÖNorm M 7135 [31]. Συγκρίνοντας τα πιστοποιητικά είναι αντιληπτό ότι το DINplus™ βασίστηκε κυρίως στο αυστριακό ÖNorm M 7135 [41]. Το 2006 στην Ιταλία εκδόθηκε το πιστοποιητικό PelletGold© [36]. Οι απαιτήσεις του PelletGold© αρχικά ήταν παρόμοιες με του DINplus™ και του ÖNorm M 7135. Η έκδοση του PelletGold© του 2011 ακολουθούσε τα αυστηρά πρότυπα CEN//TS 14961 και εναρμονιζόταν με τα όρια του Pellet Fuel Institute (PFI) [42]. Το 2014 δημιουργήθηκαν τροποποιήσεις στο πιστοποιητικό PelletGold© σύμφωνα με το πρότυπο ISO 17225:2014. Μέχρι το 2011 στις περισσότερες χώρες της Ευρώπης η πιστοποίηση γινόταν βάση του πιστοποιητικού DINplus™. Το 2010 το γερμανικό ινστιτούτο πέλλετ (German Pellet Institute) άρχισε να αναπτύσσει την ιδέα ενός ευρωπαϊκού πιστοποιητικού [43]. Η δημιουργία ευρωπαϊκού πιστοποιητικού στόχευε στην υιοθέτηση του πιστοποιητικού από όλες τις χώρες-μέλη του CEN.

Τελικώς το 2011 εκδόθηκε το πιστοποιητικό ENplus™ το οποίο βασιζόταν στο πρότυπο EN 14961-2:2010 [27]. Την ίδια χρονιά στον Καναδά εκδόθηκε το πιστοποιητικό CANplus™ το οποίο αποτελεί πιστό αντίγραφο του πιστοποιητικού ENplus™ [44]. Το 2015 εκδόθηκε η τελευταία τροποποιημένη έκδοση του ENplus™ και του CANplus™ οι οποίες βασίζονται στο πρότυπο ISO 17225-2:2014. Αντίστοιχα στην Αμερική, το Μάρτιο του 2010, το Environmental Protection Agency (EPA) τόνισε την ανάγκη για δημιουργία πιστοποιητικού σύμφωνα με τις απαιτήσεις του New Source Performance Standard (NSPS) για τις εκπομπές αερίων από τις σόμπες. Στα τέλη του 2011 εκδόθηκε το πιστοποιητικό PFI από το Pellet Fuel Institute βασισμένο στα αμερικάνικα πρότυπα ASTM [45]. Το πιστοποιητικό PFI τροποποιήθηκε το 2018 εισάγοντας κάποιες μετρήσεις σύμφωνα με τα πρότυπα ISO [46]. Μέχρι σήμερα βρίσκονται σε ισχύ όλα τα προαναφερθέντα πιστοποιητικά, όμως λόγω της ανάγκης για ενιαία οικονομία εισαγωγών-εξαγωγών παρουσιάζεται ιδιαίτερη προτίμηση στο πιστοποιητικό ENplus™. Τα υπόλοιπα πιστοποιητικά χρησιμοποιούνται κυρίως από παραγωγούς και εμπόρους οι οποίοι στοχεύουν στο εμπόριο εθνικού επιπέδου. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η Γερμανία όπου πολλές επιχειρήσεις πιστοποιούνται κατά ENplus™ και κατά DINplus™, ώστε να αυξήσουν τις πωλήσεις τους [36]. Ιδιαίτερη περίπτωση αποτελεί η αγορά πέλλετ της Σουηδίας. Η

πλειονότητα της παραγωγής των πέλλετ ανήκει στην κατηγορία A1, βάση του προτύπου EN 14961-2:2010 [36.47]. Σύμφωνα με έρευνες οι Σουηδοί παραγωγοί δεν κάνουν χρήση του πιστοποιητικού ENplus™, έχουν όμως πιστοποιητικό FSC το οποίο αποτελεί γενικό πιστοποιητικό για προϊόντα ξύλου. Το πιστοποιητικό FSC διασφαλίζει ότι τα παραγόμενα προϊόντα προέρχονται από αειφορικά διαχειριζόμενα δάση. Η ένωση παραγωγών πέλλετ της Σουηδίας PiR είχε δηλώσει ότι διερευνά την δημιουργία Σκανδιναβικού πιστοποιητικού, διότι δεν παρουσιαζόταν προθυμία από τους παραγωγούς να πιστοποιηθούν σύμφωνα με το ευρωπαϊκό πιστοποιητικό [36]. Μέχρι του 2017 μόνο δύο Σουηδοί παραγωγοί έκαναν χρήση του πιστοποιητικού ENplus™. Ωστόσο τα τελευταία χρόνια, ύστερα από την απαίτηση του καταναλωτικού κοινού, οι παραγωγοί δείχνουν πρόθυμοι να χρησιμοποιήσουν το πιστοποιητικό ENplus™ [47].

3.2. Πιστοποιητικό PFI

Τα πέλλετ στις ΗΠΑ συνιστάται να ικανοποιούν τις απαιτήσεις του πιστοποιητικού, όμως δεν αποτελεί υποχρέωση των παραγωγών, όπως στην Ευρώπη [48]. Στο πιστοποιητικό PFI αναφέρεται χαρακτηριστικά ότι αποτελεί προτροπή. Στο PFI δεν διευκρινίζεται η δυνατότητα πιστοποίησης σε εμπόρους/μεσολαβητές πέλλετ παρά μόνο σε παραγωγικές μονάδες. Δεν αποσκοπεί στην αντιμετώπιση, αν υπάρχουν, προβλημάτων ασφάλειας που συνδέονται με την χρήση του προϊόντος και επικεντρώνεται στην διασφάλιση της ποιότητας με βάση τα πρότυπα. Όσον αφορά τη συσκευασία των πέλλετ δεν αναφέρεται κάποιο τυποποιημένο μέγεθος σάκων, αναφέρεται το προτεινόμενο βάρος, χωρίς όμως να αποτελεί απαίτηση.

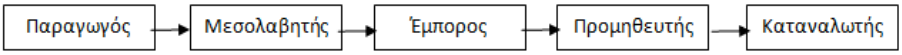
Το πιστοποιητικό PFI κατατάσσει τα προϊόντα σε τρεις κατηγορίες ποιότητας πέλλετ: PFI Premium, PFI Standard και PFI Utility. Στις οδηγίες του πιστοποιητικού στο κεφάλαιο που αναφέρονται τα πρότυπα που χρησιμοποιούνται γίνεται αναφορά στο πρότυπο ISO 17225:2014. Εξετάζοντας τον πίνακα κατηγοριών του PFI με τις τρεις κατηγορίες που αναφέρονται στο ISO 17225:2014 παρουσιάζονται μεγάλες αποκλίσεις και διαφορές. Ιδιαίτερα αισθητή είναι η διαφορά στην περιεχόμενη τέφρα. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές του πρότυπου ISO 17225:2014 (Πίνακας 1) η περιεχόμενη τέφρα έχει ως μέγιστη τιμή ≤ 2%, σε αντίθεση με τις απαιτήσεις του PFI στο οποίο στην κατηγορία PFI Utility η περιεχόμενη τέφρα ανέρχεται στην τιμή ≤ 6%. Το σημείο τήξης της τέφρας δεν προσδιορίζεται στο πιστοποιητικό καθώς θεωρείται μη υποχρεωτικό για τον προσδιορισμό της ποιότητας των πέλλετ. Η χωρική πυκνότητα και η περιεκτικότητα των χημικών στοιχείων είναι αντίστοιχη με του πρότυπου ISO 17225:2014. Τα πέλλετ πιστοποίησης PFI έχουν όμως μικρότερες απαιτήσεις μηχανικής αντοχής. Σημαντική λεπτομέρεια αποτελεί η έλλειψη απαιτήσεων για την ελάχιστη θερμαντική αξία των πέλλετ. Το πιστοποιητικό PFI δεν προσδιορίζει τιμή για την θερμαντική αξία, όμως απαιτεί την μέτρησή της σύμφωνα με το πρότυπο ISO 18125:2017 καθώς και να αναγράφεται η ελάχιστη τιμή θερμαντικής αξίας στη συσκευασία [46].

Οι μετρήσεις για την κατάταξη των πέλλετ στις παραπάνω τρεις κατηγορίες γίνονται με λήψη δειγμάτων από την συνολική παραγωγή. Η μέθοδος δειγματοληψίας αποτελεί μια πολύ σημαντική διαδικασία καθώς η λάθος λήψη του δείγματος μπορεί να επιφέρει ψευδή αποτελέσματα. Στο πιστοποιητικό PFI αναφέρεται ως μέγεθος δείγματος τα 40lbs (18,14 kg). Η δειγματοληψία γίνεται σύμφωνα με το πρότυπο ASTMC702/C702M-11 [46]. Το πρότυπο ASTMC702/C702M-11 αναφέρει τρείς μεθόδους δειγματοληψίας μεγάλου δείγματος και την διαδικασία διαχωρισμού του δείγματος [49]. Εξετάζοντας το πιστοποιητικό και το πρότυπο παρατηρούμε ότι δεν αναφέρεται από ποια σημεία της συνολικής ποσότητας επιλέγεται το δείγμα. Η παραπάνω έλλειψη μπορεί να οδηγήσει στην αλλοίωση των αποτελεσμάτων ειδικά κατά την μέτρηση της μηχανικής αντοχής. Μετά την διεξαγωγή των μετρήσεων στο δείγμα, τα πέλλετ κατατάσσονται σε κατηγορίες σύμφωνα με τις τιμές κάθε κατηγορίας. Στην περίπτωση όπου μια μέτρηση δεν αντιστοιχεί στην τιμή του πίνακα για την συγκεκριμένη κατηγορία ποιότητας τα πέλλετ δεν κατατάσσονται αυτόματα στην χαμηλότερη κατηγορία, αλλά επανεξετάζεται η τιμή αν πληροί τις απαιτήσεις της κατώτερης κατηγορίας [46].

3.3. Πιστοποιητικό ENplus™

Τα τελευταία χρόνια σε πολλές περιπτώσεις η συσκευασία των πέλλετ διαχωρίστηκε από την παραγωγή και πραγματοποιείται από εμπόρους/προμηθευτές ή ανεξάρτητους παρόχους υπηρεσιών (αποθήκευσης και μεταφοράς συσσωματωμάτων). Για τη διασφάλιση της ποιότητας το ENplus™, με την 3η έκδοσή του, ανέπτυξε περαιτέρω συστήματα πιστοποίησης που συνδυάζουν την πιστοποίηση των πέλλετ, της αλυσίδας εμπορίου και την διαχείριση ποιότητας. Το πιστοποιητικό ENplus™ δίνει τη δυνατότητα πιστοποίησης όχι μόνο στον παραγωγό αλλά σε όποιον συμμετέχει στην αλυσίδα διακίνησης των πέλλετ, εκτός του καταναλωτή (Εικόνα 2). Επικεντρώνεται στην έννοια της περιβαλλοντικής αειφορίας μέσω παρακολούθησης αειφορικών δεικτών, όπως το αποτύπωμα του

άνθρακα στην παραγωγή πέλλετ. Οι απαιτήσεις που καλύπτει το πιστοποιητικό αφορούν τις πρώτες ύλες και τις ιδιότητες των πέλλετ (ISO 17225-2:2014), τη διαχείριση της ποιότητας στην παραγωγή (ISO 9001:2015,EN 15234-2:2012), τον χειρισμό, τον έλεγχο και την παρακολούθηση της ροής παραγωγής. Για τον έλεγχο της αλυσίδας διακίνησης χρησιμοποιούνται κυρίως τα πρότυπα ISO και κάποια πρότυπα CEN. Οι έλεγχοι πραγματοποιούνται με τα πρότυπα CEN μέχρι τη δημοσίευση του αντίστοιχου πρότυπου ISO [20].



Εικόνα 1 Αλυσίδα διακίνησης πέλλετ

Στις επιχειρήσεις που πιστοποιούνται δίνεται αναγνωριστικό ENplusID το οποίο είναι μοναδικό. Το αναγνωριστικό αποτελείται από πέντε χαρακτήρες, οι δύο πρώτοι είναι ο κωδικός της χώρας και οι υπόλοιποι η ταυτότητα του πιστοποιητικού. Αν μια επιχείρηση έχει πολλές μονάδες στην ίδια χώρα μπορεί να ζητήσει την έκδοση κοινού αναγνωριστικού κατά την πιστοποίηση των μονάδων (τύπου BE 010-2). Η πιστοποίηση ENplus™ ισχύει για 3 χρόνια. Σε περίπτωση παράβασης ο φορέας πιστοποίησης (Certification Body) μπορεί να θέσει σε αναστολή το πιστοποιητικό έως και 2 χρόνια. Το ENplusID της επιχείρησης σε αναστολή δεν μπορεί να δοθεί σε άλλη εταιρία, αλλά ούτε στην ίδια, όταν γίνει αίτηση για άρση της αναστολής. Με την άρση της αναστολής δίνεται νέο αναγνωριστικό. Η συσκευασία πρέπει να διαθέτει σφραγίδα πιστοποίησης, η οποία αποτελείται από το λογότυπο της κατηγορίας ποιότητας και την σφραγίδα ENplus™. Η σφραγίδα πιστοποίησης πρέπει να είναι τουλάχιστον 20mm και απαγορεύεται να μην φέρει το ENplusID και να αποτελείται μόνο από το λογότυπο, για αποφυγή πλαστογραφίας και παραπλάνηση του καταναλωτή [20].

Οι σάκοι των συσκευασμένων πέλλετ έως 30kg πρέπει να πληρούν τις παρακάτω απαιτήσεις. Οι διαστάσεις τους πρέπει να είναι εγκεκριμένες από τον εθνικό φορέα (National Management). Πάνω στη συσκευασία πρέπει να αναγράφονται, στη γλώσσα της χώρας που θα διατεθούν στην αγορά της: i. “πέλλετ ξύλου”, ii. όνομα και διεύθυνση εταιρίας, iii. σφραγίδα ποιότητας, iv. διάμετρος πέλλετ, v. η σημείωση “ φυλάσσεται σε ξηρές συνθήκες”, vi. η σημείωση “να χρησιμοποιείται μόνο σε εγκεκριμένα και κατάλληλά συστήματα καύσης σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή και τους εθνικούς κανονισμούς”, vii. το καθαρό βάρος σε kg και viii. προαιρετικά, οι οριακές τιμές των ιδιοτήτων της κατηγορίας κατά ISO 17225-2:2014. Οι πιστοποιημένες εταιρίες μη συσκευασμένων πέλλετ υποχρεούνται να λαμβάνουν δείγμα αναφοράς, τουλάχιστον 500g, κάθε φορά που φορτώνουν εμπόρευμα. Τα δείγματα αναφοράς λαμβάνονται, κατά προτίμηση από το υλικό που πέφτει και αποθηκεύονται για εννιά μήνες. Στη συνέχεια σφραγίζονται και αναγράφεται το σημείο δειγματοληψίας, η ημερομηνία, η κατηγορία ποιότητας και η πινακίδα του φορτηγού [20]. Η διαδικασία των δειγμάτων ελέγχου αποσκοπεί στην ευκολότερη λήψη αποφάσεων σε περίπτωση καταγγελίας που αφορά την ποιότητα.

3.3.1. Πιστοποίηση παραγωγού κατά ENplus™

Η εταιρία παραγωγής πέλλετ που είναι πιστοποιημένη αποδεικνύει ότι συμμορφώνεται με τις προδιαγραφές του συστήματος πιστοποίησης. Αυτό περιλαμβάνει τις προμήθειες και την επεξεργασία των πρώτων υλών, την παραγωγή πέλλετ, την αποθήκευσή τους, τη μεταφορά, την συσκευασία τους, τον ποιοτικό έλεγχο, τα προσόντα του προσωπικού, τη διαχείριση των καταγγελιών και τις απαιτήσεις τεκμηρίωσης (documentation requirements). Όλες οι παραπάνω διαδικασίες ελέγχονται κατά τη διάρκεια ετήσιας επιθεώρησης με σκοπό την έκδοση του πιστοποιητικού. Η πιστοποίηση ENplus™ παραγωγού δεν περιλαμβάνει πιστοποίηση για εμπορία πέλλετ άλλου παραγωγού καθώς και πιστοποίηση για τμηματικές παραδώσεις σε καταναλωτές. Στην δεύτερη περίπτωση ο παραγωγός πρέπει να κάνει αίτηση για έκδοση πιστοποιητικού μεσολαβητή/εμπόρου (trader certification).

Ο παραγωγός πέλλετ επιλέγει στην αίτησή του έναν καταχωρημένο φορέα επιθεώρησης (Inspection Body) και φορέα πιστοποίησης (Certification Body). Μετά την καταχώρηση της αίτησης ο φορέας επιθεώρησης στέλνει επιθεωρητή για να γίνει η αρχική επιθεώρηση. Ο επιθεωρητής αποστέλλει έκθεση της επιθεώρησης, εντός 2 μηνών από την ημερομηνία επιθεώρησης, στον αναθέτοντα οργανισμό πιστοποίησης. Ο φορέας πιστοποίησης αξιολογεί την έκθεση και αν ο αιτών συμμορφώνεται με τις διατάξεις του ENplus υποβάλλει στον αιτούντα και τον Εθνικό φορέα (National Management) την έκθεση συμμόρφωσης (Conformity Report). Ο εθνικός φορέας αποστέλλει τιμολόγιο για τα τέλη άδειας σύμφωνα με την εκτιμώμενη ετήσια παραγωγή. Με την καταβολή του τέλους ο εθνικός φορέας αποστέλλει την σφραγίδα πιστοποίησης και ο φορέας πιστοποίησης παρέχει το

πιστοποιητικό στην εταιρία. Τα στοιχεία της εταιρίας, το ENplusID και οι κατηγορίες ποιότητας που παράγει δημοσιεύονται σε όλες τις ιστοσελίδες του πιστοποιητικού ENplus™ [20].

Εκτός από την αρχική επιθεώρηση γίνονται και ετησίως τακτικές επιθεωρήσεις σε χρονική περίοδο ± τριών μηνών από την αρχική επιθεώρηση. Ο επιθεωρητής πραγματοποιεί δειγματοληψία σύμφωνα με το πρότυπο EN 14778:2011. Η δειγματοληψία πραγματοποιείται στο αμέσως επόμενο στάδιο από την παραγωγή του τελικού προϊόντος. Το δείγμα σφραγίζεται με σκοπό την αποστολή του για ανάλυση των ιδιοτήτων του, σύμφωνα με το πρότυπο ISO 17225-2:2014. Η δειγματοληψία σύμφωνα με το πρότυπο EN 14778:2011 αποσκοπεί στην λήψη αντιπροσωπευτικού δείγματος [50]. Παράλληλα, ο επιθεωρητής, εξετάζει τον εξοπλισμό και τις εγκαταστάσεις, συμπεριλαμβανομένης μιας τυχαίας επιλογής στους χώρους αποθήκευσης. Ελέγχει την συμμόρφωση με το σύστημα διαχείρισης ποιότητας όσων αφορά την λειτουργία της επιχείρησης, την πολιτική ποιότητας και τα προσόντα του προσωπικού. Επίσης ελέγχει την προέλευση των πρώτων υλών και των πρόσθετων, τον υπολογισμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, την εκπλήρωση των υποχρεώσεων αναφοράς προς τον εθνικό φορέα, τα στοιχεία της παραγωγής και των πωλήσεων, την χρήση μόνο εγκεκριμένων σάκων και την διαχείριση των καταγγελιών. Στην περίπτωση που από την επιθεώρηση αποδειχθεί η μη συμμόρφωση της εταιρίας τα έξοδα επιθεώρησης καλύπτονται από αυτήν, στην αντίθετη περίπτωση η πιστοποιημένη εταιρία μπορεί να υποβάλει ένσταση. Αν η έκτακτη επιθεώρηση χαρακτηριστεί αδικαιολόγητη, η επιθεώρηση καλύπτεται από τον εθνικό φορέα [20]. Στην Ελλάδα ο εθνικός φορέας που είναι υπεύθυνος για τις παραπάνω διαδικασίες είναι το Εθνικό Σύστημα Διαπίστευσης (Ε.ΣΥ.Δ.). Κατά τις παραπάνω διαδικασίες το πιστοποιητικό ENplus™ έχει καταφέρει να διασφαλίζει την ασφάλεια της επιχείρησης που θέλει να πιστοποιηθεί και τους φορείς που είναι υπεύθυνοι για την σωστή λειτουργία της διαδικασίας πιστοποίησης.

3.4. Πιστοποιητικό CANplus™

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως το πιστοποιητικό CANplus™ αποτελεί αντίγραφο του πιστοποιητικού ENplus™. Το πιστοποιητικό ENplus™ παραχωρεί το δικαίωμα σύνταξης εθνικού πιστοποιητικού [21]. Όπως αναφέρεται στο πιστοποιητικό ο εθνικός φορέας έχει το δικαίωμα έκδοσης εθνικού πιστοποιητικού, παρόμοιο με το ENplus™, για την προσθήκη εθνικών κανονισμών [20]. Η χρήση του πιστοποιητικού όμως θα αφορά μόνο την καναδική οικονομία και το εσωτερικό εμπόριο.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τις τελευταίες δεκαετίες λόγω της Παγκόσμιας πολιτικής για την κλιματική αλλαγή παρουσιάστηκε ραγδαία αύξηση της ζήτησης για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Αυτό επηρέασε την αγορά των συσσωματωμάτων που αποτελούν οικονομικό και οικολογικό προϊόν. Η αύξηση της ζήτησης από το καταναλωτικό κοινό οδήγησε στην ανάγκη θέσπισης προτύπων ποιότητας και μεθόδων μέτρησης αυτής. Αρχικά οι εθνικοί φορείς τυποποίησης δημιούργησαν πρότυπα για τα πέλλετ. Σύντομα η Ευρωπαϊκή Ένωση αντιλήφθη την ανάγκη δημιουργίας ενιαίου προτύπου ώστε να γίνει ευκολότερη η διακίνηση των πέλλετ σε ευρωπαϊκό επίπεδο. Για την απελευθέρωση του παγκόσμιου εμπορίου εισαγωγών-εξαγωγών ο Παγκόσμιος οργανισμός τυποποίησης ISO δημιούργησε πρότυπα, αντίστοιχα με τα ευρωπαϊκά. Πλέον έχει εδραιωθεί η παγκόσμια αγορά των πέλλετ και ο κάθε καταναλωτής με μεγάλη ευκολία μπορεί να αποκτήσει προϊόντα από όλον τον κόσμο.

Η τυποποίηση και η δημιουργία προτύπων διασφαλίζει την ποιότητα των προϊόντων. Ένα τυποποιημένο προϊόν δεν συνεπάγεται ότι διαθέτει την καλύτερη ποιότητα, όμως διασφαλίζει την ύπαρξη μίας στάνταρ ποιότητας που προέκυψε από έλεγχο του προϊόντος. Για να γίνει ευκολότερη η διαδικασία τυποποίησης δημιουργήθηκαν πιστοποιητικά. Η χρήση των αναγνωριστικών πιστοποιητικών βοήθησε και στην εξοικείωση του καταναλωτικού κοινού με την έννοια της πιστοποίησης. Εν έτη 2021 σε μερικές χώρες παρατηρείτε πίεση από το καταναλωτικό κοινό προς τους εμπόρους, ώστε να διαθέτουν πιστοποίηση στα προϊόντα τους. Τα πιστοποιητικά των συσσωματωμάτων ξεκίνησαν από την Αυστρία και στη συνέχεια παρουσιάστηκε ραγδαία εξέλιξη από την Γερμανία, η οποία αποτελεί τον δημιουργό του πιστοποιητικού ENplus™. Η Αμερική όντας ισχυρή οικονομία στα πέλλετ, όπως και η Ευρώπη, ήταν φυσικό επακόλουθο να δημιουργήσει πιστοποιητικό ποιότητας. Τα πιστοποιητικά που χρησιμοποιούνται σήμερα σε μεγάλη κλίμακα είναι το ENplus™ (ευρωπαϊκό), το PFI (αμερικάνικο) και το CANplus™ (καναδικό).

Το πιστοποιητικό PFI έχει ως θετικό ότι γίνονται μηνιαίοι έλεγχοι στους κατόχους του πιστοποιητικού το οποίο διασφαλίζει μία σταθερή ποιότητα που ικανοποιεί τις ανάγκες του καταναλωτή. Η μεγάλη του περιεκτικότητα σε τέφρα καθώς και η έλλειψη απαιτούμενης ελάχιστης θερμαντικής αξίας αποτελούν στοιχεία τα οποία όμως δεν αποδίδουν την υψηλότερη ποιότητα πέλλετ για τον καταναλωτή.

Αντίστοιχα η μη ύπαρξη πιστοποιητικού για παρόχους υπηρεσιών δυσκολεύει τη διακίνηση των πέλλετ. Το PFI προστατεύει τον παραγωγό από καταγγελίες καταναλωτών όμως δεν προσδίδει την καλύτερη ποιότητα πέλλετ για τον καταναλωτή σε σχέση με το ENplus™.

Το πιστοποιητικό ENplus™ τείνει να μονοπωλήσει στην παροχή πιστοποιητικών λόγω της δομημένης οργάνωσής του και τα θετικά που παρουσιάζει τόσο για τους παραγωγούς και εμπόρους, όσο και για τους καταναλωτές. Έχει καλύτερη ποιότητα σε σχέση με άλλα πιστοποιητικά, δίνει την δυνατότητα πιστοποίησης, εκτός από τους παραγωγούς, σε εμπόρους και παρόχους υπηρεσιών και διεξάγει εκτεταμένους ελέγχους, με σκοπό τον ακριβή προσδιορισμό της ποιότητας. Όλα τα παραπάνω στοιχεία οδηγούν στην προστασία τόσο των διακινητών και παραγωγών όσο και των καταναλωτών. Αυτό επαληθεύεται από μελέτες στο ευρωπαϊκό καταναλωτικό κοινό στις οποίες το μεγαλύτερο ποσοστό παρουσίασε προτίμηση στα πελλετ πιστοποιημένα κατά ENplus™. Ως αρνητικό στοιχείο του πιστοποιητικού μπορεί να θεωρηθεί το υψηλό κόστος έκδοσης του. Αυτή η παράμετρος καθιστά πολύ δύσκολη την πιστοποίηση μικρών επιχειρήσεων.

Από τα παραπάνω είναι φανερό ότι η τυποποίηση και η πιστοποίηση εξελίσσεται ραγδαία διότι αποτελεί ισχυρό “όπλο” για την διασφάλιση της ποιότητας καθώς και για την ύπαρξη υγιούς σχέσης καταναλωτή-εμπόρου/παρόχου υπηρεσιών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Singh, R. S., and Walia, A. K., 2016,“Biofuels: historical perspectives and public opinions. In Biofuels,” pp. 21-42, CRC Press, USA.

[2] Ellison, R.,1984,.“Methods of food preparation in Mesopotamia (c. 3000-600 BC),” Journal of the Economic and Social History of the Orient/Journal de l'histoireEconomique et Sociale de l'Orient, pp. 89-98.

[3] Alliance for green heat, 2020, “Chronology of wood heat,” Retrieved from:http://www.forgreenheat.org/resources/history.html

[4] Quadra-fire, 2020, “Evolution of fire: A brief history of wood-burning stove teghnology.” Retrieved from: https://www.quadrafire.com/shopping-tools/blog/evolution-of-fire-a-brief-history-of-wood-burning-stove-technology

[5] ENplus™, 2020,“History.” Retrieved from:https://www.enplus-pellets.eu/en-in/about-us-en-in/history-of-enplus.html

[6] Lexico, 2019, “Lexico,” Powered by Oxford Retrieved from: https://www.lexico.com/en/definition/pellet

[7] Environmental Protection Agency, 2020a, “EPA certified wood stoves.” Retrieved from: https://www.epa.gov/burnwise/epa-certified-wood-stoves

[8] Environmental Protection Agency, 2020b, “FACT SHEET: Summary of Requirements for Woodstoves and Pellet Stoves.” Retrieved from: https://www.epa.gov/residential-wood-heaters/fact-sheet-summary-requirements-woodstoves-and-pellet-stoves

[9] Saracoglu, N., andGunduz, G., 2009,“Wood pellets—tomorrow's fuel for Europe,” Energy Sources, Part A,31(19), pp.1708-1718.

[10] Serup, H., Falster, H., Gamborg, C., Gundersen, P., Hansen, L., Heding, N. and Thomsen, I. M., 2002,“Wood for energy production, technology–environment–economy,” Centre for Biomass Technology on behalf of Danish Energy Agency: 9-24 (www. ens. dk).

[11] Sikkema, R., Steiner, M., Junginger, M., Hiegl, W., Hansen, M. T., andFaaij, A., 2011,“The European wood pellet markets: current status and prospects for 2020,” Biofuels, Bioproducts and Biorefining,5(3), pp. 250-278.

[12] Miranda, T., Montero, I., Sepúlveda, F. J., Arranz, J. I., Rojas, C. V., and Nogales, S., 2015,“A review of pellets from different sources,” Materials,8(4), pp. 1413-1427.

[13] Proskurina, S., Alakangas, E., Heinimö, J., Mikkilä, M., andVakkilainen, E., 2017,“A survey analysis of the wood pellet industry in Finland: Future perspectives,” Energy,118, pp. 692-704.

[14] Venturini, E., Vassura, I., Agostini, F., Pizzi, A., Toscano, G., andPassarini, F., 2018,“Effect of fuel quality classes on the emissions of a residential wood pellet stove,” Fuel,211, pp. 269-277.

[15] Höglund, J., 2008, “The Swedish fuel pellets industry: Production, market and standardization,”Doctoral dissertation, Sverigeslantbruksuniversitet, pp. 85.

[16] Stelte, W., Sanadi, A. R., Shang, L., Holm, J. K., Ahrenfeldt, J., and Henriksen, U. B., 2012,“Recent developments in biomass pelletization–A review,” BioResources,7(3), pp. 4451-4490.

[17] Duca, D., Riva, G., Pedretti, E. F., and Toscano, G., 2014, “Wood pellet quality with respect to EN 14961-2 standard and certifications.” Fuel,135, pp. 9-14.

[18] Thrän, D., Schaubach, K., Peetz, D., Junginger, M., Mai-Moulin, T., Schipfer, F., ... andLamers, P., 2019,“The dynamics of the global wood pellet markets and trade–key regions, developments and impact factors,” Biofuels, Bioproducts and Biorefining,13(2), pp. 267-280.

[19] Gürdil, G., Malaťák, J., andVaculík, P., 2010,“Mechanical processing of solid biofuels,” Anadolu TarımBilimleriDergisi, 25(2), pp. 135-145.

[20] ENplus™, 2015, “ENplus Handbook-Quality Certification Scheme For Wood Pellets, Version 3.0,” Retrieved from:https://www.pellet.org/CANplus/downloadcp.html

[21] CANplus™, 2016, “CANplus Handbook-Quality Control System Certification For Wood Pellets, Version 3.0” Retrieved from:https://www.pellet.org/CANplus/downloadcp.html

[22] Μπαρμπούτης, Ι. και Καμπερίδου, Β., 2012,“Καύση του Ξύλου- Απόδοση- Εκπομπές.” Από: https://www.tovima.gr/files/1/2012/12/31/xylo.pdf

[23] Engineering ToolBox, 2003, “Fuels - Higher and Lower Calorific Values.” Retrive from:https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d_169.html

[24] Forest Research, 2020, “Carbon emissions of different fuels.” Retrieved from: https://www.forestresearch.gov.uk/tools-and-resources/biomass-energy-resources/reference-biomass/facts-figures/carbon-emissions-of-different-fuels/

[25] Buchholz, T., Gunn, J. S., andSaah, D. S., 2017,“Greenhouse gas emissions of local wood pellet heat from northeastern US forests,” Energy,141, pp. 483-491.

[26] Casasso, A., Capodaglio, P., Simonetto, F., andSethi, R., 2019,.“Environmental and Economic Benefits from the Phase-out of Residential Oil Heating: A Study from the Aosta Valley Region (Italy),” Sustainability,11(13), pp. 3633.

[27] Hiegl, W., Janssen, R. and Pichler, W., 2009, “Advancement of pellets-related European standards,” Intelligent Energy Europe. Retrieved from: https://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/sites/iee-projects/files/projects/documents/pelletslas_pellet_standards.pdf

[28] García-Maraver, A., Popov, V., and Zamorano, M., 2011,“A review of European standards for pellet quality,” Renewable Energy,36(12), pp. 3537-3540.

[29] Qian, Y., and McDow, W., 2013, “The wood pellet value chain,” US Endowment for Forestry and Communities: Greenville, pp. 59, SC,USA.

[30] Adams, P. W. R., Shirley, J. E. J., and McManus, M. C., 2015,.“Comparative cradle-to-gate life cycle assessment of wood pellet production with torrefaction,” Applied Energy, 138, pp. 367-380.

[31] Biomass Pellet Machine, 2020, “DINplus pellets or EN plus pellets,” Retrieved from: https://www.biopelletmachine.com/biopellet-making-guidance/wood-pellet-certification-standard.html

[32] Austrian Standards, 2020, “About Standards: Benefits of standards.” Retrieved from: https://www.austrian-standards.at/en/about-standards/benefits-of-standards/benefits-for-the-economy/power-and-heat-from-biomass-kwb/

[33] Kofman, P. D., 2010,“Preview of European standards for solid biofuels,” Processing/Products, (23), pp. 12.

[34] European Commission, 2020, “Summary of Woodfuel Standards.” Retrieved from: https://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/sites/iee-projects/files/projects/documents/whs_summary_of_woodfuel_standards_en.pdf

[35] Alakangas, E., 2010,.“European Standard (EN 14961) for wood chips and hog fuel,” Forest Bioenergy, pp 329-40.

[36] Audigane, N., Bentele, M., Ferreira, J. M. F., Gyurik, A., Jossart, J. M., Mangel, A. C., ... andPieret, N.,2012,.“European pellet report. PellCert project,” 2012 April. Retrieved from:https://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/sites/iee-projects/files/projects/documents/pellcert_european_pellet_report.pdf

[37] BSI, 2020, “British Standards Institution EN 14961:2010 Solid biofuels, Fuel specifications and classes,” Retrieved from: https://shop.bsigroup.com/SearchResults/?q=BS%20EN%2014961-

[38] International Standardization Organization, 2020, “ISO 17225” Retrieved from: https://www.iso.org/search.html?q=17225&hPP=10&idx=all_en&p=0&hFR%5Bcategory%5D%5B0%5D=standard

[39] International Standardization Organization (access 2020) ISO/TC 238 Solid Biofuels

[40] Alakangas, E., 2011, “New European Pellets Standards,” EUBIONET 3. Retrieved from:https://www.foex.fi//uploads/bioenergy/New_European_pellets_standards_March_2011.pdf

[41] Narra, S., Brinker, M.M. and Ay, P., 2012,“Particle size distribution of communited and liberated cereal straws measured with different image analysis systems and their characteristic influence on mechanical pellets quality,” XXVI International Mineral Processing Congress “Innovative Processing for Sustainable Growth”, New Delhi, India, 24-28 September 2012, pp. 03723-03739.

[42] Pantaleo, A., Villarini, M., Colantoni, A., Carlini, M., Santoro, F., andRajabiHamedani, S., 2020,“Techno-Economic Modeling of Biomass Pellet Routes: Feasibility in Italy,” Energies,13(7), pp. 1636.

[43] Control union Certification, 2020, “Enplus – Whole chain certification for wood pellets.” Retrieved from: https://certifications.controlunion.com/en/certification-programs/certification-programs/enplus-whole-chain-certification-for-wood-pellets

[44] Wood pellet association of Canada, 2020, “Understanding wood pellet quality certifications.” Retrieved from:https://www.pellet.org/wpac-news/understanding-wood-pellet-quality-certifications

[45] Melin S., 2011, “Quality certification and standards for solid biofuels,” Wood pellet association of Canada, pp. 17

[46] PFI Standards Committee, 2018,“Pellet Fuel Institute (PFI) Standard specifications for residential/commercial densified fuel.”

[47] Thrän, D., Peetz, D., Schaubach, K., Backéus, S., Benedetti, L., and Bruce, L., 2017, “Global wood pellet industry and trade study 2017,” IEA Bioenergy Task 40.

[48] Trojanowski, R., and Fthenakis, V., 2019, “Nanoparticle emissions from residential wood combustion: A critical literature review, characterization, and recommendations,” Renewable and Sustainable Energy Reviews,103, pp. 515-528.

[49] ASTM Committee, 2012, “ASTM C702/C702M-11 Standard practice for reducing samples of aggregate to testing size.”

[50] Alakangas, E. and Groot, M., 2011, “Solid Standards-Enhancing the implementation of quality and sustainability standards and certification schemes for solid biofuels (EIE/11/218),” Intelligent Energy Europe, Retrieved from: http://www.biomasstradecentre2.eu/data/upload/D5_5_Handbook_Implementation_CEN_Standards_General_Solid_Standards_1_(1).pdf

ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΞΥΛΩΔΟΥΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΑΠΟ 5-ΕΤΗ ΔΑΣΟΠΟΝΙΚΗ ΦΥΤΕΙΑ ΤΩΝ ΤΑΧΥΑΥΞΩΝ ΕΙΔΩΝ *Paulownia tomentosa* και *P. elongata* ΣΤΗ Β. ΕΛΛΑΔΑ

Κωνσταντίνος Α. Σπανός[1*] και Διονύσιος Γαϊτάνης[1]

[1]ΕΛ.Γ.Ο. – 'ΔΗΜΗΤΡΑ', Γενική Διεύθυνση Αγροτικής Έρευνας
Ινστιτούτο Δασικών Ερευνών, Λουτρά Θέρμης, 57006 – Θεσσαλονίκη
Τηλ.: 2310 461171 (2, 3), Fax: 2310 461341,
*e-mail: kspanos@fri.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Δασοπονική φυτεία των ταχυαυξών ειδών *Paulownia tomentosa* και *P. elongata* (είδη Παυλώνιας) εγκαταστάθηκε (φυτ. σύνδεσμος 4 x 4 m, πειραμ. σχεδιασμός απλού δέντρου/single tree plot, έδαφος μέτρια βαρειάς μηχανικής σύστασης/CL) το 2012 (τέλος του έτους) στο Μεσημέρι (ευρύτερη περιοχή) Θεσ/νίκης με σκοπό την παραγωγή ξυλώδους βιομάζας καθώς και τεχνικής ξυλείας. Τον Ιανουάριο του 2018 μετρήθηκαν οι παρακάτω βιομετρικές παράμετροι: συνολικό ύψος δέντρου (Η), ύψος έναρξης κόμης (Ηκ), διάμετρος στη βάση του κορμού (DB), διάμετρος στη μέση του κορμού (Dm), διάμετρος στο στηθιαίο ύψος (DBH), διάμετρος πριν την έναρξη της κόμης (Dk) και ο όγκος κορμού (V). Στη συνέχεια υπολογίσθηκε η ξυλώδης βιομάζα (χλωρό βάρος/FW) του μέσου δέντρου (για κάθε είδος) και στη συνέχεια έγινε αναγωγή στο στρέμμα. Με βάση την περιεχόμενη υγρασία - που υπολογίσθηκε στο 40% του χλωρού βάρους – έγινε αναγωγή σε ξηρό βάρος (DW). Η ανάλυση των αποτελεσμάτων έδειξε τα ακόλουθα: βρέθηκαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των δύο ειδών για τις παραμέτρους DB (*P. tomentosa* 16,8 cm - *P. elongata* 19,5 cm), Dm (*P. tomentosa* 11 cm – *P. elongata* 12 cm), DBH (*P. tomentosa* 13,6 - *P. elongata* 15,3 cm), Dk (*P. tomentosa* 7,6 cm – *P. elongata* 8,6 cm), V (*P. tomentosa* 0,062 – *P. elongata* 0,075 m^3) και το DW. Δεν βρέθηκαν σημαντικές διαφορές για το Η και Ηκ (λόγω ανταγωνισμού των δέντρων). Με βάση το μέσο δέντρο υπολογίσθηκε η ξυλώδης βιομάζα (ξηρό βάρος) σε 2.543 kg/στρέμμα για την *P. tomentosa* (62 δέντρα x 68,35 kg/μέσο δέντρο x 0,6) και για την *P. elongata* σε 3.065 kg /στρέμμα (62 δέντρα x 82,4 kg/μέσο δέντρο x 0,6). Έχοντα υπόψη, ότι 1 kg ξύλου αντιστοιχεί σε μέση θερμική τιμή 19 MJ (1kg ξύλου = 19 MJ, 1MJ = 0,278 kWh), το ενεργειακό περιεχόμενο της παραγόμενης ξυλώδους βιομάζας για την *P. tomentosa* εκτιμάται σε 48.310 MJ (2.543 kg x 19MJ) και για την *P. elongata* σε 58.240 MJ (3.065 kg x 19MJ). Η ανάλυση των συσχετίσεων (Pearson correlations) μεταξύ των βιομετρικών παραμέτρων μας έδειξε ότι ο όγκος του κορμού (και επομένως η ξυλώδη βιομάζα) συσχετίζεται καλύτερα με τη διάμετρο στη μέση του κορμού (Dm) (r >0.95) σε σχέση με τις άλλες παραμέτρους. Στην περίπτωση που η φυτεία είχε φυτ. σύνδεσμο 3 x 3m (111 δέντρα/στρέμα - καθαρά ενεργειακή φυτεία) η ξυλώδης βιομάζα θα μπορούσε να είναι πολύ μεγαλύτερη (σχεδόν διπλάσια). Από την άλλη πλευρά όμως, ο συνδυασμός παραγωγής διαφορετικών προϊόντων όπως παραγωγή ξυλώδους βιομάζας για ενεργειακή χρήση, η παραγωγή ξυλείας (διαφόρων διαστάσεων) και η χρήση της Παυλώνιας σε αγροδασοπονικά συστήματα μπορεί να δίνει εναλλακτικές λύσεις στον παραγωγό/επενδυτή έναντι των διακυμάνσεων των τιμών της ξυλώδους βιομάζας στην αγορά.

Λέξεις κλειδιά: *Paulownia spp., δασοπονική φυτεία, ξυλώδης βιομάζα, ενέργεια, ξυλεία.*

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η Παυλώνια ή Παουλώνια (*Paulownia*) είναι δέντρο ιθαγενές της Ασίας (κυρίως Κίνα, επίσης Βιετνάμ και Λάος). Το ξύλο της Παυλώνιας έχει ανοιχτόχρωμο καρδιόξυλο και από αιώνες χρησιμοποιείται στην Ασία επειδή είναι ευκατέργαστο και έχει όμορφη υφή (νερά ξύλου) (Εικ. 2). Η *Paulownia* είναι ένα γένος φυτών της μονογονικής οικογένειας *Paulowniaceae*, που αποτελείται από 6-17 είδη (εννέα ευρύτερα είδη) (*P. tomentosa, P. fortunei, P. Kawakamii, P. elongata, P. catalpifolia, P. australis, P. viscosa* κ.α.) **[1][2]** Σήμερα, η Παυλώνια καλλιεργείται σε όλο τον κόσμο (σε όλες τις Ηπείρους εκτός από την ανταρκτική). Το ΙΔΕ δοκιμάζει και ερευνά δύο είδη Παυλώνιας, την *Paulownia tomentosa* και την *Paulownia elongata* καθώς και συγκεκριμένα υβρίδια (ειδών). Μελετά και ερευνά την προσαρμογή της Παυλώνιας (Εκ.1) σε διάφορες περιοχές της Ελλάδας (κυρίως σε πρώην γεωργικές εκτάσεις, άλλες Δημόσιες και Δημοτικές εκτάσεις) σε συνεργασία με φυσικά πρόσωπα, εταιρείες και πρόσφατα με Δήμους και Δημόσιες Υπηρεσίες.

Εικόνα 1. Ταχυαυξής δασοπονική φυτεία με *P. tomentosa* και *P. elongata* στην περιοχή Μεσημέρι Θεσσαλονίκης.

Το ξύλο της Παυλώνιας είναι πολύτιμο **[1][2][3]** και παρόλο που είναι ελαφρύ, έχει πολλά πλεονεκτήματα και χρησιμοποιείται για πολλές χρήσεις (Εικ. 2)) ακόμα και σε μικρές διαστάσεις (ξύλινες κατασκευές), θερμομόνωση/ηχομόνωση, ξυλόγλυπτα, έπιπλα, ξυλόφυλλα/καπλαμάδες, κατασκευή κανό) καθώς, για παραγωγή βιομάζας για ενέργεια (π.χ. πέλλετ), βιοαιθανόλη **[4][5]** καθώς και χαρτοπολτό **[1][6]**. Θα πρέπει να έχουμε υπόψη, ότι η Παυλώνια δεν ενδείκνυται για παραγωγή καυσόξυλων και ξυλοκάρβουνου για το λόγο ότι το ξηρό βάρος της είναι χαμηλό (περίπου 300 kg/m^3). Γενικά όμως μπορεί τα υπολείμματα υλοτομιών να χρησιμοποιούνται (σε χαμηλή υγρασία ξύλου 10-15%) σε μίξη με άλλα καυσόξυλα. Σίγουρα όμως, μπορεί να χρησιμοποιείται για παραγωγή πέλλετ γιατί, όπως είναι γνωστό, η πελλετοποίηση αυξάνει το ειδικό βάρος του τελικού προϊόντος (>0,7) και επομένως είναι κατάλληλο για καύση.

Εικόνα 2. Διάφορες κατασκευές από ξύλο Παυλώνιας (Ελληνικής παραγωγής).

Η Παυλώνια απαιτεί βαθιά και χαλαρά εδάφη (πηλοαμμώδη/αμμοπηλώδη έως αργιλοαμμώδη/αμμοαργιλώδη) και όχι βαριά (π.χ. αργιλικά), συνεκτικά ή και πολύ υγρά εδάφη (γιατί δεν αναπτύσσεται κανονικά και υποφέρει από σήψη ριζών). Θα πρέπει να αποφεύγονται επίσης τα εποχιακά αλλά μεγάλης διάρκειας (π.χ. 2-3 μήνες) εδάφη που πλημυρίζουν κατά το χειμώνα και την άνοιξη. Εδάφη κατάλληλα για την Παυλώνια υπάρχουν κυρίως σε πεδιάδες, οροπέδια, κοιλάδες και αναχώματα ποταμών, εδάφη χαλαρά και με επαρκή υγρασία στο χώρο των ριζών και γενικά μπορούμε να πούμε σε θέσεις όπου ευδοκιμούν και άλλα ταχυαυξή (ιθαγενή ή μη) πλατύφυλλα (π.χ. λεύκες, φράξος, φτελιές) **[1][4]**. Τέτοιες εκτάσεις υπάρχουν πολλές στην Ελλάδα, αλλά οι περισσότερες χρησιμοποιούνται για γεωργικές καλλιέργειες. Για να αποφασίσει τελικά ο επενδυτής (φυσικό πρόσωπο/Εταιρεία/Δημόσια Υπηρεσία) για μια καλλιέργεια Παυλώνιας, θα πρέπει να συγκρίνει τα καθαρά έσοδα και το χρόνο απόδοσης από τις δύο εναλλακτικές (γεωργική καλλιέργεια με καλλιέργεια Παυλώνιας) λαμβάνοντας υπόψη και τα περιβαλλοντικά οφέλη.

Η Παυλώνια δεν ευδοκιμεί και δεν ενδείκνυται σε αβαθή (<50 εκ.) και βραχώδη εδάφη (συνήθως σε πλαγιές). Είναι απαιτητική σε νερό (μετά το Μάιο μέχρι αρχές Οκτώβρη) και χρειάζεται πότισμα 1 η 2 φορές τη βδομάδα (ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες) από 30 έως 40 λίτρα/πότισμα/δέντρο (τουλάχιστον για τα 3 πρώτα έτη). Δεν ευνοείται (υποφέρει) σε ανεμόπληκτες περιοχές (συχνοί και δυνατοί άνεμοι >4-5 μποφόρ) και αντέχει σε θερμοκρασίες μέχρι +40° C το καλοκαίρι και μέχρι -20° C το χειμώνα **[1][4]**. Δεν συνιστάται σε ξηροθερμικά περιβάλλοντα γιατί είναι είδος απαιτητικό σε έδαφος (βάθος >2μ) και νερό και για αυτό το λόγο και δεν συνιστάται για αναδασώσεις σε καμένες εκτάσεις (όπου συνήθως έχουμε ξηροθερμικές συνθήκες).

Η φύτευση και η εγκατάσταση μιας φυτείας με Παυλώνια συνιστάται να γίνεται με το τέλος του χειμώνα (Φεβρουάριο/Μάρτιο). Η φύτευση ετήσιων ξυλοποιημένων φυταρίων (γυμνόριζα ή σε πλαστικά δοχεία/γλάστρες) γίνεται το Φεβρουάριο έως αρχές Μαρτίου (πριν την έναρξη της βλάστησης) – η φύτευση μπορεί να γίνει και αργότερα από Απρίλιο έως και τον Ιούνιο με πράσινα φυτά (με φύλλα) σε γλάστρες/πλαστικούς σάκους αλλά δεν συνιστάται για το λόγο ότι μπορεί να έχουμε σημαντικές απώλειες λόγω των υψηλών θερμοκρασιών (κατά την περίοδο αυτή) και προσβολή από φυλλοφάγα έντομα (π.χ. ακρίδες), Πριν την φύτευση, ένα βαθύ όργωνα (50-80 εκ.) για χαλάρωση του εδάφους και

διάσπαση τυχόν αργιλικών στρωμάτων και στη συνέχεια φρεζάρισμα. Ο φυτευτικός σύνδεσμος: γαι παραγωγή βιομάζας μπορεί να είναι 3m x 2m = 167 δέντρα/στρέμμα ή 3 x 3 =111 δέντρα/στρέμμα ενώ για την παραγωγή πολύτιμης τεχνικής ξυλείας συνιστούνται φυτ. σύνδεσμοι: 4 x 4 = 62 δέντρα/στρέμμα, 4 x 5 = 50 δέντρα/στρέμμα ή 5 x 5 = 40 δέντρα/στρέμμα.

Η Παυλώνια είναι ιδανικό είδος για αγροδασοπονία (δηλ. συνδυασμός δέντρων και γεωργ. καλλιέργειες) **[7][8]** για το λόγο ότι αφήνει αρκετό ηλιακό φως, τουλάχιστον μέχρι την 5-ετία, και επομένως μπορεί να συνδυάζεται με γεωργικές καλλιέργειες (π.χ. ψυχανθή - τριφύλλι, βίκος ή και κηπευτικά/μποστανικά, καλλιέργεια μανιταριών, αρωματικά φυτά). Για χρήση στην αγροδασοπονία ευρύτεροι φυτ. συνδεσμοι θα πρέπει να εφαρμόζονται (π.χ. 5 x 5 = 40 , 6 x 6 = 28, 8 x 8 = 16 ή και 10m x 10m =10 δέντρα/στρέμμα).

Μια φυτεία τεχνικής ξυλείας Παυλώνιας, σε καλές εδαφοκλιματικές συνθήκες και με σωστή καλλιέργεια και φροντίδα, μπορεί να μας δώσει καθαρό κορμόξυλο (στρογγύλη ξυλεία) μήκους 6-8 m, διάμετρο κορμού (DBH) 30-50cm και όγκο 0,5-1,0 m^3 (για κάθε δέντρο) που σημαίνει ένα ελάχιστο εγγυημένο εισόδημα 150 Ευρώ (το δέντρο). Έχοντας υπόψη ότι στο στρέμμα φυτεύονται 60 περίπου δέντρα (φυτ. σύνδεσμο 4 x 4 m), τα έσοδα στο τέλος της 10-ετίας για ένα στρέμμα καλλιέργειας θα ανέρχονται στα 60 x 150 = 9.000 Ευρώ. Και επομένως, μια έκταση 10 στρεμμάτων, μπορεί να μας αποφέρει (στη 10-ετία) συνολικό ακαθάριστο εισόδημα 10 x 9.000 = 90.000 Ευρώ. Τα έξοδα εγκατάστασης και διαχείρισης μιας φυτείας Παυλώνιας εκτιμούνται στο 20-30% επί των ακαθάριστων. Τα υπολείμματα της υλοτομίας (κλαδιά και κορυφές) μπορούν να γίνονται πέλλετ (χονδρική τιμή πώλησης ξηρής βιομάζας: 30-50 Ευρώ/tn) ή κομπόστα (οργανικό λίπασμα) [2].
Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να παρουσιάσει τα βιομετρικά αποτελέσματα καθώς και την παραγωγή ξυλώδους βιομάζας μιας δασοπονική φυτείας των ταχυαυξών ειδών *Paulownia tomentosa* και *P. elongata* που εγκαταστάθηκε σε φυτευτικό σύνδεσμο 4 x 4 m τον Ιανουάριο του 2018 στο Μεσημέρι (ευρύτερη περιοχή) Θεσ/νίκης και έγινε σύγκριση αποδόσεων μεταξύ των δύο ειδών. Οι βιομετρικές παράμετροι που μετρήθηκαν ήταν οι παρακάτω: συνολικό ύψος δέντρου (Η), ύψος έναρξης κόμης (Ηκ), διάμετρος στη βάση του κορμού (DB), διάμετρος στη μέση του κορμού (Dm), διάμετρος στο στηθιαίο ύψος (DBH), διάμετρος πριν την έναρξη της κόμης (Dk) και ο όγκος κορμού (V). Στη συνέχεια υπολογίσθηκε η ξυλώδης βιομάζα (χλωρό βάρος/FW) του μέσου δέντρου (για κάθε είδος) και έγινε αναγωγή σε ξερή βιομάζα στο στρέμμα.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Δασοπονική φυτεία των 2 ταχυαυξών ειδών *Paulownia tomentosa* και *P. elongata* (είδη Παυλώνιας) εγκαταστάθηκε το 2012 (τέλος του έτους) στο Μεσημέρι (ευρύτερη περιοχή) Θεσ/νίκης σε φυτ. σύνδεσμο 4 x 4 m και σε πειραματικό σχεδιασμό του απλού δέντρου (single tree plot). Πριν τη φύτευση, ένα βαθύ όργωνα (60 εκ.) για χαλάρωση του εδάφους και διάσπαση τυχόν αργιλικών στρωμάτων έγινε, και στη συνέχεια φρεζάρισμα. Η φύτευση έγινε το Φεβρουάριο (2013) με ετήσια ξυλοποιημένα φυτάρια (γυμνόριζα). Δέκα μέρες μετά τη φύτευση έγινε κοπή (καρατόμηση) του κύριου βλαστού σύρριζα στο έδαφος. Μετά την έναρξη της βλαστητικής περιόδου (που ξεκινά το Μάρτιο), το μήνα Απρίλιο, διατηρήθηκε ένας κύριος βλαστός (ο επικρατέστερος - για περαιτέρω εξέλιξη) ενώ οι άλλοι αφαιρέθηκαν. Κατά τη διάρκεια της αυξητικής περιόδου γινόταν συνεχής απομάκρυνση των μασχαλιαίων κλαδίσκων (από τις μασχάλες των μεγάλων φύλλων) (Απρίλιος/Μάιος/Ιούνιος/Ιούλιος/Αύγουστος/Σεπτέμβριος). Επίσης έγινε δεύτερη κοπή (μετά το τέλος της $1^{ης}$ βλαστητικής περιόδου σε περίπτωση που τα νεαρά δέντρα ήταν κάτω από 3 μέτρα – συνήθως κατά το πρώτο έτος ($1^{η}$ βλαστητική περίοδος) της φυτείας σκοπός μας είναι η δημιουργία ισχυρού ριζικού συστήματος ούτως ώστε τα νέα δενδρύλλια που θα αναγεννηθούν από τα πρέμνα να αποκτήσουν ύψος 4-8 μέτρα (ανάλογα με το γενετικό υλικό και το τοπικό εδαφο-κλίμα).
Το αρδευτικό σύστημα ήταν η στάγδην άρδευση για οικονομία και καλύτερο πότισμα - το πότισμα γινόταν κάθε 1 ή 2 εβδομάδες (ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες) από αρχές Μαΐου μέχρι αρχές Οκτώβρη για τα τρία (3) πρώτα έτη της φυτείας. Έγινε λίπανση (N-P-K) 100 γρ./φυτό το 1ο, 100/500 γρ./φυτό το 2ο & 3ο έτος, αντίστοιχα. Η καταστροφή των χόρτων/ζιζανίων γινόταν με καταστροφέα, 3 φορές το χρόνο (Απρίλιος/Μάιος, Ιούνιος/Ιούλιο και Οκτώβρη/Νοέμβρη). Για την καταπολέμηση των φυλλοφάγων εντόμων (κυρίως ακρίδες) έγινε ψεκασμός (με εμπορικό σκεύασμα) κάθε μήνα (Μάιος/Ιούνιος/Ιούλιος) για τα 3 πρώτα έτη. Για την ανάλυση του εδάφους 3 δείγματα εδάφους (βάθος: 0-30cm, 30-60cm, 60-90 cm - για κάθε δείγμα – περίπου 2 kg εδάφους/για κάθε βάθος) ελήφθησαν (Δεκέμβριος 2012) για εδαφολογική ανάλυση. Το έδαφος βρέθηκε μέτρια βαριάς μηχανικής σύστασης/CL και το pH = 7,5.
Ο σκοπός εγκατάστασης της φυτείας είναι η παραγωγή ξυλώδους βιομάζας καθώς και τεχνικής ξυλείας. Τον Ιανουάριο του 2018 μετρήθηκαν οι παρακάτω βιομετρικές παράμετροι: συνολικό ύψος

δέντρου (Η), ύψος έναρξης κόμης (Ηκ), διάμετρος στη βάση του κορμού (DB), διάμετρος στη μέση του κορμού (Dm), διάμετρος στο στηθιαίο ύψος (DBH), διάμετρος πριν την έναρξη της κόμης (Dk) και ο όγκος κορμού (V). Στη συνέχεια υπολογίσθηκε η ξυλώδης βιομάζα (χλωρό βάρος/FW) του μέσου δέντρου (για κάθε είδος) και στη συνέχεια έγινε αναγωγή στο στρέμμα. Με βάση την περιεχόμενη υγρασία - που υπολογίσθηκε στο 40% του χλωρού βάρους – έγινε αναγωγή σε ξηρό βάρος (DW).

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Τα αποτελέσματα των βιομετρικών παραμέτρων που μελετήθηκαν για τα δύο είδη παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Βιομετρικά αποτελέσματα για τα δύο είδη Παυλώνιας (P. tomentosa, P. elogata) (5-ετής φυτεία).

Παράμε-τρος	**Αρ. δείγμ (N)**	**Στηθ. Διάμ. (DBH) cm**	**Συνολ. Ύψος (H) m**	**Ύψος έναρξης κόμης (Hc) m**	**Διάμ. Βάσης (DB) cm**	**Διάμ. έναρξης κόμης (Dc)/cm**	**Διάμ. Στη μέση του κορμού (Dm)/cm**	**Όγκος κορμό-ξυλου (V)/m^3**
P. tomento-sa	90	13,6±0,11	10,15±0,04	6,49±0,02	16,8±0,13	7,6±0,09	11,0±0,09	0,062±0,001
P. elongata	90	15,3±0,13	10,14±0,04	6,52±0,02	19,5±0,16	8,6±0,10	12,03±0,11	0,075±0,001
Σημαντι-κότητα		***** (p<0.001)**	**ns**	**ns**	***** (p<0.001)**	***** (p<0.001)**	***** (p<0.001)**	***** (p<0.001)**

Από τον Πίνακα της ανάλυσης παραλλακτικότητας (Πιν. 2) βρέθηκαν σημαντικές διαφορές ($p<0.001$) μεταξύ των ειδών για τις βιομετρικές παραμέτρους DBH, DB, Dc, Dm και V ενώ δεν βρέθηκαν σημαντικές διαφορές ($p>0.05$) για το συνολικό ύψος και το ύψος έναρξης της κόμης, πιθανά λόγω του συναγωνισμού μεταξύ των δέντρων για φως.

Πίνακας 2. Ανάλυση της παραλλακτικότητας για τις βιομετρικές παραμέτρους που μετρήθηκαν.

	Στοιχεία παραλλακτικότητας (για κάθε παράμετρο)	Σύνολο τετραγ. (Sum of Squares)	Βαθμοί ελευθ. (df)	Μέσα τετραγ. (Mean Squares)	F - test	Σημαντικότητα (p - value)
DBH	Μεταξύ των ειδών	129,371	1	129,371	102,993	,000
	Μέσα στα είδη	223,588	178	1,256		
	Σύνολο	352,959	179			
H	Μεταξύ των ειδών	,000	1	,000	,000	,989
	Μέσα στα είδη	23,924	178	,134		
	Σύνολο	23,924	179			
Hc	Μεταξύ των ειδών	,045	1	,045	1,143	,287
	Μέσα στα είδη	7,079	178	,040		
	Σύνολο	7,124	179			
DB	Μεταξύ των ειδών	318,668	1	318,668	157,902	,000
	Μέσα στα είδη	359,229	178	2,018		
	Σύνολο	677,897	179			
Dc	Μεταξύ των ειδών	53,792	1	53,792	68,204	,000
	Μέσα στα είδη	140,388	178	,789		
	Σύνολο	194,180	179			

Dm	Μεταξύ των ειδών	48,257	1	48,257	53,255	,000
	Μέσα στα είδη	161,293	178	,906		
	Σύνολο	209,550	179			
V	Μεταξύ των ειδών	,007	1	,007	55,869	,000
	Μέσα στα είδη	,023	178	,000		
	Σύνολο	,030	179			

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων έδειξε τα ακόλουθα: βρέθηκαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των δύο ειδών για τις παραμέτρους DB (*P. tomentosa* 16,8 cm - *P. elongata* 19,5 cm), Dm (*P. tomentosa* 11 cm – *P. elongata* 12 cm), DBH (*P. tomentosa* 13,6 - *P. elongata* 15,3 cm), Dk (*P. tomentosa* 7,6 cm – *P. elongata* 8,6 cm), V (*P. tomentosa* 0,062 – *P. elongata* 0,075 m^3). Δεν βρέθηκαν σημαντικές διαφορές για το H και Hc (λόγω ανταγωνισμού των δέντρων).

Με βάση το μέσο δέντρο υπολογίσθηκε η ξυλώδης βιομάζα (ξηρό βάρος) σε 2.543 kg/στρέμμα για την *P. tomentosa* (62 δέντρα x 68,35 kg/μέσο δέντρο x 0,6) και για την *P. elongata* σε 3.065 kg /στρέμμα (62 δέντρα x 82,4 kg/μέσο δέντρο x 0,6). Έχοντας υπόψη, ότι 1 kg ξύλου αντιστοιχεί σε μέση θερμική τιμή 19 MJ (1kg ξύλου = 19 MJ, 1MJ = 0,278 kWh), το ενεργειακό περιεχόμενο της παραγόμενης ξυλώδους βιομάζας για την *P. tomentosa* εκτιμάται σε 48.310 MJ (2.543 kg x 19MJ) και για την *P. elongata* σε 58.240 MJ (3.065 kg x 19MJ). Σε άλλες σχετικές μελέτες έχει αναφερθεί παραγωγή βιομάζας (μικρού περίπτροπου χρόνου) για την *P. tomentosa* (1.3 - 3,0 tons/0.1 ha) **[1][3][9][10]** ή και παραπάνω ανάλογα με το φυτευτικό σύνδεσμο και τις τοπικές εδαφο-κλιματικές συνθήκες.

Η ανάλυση των συσχετίσεων (Pearson correlations) μεταξύ των βιομετρικών παραμέτρων μας έδειξε ότι ο όγκος του κορμού (και επομένως η ξυλώδη βιομάζα) συσχετίζεται καλύτερα με τη διάμετρο στη μέση του *κορμού* (Dm) (r >0.95) σε σχέση με τις άλλες παραμέτρους (Πίνακας 3 & 4) και επομένως μπορεί να υπολογισθεί με κατάλληλα βιομετρικά μοντέλα **[11]**.

Πίνακας 3. Συσχέτιση μεταξύ των βιομετρικών παραμέτρων (Pearson Correlations) για την P. tomentosa.

Pearson correlation (r)	Παράμετρος			
	V	DB	DBH	Dm
V	1,000	,851	,851	,980
DB	,851	1,000	,713	,856
DBH	,851	,713	1,000	,866
Dm	,980	,856	,866	1,000

* p<0.001

Πίνακας 4. Συσχέτιση μεταξύ των βιομετρικών παραμέτρων (Pearson Correlations) για την P. elongata.

	Παράμετρος			
Pearson correlations (r)	**V**	**DB**	**DBH**	**Dm**
V	1,000	0,717	0.776	0,981
DB	0,717	1,000	0,919	0,713
DBH	0,776	0,919	1,000	0,770
Dm	0,981	0,713	0,770	1,000

* p<0.001

Συνήθως οι ενεργειακές φυτείες **[12]** έχουν πυκνότερους φυτευτικούς συνδέσμους π.χ. 3 x 3m (111 δέντρα/στρέμμα - καθαρά ενεργειακή φυτεία) που σημαίνει ότι η ξυλώδης βιομάζα θα μπορούσε να είναι πολύ μεγαλύτερη (σχεδόν διπλάσια).

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων της φυτείας με 2 είδη Παυλώνιας έδειξε τα ακόλουθα: βρέθηκαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των δύο ειδών για τις παραμέτρους DB (*P. tomentosa* 16,8 cm - *P. elongata* 19,5 cm), Dm (*P. tomentosa* 11 cm – *P. elongata* 12 cm), DBH (*P. tomentosa* 13,6 - *P. elongata* 15,3 cm), Dk (*P. tomentosa* 7,6 cm – *P. elongata* 8,6 cm), V (*P. tomentosa* 0,062 – *P. elongata* 0,075 m^3) και το ξηρό βάρος (DW)..

Δεν βρέθηκαν σημαντικές διαφορές για το H και Hκ (λόγω ανταγωνισμού των δέντρων). Με βάση το μέσο δέντρο υπολογίσθηκε η ξυλώδης βιομάζα (ξηρό βάρος) σε 2.543 kg/στρέμμα για την *P. tomentosa* (62 δέντρα x 68,35 kg/μέσο δέντρο x 0,6) και για την *P. elongata* σε 3.065 kg /στρέμμα (62 δέντρα x 82,4 kg/μέσο δέντρο x 0,6). Έχοντας υπόψη, ότι 1 kg ξύλου αντιστοιχεί σε μέση θερμική τιμή 19 MJ (1kg ξύλου = 19 MJ, 1MJ = 0,278 kWh), το ενεργειακό περιεχόμενο της παραγόμενης ξυλώδους βιομάζας για την *P. tomentosa* εκτιμάται σε 48.310 MJ (2.543 kg x 19MJ) και για την *P. elongata* σε 58.240 MJ (3.065 kg x 19MJ).

Η ανάλυση των συσχετίσεων (Pearson correlations) μεταξύ των βιομετρικών παραμέτρων μας έδειξε ότι ο όγκος του κορμού (και επομένως η ξυλώδη βιομάζα) συσχετίζεται καλύτερα με τη διάμετρο στη μέση του κορμού (Dm) (r >0.95) σε σχέση με τις άλλες παραμέτρους και επομένως μπορεί να υπολογισθεί με βιομετρικά μοντέλα.

Επιπρόσθετα, ο συνδυασμός παραγωγής διαφορετικών προϊόντων όπως παραγωγή ξυλώδους βιομάζας για ενεργειακή χρήση, η παραγωγή ξυλείας (διαφόρων διαστάσεων) και η χρήση της Παυλώνιας σε αγροδασοπονικά συστήματα μπορεί να δίνει εναλλακτικές λύσεις στον παραγωγό/επενδυτή έναντι των διακυμάνσεων των τιμών της ξυλώδους βιομάζας στην αγορά.

Τέλος προτείνουμε σε εκτάσεις, όπου ασκείται η παραδοσιακή λευκοκαλλιέργεια σε δημόσιες και ιδιωτικές εκτάσεις (κυρίως στα πεδινά και αναχώματα ποταμών), να αρχίσουν σταδιακά να καλλιεργούνται και άλλα πολυτιμότερα ταχυαυξή πλατύφυλλα όπως σίγουρα η Παυλώνια, καθώς και άλλα ιθαγενή (π.χ. στενόφυλλος φράξος/*Fraxinus angustifolia*, φτελιά/*Ulmus* spp.) ή ξενικά (π.χ. Pecan/*Carya* spp.) που μπορούν να συνδυάζουν και την πολλαπλή χρήση (π.χ. ξύλο, παραγωγή καρπών, αγροδασοπονία, μελισσοκομία).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Z.-H. Zhu, C.-J. Chao, X.-Y. Lu and Y. G. Xiong, 1986. “Paulowniain China: Cultivation and Utilization,” Asian Network for Biological Sciences and International Development Research Centre, Singapore, 1986, pp. 1-65.

[2] Σπανός, Κ.Α., 2016. Εκδ. ΕΛΓΟ – ‘ΔΗΜΗΤΡΑ’, ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΔΑΣΙΚΩΝ ΕΡΕΥΝΩΝ, Επιστ. Φυλλάδιο– ΠΑΥΛΩΝΙΑ, 12σελ.

[3] Yadav, N. K., Vaidya, B. N., Henderson, K., Lee, J. F., Stewart, W.M., Dhekney, S.A., Joshee, N., 2013. A Review of *Paulownia* Biotechnology: A Short Rotation, Fast Growing Multipurpose Bioenergy Tree. American Journal of Plant Sciences, 2013, 4, 2070-2082.

[4] Σπανός κ. 2013. Παυλώνια - Ένα πολύτιμο δασικό δέντρο για εναλλακτική καλλιέργεια και μελλοντική επένδυση. Ελληνικός Γεωργικός οργανισμός, περιοδικό «ΔΗΜΗΤΡΑ» τεύχος 3, σελ. 13-16.

[5] Domínguez, E., Pablo G del Río, Romaní, A., Garrote, G. 2017. Hemicellulosic bioethanol production from Paulownia wood. 5th World Bioenergy Congress and Expo June 29-30, 2017 Madrid, SpainJ Fundam Renewable Energy Appl 2017, 7:4 (Suppl), DOI: 10.4172/2090-4541-C1-030, p.81.

[6] Jiménez, L., Rodriguez,A., Ferrer, J.L., Pérez, A., AnguloV., 2005. "Paulownia, a Fast Growing Plant, as a Raw Material for Paper Manufacturing". Afinidad, Vol. 62, No. 516, 2005, pp. 100-105.

[7] Zhu, Z.H., 1991. Evaluation and model optimisation of Paulownia intercropping system -- a project summary report. In: Z.H. Zhu et al. (Editors), Agroforestry Systems in China. Published jointly by the Chinese Academy of For-estry, People's Republic of China, and International Development Research Centre, Canada, Singapore, pp. 30-43.

[8] Jiang, Z., Gao L., Fang, Y., Xinwang Sun, X., 1994. Analysis of Paulownia-intercropping types and their benefits in Woyang County of Anhui Province. *Forest Ecology and Management* 67, 329-337.

[9] Zuazo, V.H.D., Bocanegra, J.A.J., Torres, F.P., Pleguezuelo, C.R.R., Martínez, J.R.F., 2013. Biomass Yield Potential of Paulownia Trees in a Semi-Arid Mediterranean Environment (S Spain), INTERNATIONAL JOURNAL of RENEWABLE ENERGY RESEARCH, Vol.3 (No.4), 789-793.

[10] Berdón, J., Montero Calvo, A.J., Royano Barroso, L, Parralejo Alcobendas, A.I., González Cortés, J., 2017. Study of Paulownia's Biomass Production in Mérida (Badajoz), Southwestern Spain. Environment and Ecology Research 5(7): 521-527, DOI: 10.13189/ eer.2017.050709.

[11] Spanos, K.A., Gaitanis, D., 2020. Wood Biomass Production from a 10-Year Old Plantation of *Fraxinus Angustifolia* Vahl in Greece. Modern Environmental Science and Engineering, Vol. 6, Number 4, Doi: 10.15341/mese (2333-2581)/ 05.06.2020/001, Academic Star Publishing Company, Brooklyn, NY.

[12] Σπανός, Κ.Α., 2006. ΕΝΤΑΤΙΚΗ ΔΑΣΟΠΟΝΙΑ ΜΙΚΡΟΥ ΠΕΡΙΤΡΟΠΟΥ ΧΡΟΝΟΥ - ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΔΑΣΙΚΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΑΠΟ ΦΥΤΕΙΕΣ ΤΑΧΥΑΥΞΩΝ ΔΑΣΟΠΟΝΙΚΩΝ ΕΙΔΩΝ, ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΚΑΙ ΧΗΜΙΚΗΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ. ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΗΛΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ, 8ο Εθνικό Συνέδριο για τις Ήπιες Μορφές Ενέργειας, 29-31 Μαρτίου 2006, Θεσσαλονίκη, Πρακτ. σελ. 461-468.

ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΓΡΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΑΠΟ ΒΙΟΜΑΖΑ

Αναστασία Ναξάκη[1]*, Ιωάννης Μπαρμπούτης[1], Βασιλική Καμπερίδου[1]

[1] Τμήμα Δασολογίας και Φυσικού Περιβάλλοντος, Σχολή Γεωπονίας, Δασολογίας και Φυσικού Περιβάλλοντος, Αριστοτέλειο Παν. Θεσσαλονίκης, 54124, Θεσσαλονίκη
[1]* e-mail: anaxaki96@gmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τις τελευταίες δεκαετίες η ολοένα αυξανόμενη χρήση συμβατικών μορφών ενέργειας και καυσίμων συνεχίζει να προκαλεί σοβαρά προβλήματα στο περιβάλλον και στα αποθέματα ορυκτών καυσίμων. Στο πλαίσιο των έντονων δεσμεύσεων των χωρών για μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, η αξιοποίηση εναλλακτικών πηγών ενέργειας έχει έλξει το ενδιαφέρον στην παραγωγή βιοκαυσίμων από υψηλής διαθεσιμότητας πρώτες ύλες. Η παρούσα μελέτη εξετάζει την εξέλιξη των μεθόδων και των διεργασίων παραγωγής υγρών καυσίμων από βιομάζα, εστιάζοντας στα κυριότερα είδη υγρών βιοκαυσίμων, τη βιοαιθανόλη και το βιοντίζελ, τα οποία ανήκουν στα 1ης γενιάς βιοκαύσιμα. Σήμερα, περίπου το 60% της αιθανόλης παράγεται από αραβόσιτο, 25% από ζαχαροκάλαμο, 7% από μελάσα, 4% από σιτάρι και το υπόλοιπο από άλλους σπόρους, μανιόκα ή ζαχαρότευτλα, με το 77% του βιοντίζελ να βασίζεται σε φυτικά έλαια (30% σογιέλαιο, 25% ελαιόλαδο, 18% κραμβέλαιο) ή ανακυκλωμένα μαγειρικά έλαια. Παρατίθενται τα χαρακτηριστικά αυτών των καυσίμων, οι κυριότερες πρώτες ύλες, όπως δασική βιομάζα, βιομάζα ενεργειακών καλλιεργειών και υπολείμματα γεωργικών καλλιεργειών, καθώς και η διαδικασία παραγωγής τους, οι περιορισμοί στην ευρεία χρήση τους και οι προοπτικές αυτών των μεθόδων στο άμεσο μέλλον. Εξετάζονται τα ευρωπαϊκά και διεθνή πρότυπα μαζί με το σύστημα πιστοποίησης, που αφορούν στα υγρά βιοκαύσιμα με μια μικρή αναφορά στις σημαντικότερες συμφωνίες που δίνουν ώθηση τις τελευταίες δύο δεκαετίες στην εντατικότερη αξιοποίησή τους. Επιπρόσθετα, πραγματοποιείται ανάλυση της κατάστασης και του πλαισίου στο οποίο κινούνται Ελλάδα και Ευρώπη, όσον αφορά στην παραγωγή των βιοκαυσίμων αυτών, τονίζοντας τις αυξανόμενες ερευνητικές προσπάθειες για στροφή στα βιοκαύσιμα χαμηλού κινδύνου.

Λέξεις Κλειδιά: *βιομάζα, βιοκαύσιμα, βιοντίζελ, βιοαιθανόλη, ενεργειακές καλλιέργειες*,

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ρίχνοντας μια ματιά στο σήμερα, η ολοένα αυξανόμενη κατανάλωση ενέργειας στηρίζεται στην αλόγιστη χρήση των ορυκτών πόρων [1], οι οποίοι είναι καταστροφικοί για το περιβάλλον και τους φυσικούς πόρους, καθώς και την ανθρώπινη υγεία [2]. Η παραγωγή ενέργειας κυριαρχεί ως πηγή εκπομπών CO2, CO και άλλων αερίων του θερμοκηπίου, με τον τομέα των μεταφορών να έχει μεγάλο μερίδιο της χρήσης ενέργειας, συνεισφέροντας το 25,8% των συνολικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου το 2015 [3]. Το ίδιο έτος η τελική τελική χρήση της ενέργειας χωρίζεται σε τρεις κύριες κατηγορίες, στον τομέα των μεταφορών με 33,1%, στα νοικοκυριά με 25,4% και στη βιομηχανία με 25,3% [4].

Μια εναλλακτική λύση, αποτελεί η αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, οι οποίες χαρακτηρίζονται από χαμηλές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO2), και το 2016 αντιπροσώπευαν το 17% της ενέργειας που καταναλώθηκε στην Ε.Ε. [3]. Η βιομάζα αποτελεί ένα ανανεώσιμο και υψηλής διαθεσιμότητας φυσικό πόρο, που δεν αυξάνει το CO_2 στην ατμόσφαιρα, έχοντας ποικίλες εφαρμογές ως πηγή ενέργειας [5]. Μέσω αυτής μπορούν να παραχθούν καύσιμα με σκοπό την κάλυψη ενεργειακών αναγκών του ανθρώπου σε θερμότητα, ηλεκτρική ενέργεια καθώς και καύσιμα κίνησης. Τα τελευταία χρόνια, οι παγκόσμιες προσπάθειες έρευνας και ανάπτυξης (R&D) εστιάζουν στην αξιοποίηση της βιομάζας στην παραγωγή υγρών καυσίμων και στην εξέλιξη των μεθόδων μετατροπής τους σε ενέργεια, καθώς και στην αύξηση της απόδοσης και της οικονομικότητας αυτών των διεργασιών [6, 2].

Ο όρος λοιπόν «βιοκαύσιμα» που χρησιμοποιείται, συμπεριλαμβάνει οτιδηπότε μπορεί να παράξει ενέργεια προερχόμενο από την αξιοποίηση της βιομάζας, περιλαμβάνοντας υγρά, στερεά και αέρια βιοκαύσιμα [7]. Σήμερα, παγκοσμίως τα υγρά βιοκαύσιμα και κυρίως το βιοντίζελ καλύπτει πολύ μεγάλο ποσοστό της συνολικής χρήσης βιοκαυσίμων, ακολουθούμενο από τη βιοαιθανόλη [5]. Ο στόχος για το 2030 για χρήση των ΑΠΕ στον τομέα των μεταφορών ορίζεται σε ποσοστό 14% [8], με το μερίδιο της τελικής κατανάλωσης ενέργειας στον τομέα των προηγμένων βιοκαυσίμων να φτάνει τουλάχιστον το 1% ως το 2025 και το 3,5 ως το 2030 (9). Ωστόσο, όσον αφορά τη μελλοντική ανάπτυξη του τομέα των βιοκαυσίμων, οι μείζονες ανησυχίες σχετίζονται με τις πολιτικές για το περιβάλλον και συγκεκριμένα με τα υποχρεωτικά επίπεδα αλλαγών, με τις επενδύσεις σε μη παραδοσιακές πρώτες ύλες βιοκαυσίμων καθώς και με τις αλλαγές στις φορολογικές απαλλαγές για τα βιοκαύσιμα [10]. Ένα πρόσθετο γεγονός που γεννά προβληματισμό, το οποίο έχει αναδείξει η επιστημονική κοινότητα και ο παγκόσμιος οργανισμός FAO, σχετίζεται με την ικανότητα του γεωργικού τομέα να παράξει επαρκή ποσότητα πρώτων υλών και υπολειμματικής βιομάζας, με σκοπό τη συμβολή στην κάλυψη της αυξανόμενης ζήτησης για βιοκαύσιμα σε παγκόσμιο επίπεδο, με τις κυβερνήσεις και τα ενδιαφερόμενα μέρη να ενθαρρύνουν τις εκτιμήσεις των ευκαιριών και των κινδύνων που σχετίζονται με την επισιτική ασφάλεια [11].

2. Παραγωγή υγρών καυσίμων από βιομάζα

2.1. Βιομάζα

Ως βιομάζα ορίζεται κάθε οργανική ύλη που προέρχεται άμεσα ή έμμεσα από το φυτικό κόσμο, τα ζωικά απόβλητα, καθώς και από τα φυτά από ενεργειακές φυτείες [12]. Οι ερευνητές χωρίζουν σε κατηγορίες τα διάφορα είδη βιομάζας με διαφορετικούς τρόπους, ωστόσο ένας απλός διαχωρισμός τους είναι σε ξυλώδη βιομάζα, βιομάζα ποοδών ή υδρόβιων φυτών και αστική βιομάζα (κοπριάς κτλ) [13]. Τα τελευταία χρόνια παγκοσμίως παρατηρείται έντονο ενδιαφέρον για τη χρήση της βιομάζας ως πηγής ενέργειας, λόγω των επιτευγμάτων της τεχνολογικής εξέλιξης που προβλέπουν ότι θα χρησιμοποιείται με μικρότερο κόστος και μεγαλύτερη απόδοση μετατροπής της πρώτης ύλης [13], των πλεονασμάτων τροφίμων μέσω του τομέα της γεωργίας, έχοντας οδηγήσει στην αξιοποίηση αυτών των προϊόντων και υπολειμμάτων [2], καθώς και της ολοένα αυξανόμενης απειλής από την κλιματική αλλαγή και της ανάγκης εύρεσης λύσεων στο πρόβλημα που δημιουργείται από αυτήν [14].

2.2. Βιοκαύσιμα

Η βιοενέργεια αναφέρεται στο ενεργειακό περιεχόμενο σε στερεά, υγρά και αέρια προϊόντα που προέρχονται από βιολογικές πρώτες ύλες [15, 16]. Πιο συγκεκριμένα περιλαμβάνει βιοκαύσιμα μεταφορών, στερεά βιοκαύσιμα για παραγωγή θερμότητας (pellets), καθώς και βιοαέριο που

παράγεται από την επεξεργασία βιολογικών υλικών από αστικά και βιομηχανικά απόβλητα. Σύμφωνα με την οδηγία 2003/30/ΕΚ της Ε.Ε., τα κράτη μέλη πρέπει να εξασφαλίζουν ότι διαθέτουν μια ελάχιστη αναλογία βιοκαυσίμων στις αγορές τους, [17] συμβάλλοντας στην προώθηση της χρήσης βιοκαυσίμων ή άλλων ανανεώσιμων καυσίμων για τις μεταφορές. Στο πλαίσιο του συστήματος αειφορίας της Ε.Ε. για τα βιοκαύσιμα και τα βιοερευστά (2010/C 160/01) [18], τα κριτήρια για τα βιοκαύσιμα που είτε παράγονται στην Ευρωπαϊκή Ένωση είτε είναι εισαγόμενα καθορίζονται στην οδηγία για την ποιότητα των καυσίμων 98/70/ΕΚ όπως τροποποιήθηκε με την οδηγία 2009/30/ΕΚ [19]. Η παραγωγή βιοκαυσίμων μεταφορών αυξήθηκε κατά 6% σε ετήσια βάση το 2019 και αναμένεται να έχει ετήσια αύξηση 3% τα επόμενα πέντε χρόνια [20]. Ανάλογα με την πηγή της πρώτης ύλης, τα βιοκαύσιμα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

2.2.1. Βιοκαύσιμα 1ης γενιάς

Ονομάζονται τα βιοκαύσιμα τα οποία προέρχονται από συμβατικές ή ενεργειακές καλλιέργειες, με υψηλή περιεκτικότητα σε άμυλο και ζάχαρη όπως το ζαχαροκάλαμο και το καλαμπόκι για την παραγωγή αιθανόλης και ελαιούχοι σπόροι για την παραγωγή βιοντίζελ [21]. Παρόλο που τα βιοκαύσιμα πρώτης γενιάς έχουν διατεθεί στο εμπόριο παγκοσμίως, η βιωσιμότητά τους έχει αμφισβητηθεί [10]. Αυτό συμβαίνει καθότι οι διαδικασίες αντικατάστασης του πετρελαίου και μετριασμού της κλιματικής αλλαγής περιορίζονται από τον ανταγωνισμό για τη γη και το νερό που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή τροφίμων, καθώς και το υψηλό κόστος παραγωγής και επεξεργασίας των βιοκαυσίμων αυτών που απαιτούν διάφορες κρατικές επιχορηγήσεις [22].

2.2.2. Βιοκαύσιμα 2ης γενιάς

Οι εξακριβωμένες αυτές επιπτώσεις προκάλεσαν το ενδιαφέρον για την ανάπτυξη βιοκαυσίμων δεύτερης γενιάς, τα οποία παράγονται από μη εδώδιμη βιομάζα [23]. Τα βιοκαύσιμα αυτά παράγονται από υπολείμματα, απόβλητα και κυρίως από πρώτες ύλες λιγκοκυτταρινικής φύσης [24], όπως τα φύλλα, ο φλοιός δέντρων και το στάχυ [23]. Βασικά προτερήματά τους, η χρήση πολλών και διαφορετικών πρώτων υλών βιομάζας, χωρίς να ανταγωνίζονται την παραγωγή τροφίμων, το χαμηλό κόστος των πρώτων υλών, καθώς και η ισορροπία στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Η αιθανόλη της κυτταρίνης θα μπορούσε να παράγει 75% λιγότερο CO_2 από τη συμβατική βενζίνη σε σχέση με την αιθανόλη του ζαχαροκάλαμου που μειώνει τα επίπεδα του CO_2 κατά 60% [25].

2.2.3. Βιοκαύσιμα 3ης γενιάς

Τα βιοκαύσιμα 3ης γενιάς προέρχονται από μη καλλιεργήσιμη γη, όπως η άλγη [25], αναπτυσσόμενη γρήγορα σε αλατούχα νερά, παράκτια θαλάσσια ύδατα και αστικά λύματα [26]. Έχει διαπιστωθεί ότι μπορούν να παράξουν πολύ μεγάλο ποσοστό ενέργειας και μέσω αυτών παράγονται βιοκαύσιμα και πολύτιμα χημικά προϊόντα [15]. Συγκεκριμένα, μετατρέπουν το φως και το διοξείδιο του άνθρακα σε υδατάνθρακες και χρωστικές ουσίες που βρίσκουν εφαρμογή στη χημική και φαρμακευτική βιομηχανία, στην υγιεινή διατροφή και στα συμπληρώματα ζωοτροφών [15]. Τέλος έχουν περιβαλλοντικό χαρακτήρα, αφού δε χρειάζονται φυτόφαρμακα ή γλυκό νερό για να αναπτυχθούν [27].

2.2.4. Βιοκαύσιμα 4ης γενιάς

Οι τεχνολογίες για την παραγωγή βιοκαυσίμων ολοένα και βελτιώνονται, με την εταιρεία Synthetic Genomics να χρησιμοποιεί γενετικά τροποποιημένους οργανισμούς για την παραγωγή βιοκαυσίμων απευθείας από διοξείδιο του άνθρακα σε μεγάλη κλίμακα [8]. Τα βιοκαύσιμα 4ης γενιάς προέρχονται από γενετικά τροποποιημένες καλλιέργειες, οι οποίες καταναλώνουν περισσότερο CO_2 από την ατμόσφαιρα απ' ότι απελευθερώνουν στη διάρκεια της καύσης, καθιστώντας τα καύσιμα με αρνητικό αποτύπωμα άνθρακα. Συγκεκριμένα, βασίζονται σε μικροοργανισμούς και θεωρούνται πιο αναβαθμισμένα, όσον αφορά τη βιωσιμότητα τους, παρότι είναι ακόμη μακριά από την εμπορευματοποίηση [27]. Στην ουσία τα βιοκαύσιμα αυτά βρίσκονται ακόμα σε εννοιολογικό στάδιο.

2.3. Βιοντίζελ

Βιοντίζελ ονομάζεται το βιοκαύσιμο που παράγεται μέσω της διαδικασίας της μετεστεροποίησης, από μια ποικιλία ανανεώσιμων βιολογικών ειδών, όπως το ζαχαροκάλαμο καθώς και από υδατικά είδη όπως η άλγη [28]. Παρουσιάζει πλεονεκτήματα όπως η υψηλότερη ποσότητα οξυγόνου που οδηγεί σε καθαρότερη καύση [29], η βιοαποικοδομησιμότητά του, συμβάλλοντας στη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και το θετικό ενεργειακό του ισοζύγιο [30], έχοντας και κάποια μειονεκτήματα όπως είναι το υψηλότερο κόστος σε σχέση με το συμβατικό ντίζελ [30], η υψηλότερη εκπομπή οξειδίων του αζώτου (NOx) από τους πετρελαιοκινητήτες [31], καθώς και η χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα, το οποίο όμως αντισταθμίζεται από το μεγάλο αριθμό κετανίων που παρουσιάζει [31].

2.3.1. Ιστορική αναδρομή

Η πρώτη αναφορά του βιοντίζελ έγινε το 1893, με την κατασκευή του κινητήρα ντίζελ από τον Rudolf Diesel, ο οποίος χρησιμοποίησε λάδι από καρπό, και συγκεκριμένα φυστικέλαιο [32]. Σήμερα χρησιμοποιείται κυρίως σε συνδυασμό με το κοινό ντίζελ [33] και όταν η αναλογία είναι χαμηλή, δηλαδή με ποσοστό 5% έως 20% βιοντίζελ, τότε δεν απαιτούνται τροποποιήσεις στους κινητήρες. Για υψηλότερα ποσοστά ή για καθαρή χρήση βιοντίζελ απαιτούνται τροποποιήσεις σε παλαιότερους κινητήρες. Η εμπορική ονομασία του καθαρού βιοντίζελ είναι το B100. Το πιο ευρέως γνωστό βιοντίζελ είναι το B20, το οποίο περιλαμβάνει 20% βιοντίζελ και 80% πετροντίζελ, αντιπροσωπεύοντας μια καλή ισορροπία κόστους, εκπομπών αερίων και συμβατότητας υλικών [34].

2.3.2. Διαδικασία παραγωγής

Το βιοντίζελ αποτελείται κυρίως από αλκυλικούς εστέρες λιπαρών οξέων, οι οποίοι παράγονται μέσω της εστεροποίησης και στο τέλος μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε ως μείγμα με ορυκτά καύσιμα ντίζελ ή και μόνοι τους. Μέχρι τις δύο τελευταίες δεκαετίες, οι περισσότερες μελέτες για την εστεροποίηση έχουν γίνει με υδροξείδιο του νατρίου (NAOH) ή υδροξείδιο του καλίου (KOH) ως καταλύτες σε βρώσιμα έλαια με χρήση μεθανόλης [8]. Πιο συγκεκριμένα η παραγωγή βιοντίζελ πραγματοποιείται μέσω χημικής αντίδρασης φυτικών ελαίων ή ζωϊκών λίπων με αλκοόλες, όπως η μεθανόλη [29]. Σήμερα η παραγωγή βιοντίζελ στηρίζεται κυρίως στην αντίδραση της μετεστεροποίησης, στην οποία τα τριγλυκερίδια αντιδρούν για να σχηματιστούν εστέρες λιπαρών οξέων (βιοντίζελ) και γλυκερίνη [28]. Η αντίδραση πραγματοποιείται με ή χωρίς παρουσία καταλύτη.

2.3.3. Πρώτες ύλες για την παραγωγή βιοντίζελ

Τα τελευταία χρόνια, το βιοντίζελ έχει παραχθεί από διάφορες πηγές όπως είναι τα φυτικά έλαια, τα ζωικά λίπη, τα αποθέματα σαπουνιού και τα ανακυκλωμένα λάδια τηγανίσματος. Για να επιλεχθεί το κατάλληλο φυτικό έλαιο για την παραγωγή βιοντίζελ πρέπει να ληφθούν υπόψη παράγοντες όπως το κλίμα, η γεωγραφία καθώς και το οικονομικό κόστος [28]. Τα ενεργειακά ή ελαιούχα φυτά που χρησιμοποιούνται κυρίως για παραγωγή βιοντίζελ είναι η ελαιοκράμβη, ο ηλίανθος και η σόγια [31], με την ελαιοκράμβη να αντιπροσωπεύει περίπου το 85% της παραγωγής βιοντίζελ στον ευρωπαϊκό χώρο [35], και με τον ηλίανθο, ανήκωντας στην οικογένεια *Asteracea,* να αποτελεί σήμερα την 5^{η} πιο σημαντική πηγή βρώσιμου ελαίου μετά από σόγια, ελαιοκράμβη, βαμβάκι και φυστίκι [36]. Η σόγια είναι μία μονοετής καλλιέργεια που ανήκει στην οικογένεια των ψυχανθών, αποτελώντας τη 2^{η} μεγαλύτερη μετά το καλαμπόκι σοδειά των ΗΠΑ [33]. Τα ζωϊκά λίπη είναι σχετικά φθηνά συμπαράγωγα των αντίστοιχων βιομηχανιών τους, όπου μόνο το λίπος χρησιμοποιείται σε σημαντικές ποσότητες σε μη εδώδιμες εφαρμογές [37]. Ένα σημαντικό μειονέκτημα του παραγόμενου βιοντίζελ από ζωικά λίπη είναι ότι έχει χαμηλές ιδιότητες σε ψυχρές θερμοκρασίες, κάτι που μπορεί να βελτιωθεί μέσω του διαχωρισμό του λίπους στα συστατικά του [38, 37]. Τέλος, το χρησιμοποιούμενο μαγειρικό λάδι (ηλιέλαιο, φοινικέλαιο και λάδι καρύδας) είναι ένα απόβλητο υψηλής αξίας, έχοντας επίσης και χαμηλό κόστος [39]. Παράδειγμα αποτελεί η συλλογή και επαναχρησιμοποίηση τηγανέλαιων στο κατάστημα McDiesel στην Αυστρία, το οποίο πήρε το όνομα του από την αλυσίδα εστιατορίων McDonald's [33]. Σήμερα το 77% του βιοντίζελ βασίζεται σε φυτικά έλαια (30% σογιέλαιο, 25% ελαιόλαδο, 18% κραμβέλαιο) ή σε ανακυκλωμένα μαγειρικά έλαια [10].

2.4. Βιοαιθανόλη

Αποτελώντας το πρώτο καύσιμο που χρησιμοποιήθηκε ως υποκατάστατο της βενζίνης στα οχήματα, η βιοαιθανόλη γνωστή και ως αιθυλική αλκοόλη (C_2H_5OH), μπορεί να χρησιμοποιηθεί αμιγώς ή αναμειγμένη με βενζίνη [40]. Ιστορικά η χρήση της ξεκίνησε από τη Βραζιλία το 1925, ενώ στη Γερμανία και στη Γαλλία το 1984 σε κινητήρες εσωτερικής καύσης (ICEs). Η παγκόσμια παραγωγή αιθανόλης αναμένεται να επεκταθεί από 116 δισεκατομμύρια λίτρα το 2015 σε 128,4 δισεκατομμύρια λίτρα έως το 2025 [41], με το ήμισυ αυτής της ανάπτυξης να προέρχεται από τη Βραζιλία [41]. Παρουσιάζει διάφορα πλεονεκτήματα όπως η βιοαποικοδομησιμότητα της, οι λίγοι ατμοσφαιρικοί ρύποι που παράγει, ο υψηλότερος αριθμός οκτανίων και η εύκολη καύση της [42], αλλά και κάποια μειονεκτήματα όπως η διαβρωσιμότητα και η τοξικότητα της στα οικοσυστήματα λόγω των πρώτων της υλών [43]. Το πιο συνηθισμένο μίγμα αποτελείται από 10% αιθανόλη και 90% βενζίνη (E10). Σήμερα, περίπου το 60% της αιθανόλης παράγεται από αραβόσιτο, 25% από ζαχαροκάλαμο, 7% από μελάσα, 4% από σιτάρι [10] και το υπόλοιπο από άλλα είδη, όπως τα ζαχαρότευτλα και η βρώμη [45]. Όπως και τα βιοκαύσιμα έτσι και η βιοαιθανόλη διακρίνεται σε 1^{ης}, 2^{ης} και 3^{ης} γενιάς.

2.4.1. Βιοαιθανόλη 1ης γενιάς

Η βιοαιθανόλη 1ης γενιάς περιλαμβάνει αποθέματα ζωοτροφών πλούσια σε σακχαρόζη και άμυλο, τα οποία δημιουργούν ροές αποβλήτων, αντιπροσωπεύοντας μια πηγή για περαιτέρω αξιοποίηση [44]. Η διαδικασία παραγωγής αιθανόλης γίνεται μέσω της αλκοολικής ζύμωσης, όπου όταν σαν πρώτες ύλες χρησιμοποιούνται το ζαχαροκάλαμο ή το γλυκό σόργο, απαιτείται θρυμματισμός των καλαμιών τους, [44], ενώ με τα σιτηρά για να γίνει η υδρόλυση του αμύλου σε σάκχαρα χρειάζεται προσθήκη ενζύμων όπως οι αμυλάσες [46]. Η παραγωγή αιθανόλης προβλέπεται να χρησιμοποιεί έως 14% και 24% της παγκόσμιας παραγωγής αραβοσίτου και ζαχαροκάλαμου αντίστοιχα έως το 2028 [10].

2.4.2. Βιοαιθανόλη 2ης γενιάς

Η βιοαιθανόλη 2ης γενιάς προέρχεται από λιγνοκυτταρινούχα βιομάζα, όπου λόγω της πολυπλοκότητας της, αρχικά γίνεται προκατεργασία της α' ύλης για την τροποποίηση της δομής της κυτταρίνης [47, 48] και έπειτα οι υδρογονάνθρακες που υπάρχουν στη βιομάζα αυτή μετατρέπονται σε μονομερή ζυμώσιμα σάκχαρα με τη βοήθεια ενζύμων. Η διαδιακασία αυτή ονομάζεται ενζυματική υδρόλυση [48]. Η αεροπορική εταιρεία Alaska Airlines αξιοποίησε ζωοτροφές πλούσιες σε άμυλο καθώς και ξυλώδη βιομάζα για παραγωγή υγρών βιοκαυσίμων και το 2016 στην έκθεση της 'Honoring the planet" ανέφερε ότι η πτήση που βασίστηκε στην αξιοποίηση των δασικών υπολειμμάτων είχε ως αποτέλεσμα την εκπομπή 70% λιγότερο CO_2 απ΄ότι το συμβατικό πετρέλαιο [49].

2.4.3. Βιοαιθανόλη 3ης γενιάς

Η βιοαιθανόλη 3ης γενιάς προέρχεται από υδρόβια βιομάζα [50] και συγκεκριμένα από φυκώδης βιομάζα, συμπεριλαμβανομένων των μικροφυκών και των μακροφυκών [51]. Τα σημαντικά πλεονεκτήματα αυτής της βιομάζας είναι η ικανότητα χρήσης ηλιακής ενέργειας και CO_2, καθώς και η συσσώρευση μεγάλων ποσοτήτων αμύλου [52, 50]. Μέχρι τώρα τα είδη άλγης που είναι προτιμητέα για την παραγωγή βιοαιθανόλης είναι τα εξής τα εξής: *sargassum, gracilaria verrucosa, prymnesium parvum* και *euglena gracilis*, με την αξιοποίηση του κόκκινου άλγους του *gracilaria verrucose* να φαίνεται να είναι εμπορικά βιώσιμη [53].

2.5. Διεθνή και ευρωπαϊκά πρότυπα-πιστοποιήσεις

Τα τελευταία χρόνια ένας μεγάλος αριθμός εθνικών και διεθνών προτύπων έχει γνωρίσει ταχεία ανάπτυξη ενόψει των στόχων για τα βιοκαύσιμα και τη βιοενέργεια που ανακοινώθηκαν στην Ευρωπαϊκή Ένωση, στις Ηνωμένες Πολιτείες και σε άλλες χώρες παγκοσμίως. Οι πιο ευρέως γνωστοί ευρωπαϊκοί οργανισμοί προτύπων για τα υγρά βιοκαύσιμα είναι ο CEN και ο ISO.

2.5.1. ISO (International Organization for Standardization)

Όντας ένας ανεξάρτητος, μη κυβερνητικός διεθνής οργανισμός, ο ISO έχει γνωστοποιήσει συστήματα πιστοποίησης για καλλιέργειες που χρησιμοποιούνται ως πρώτη ύλη για παραγωγή υγρών βιοκαυσίμων, για την κάλυψη της παραγωγής και χρήσης αυτών [54]. Η κατηγορία του ISO/TC SC/28 7 που έχει ως σκοπό την ταξινόμηση βάσει προδιαγραφών για τα υγρά βιοκαύσιμα καθώς και την ανάλυση για τα καθαρά υγρά βιοκαύσιμα, περιλαμβάνει τα εξής δημοσιευμένα πρότυπα [55]:

Πίνακας 1: 5 δημοσιευμένα πρότυπα του ISO/TC/SC28 7 για τα υγρά βιοκαύσιμα (ISO,2019)

ISO/TS 17306	Petroleum products -Biodiesel - Determination of free and total glycerin and mono-, di- and tracylglycerols by gas chromatography
ISO/TS 17307	Petroleum products - Biodiesel - Determination of total esters content by gas chromatography
ISO/TS 17308	Petroleum products and other liquids - Ethanol -Determination of electrical conductivity
ISO/TS 17315	Petroleum products and other liquids -Ethanol - Determination of total acidity by potentiometric titration
ISO/TS 20424	Fatty acid methyl esters (FAME)-Determination of sulfur content Inductively coupled plasma optical emission spectrometry method

Τα 5 παραπάνω πρότυπα καθορίζουν μεθοδολογίες για τον ποσοτικό προσδιορισμό της ελεύθερης γλυκερίνης σε βιοντίζελ που παράγεται από πρώτες ύλες, όπως καρύδα, φοινικέλαιο και ζωικά λίπη, της συνολικής περιεκτικότητας μεθυλεστέρα σε μεθυλεστέρα λιπαρών οξέων (FAME) με αέρια χρωματογραφία, καθώς και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε καύσιμα και μείγματα αιθανόλης.

Επιπλεόν επισημαίνουν μια μέθοδο δοκιμής για τον προσδιορισμό της ολικής οξύτητας της αιθανόλης, που συμβάλλει στον έλεγχο ποιότητας του τελικού προϊόντος για την αποφυγή προβλημάτων διάβρωσης, καθώς και του επιπέδου θείου σε μεθυλεστέρα λιπαρού οξέος (FAME), που προέρχεται συγκεκριμένα από σογιέλαιο ή ζωϊκό λίπος και στη συνέχεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καθαρό καύσιμο ή ως συστατικό μείγματος [55].

2.5.2. *CEN (Comite Europeen de normalization)*

Το έργο της επιτροπής αυτής εκτελείται από την τεχνική επιτροπή CEN/TC 19 [56], η οποία αποτελείται από τη βιομηχανία καυσίμων, τους παραγωγούς βιοκαυσίμων και άλλους ενδιαφερόμενους, με το πρώτο ευρωπαϊκό πρότυπο για τη χρήση βιοαιθανόλης να ήταν το prEN 15376 «Καύσιμα αυτοκινήτων-Αιθανόλη ως συστατικό ανάμειξης με βενζίνη» [57]. Το 1997 στα πλαίσια της αυξημένης ζήτησης για ένα πρότυπο σχετικά με τη χρήση καθαρής αιθανόλης σε κινητήρες ντίζελ, γνωστοποίηθηκε το σουηδικό πρότυπο SS 155437, το οποίο εκτός από αιθανόλη περιέχει και μεθανόλη [58]. Οι προδιαγραφές αυτού του προτύπου αφορούν χαρακτηριστικά όπως η ελάχιστη περιεκτικότητα σε αλκοόλη %, το ποσοστό τέφρας %, η περιεκτικότητα σε νερό %, το ποσοστό περιεχόμενων αλδεϋδών και εστέρων κ.α. [57]. Άλλα σχετικά ευρωπαϊκά πρότυπα είναι το EN590 (Biodiesel), EN14214 (FAME), αποτελώντας το ισχύον πρότυπο για το biodiesel, EN228 και το EN15376 (Bioethanol) [59]. Το 2012 ένα νέο πρότυπο το EN16214 αναπτύχθηκε από τη CEN/TC 383 σχετικά με τη βιώσιμη παραγωγή βιομάζας για ενεργειακές εφαρμογές [59].

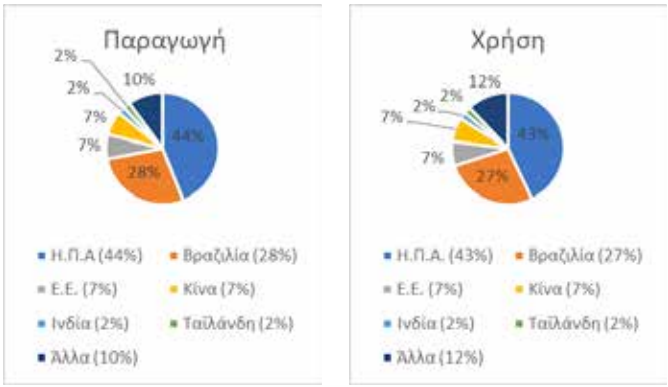
Πίνακας 2: Αρχές, κριτήρια και δείκτες για το ευρωπαϊκό πρότυπο EN16214

• EN16214-1→ Sustainably produced biomass for energy applications- Part 1: Terminology
• EN16214-2→ Sustainably produced biomass for energy applications- Part2: Conformity assessment including chain of custody and mass balance
• EN16214-3→ Sustainably produced biomass for energy applications- Part3: Biodiversity and environmental aspects related to nature protection purposes
• EN16214-4→ Sustainably produced biomass for energy applications- Part4: Calculation methods of the greenhouse gas emission balance using a life cycle analysis

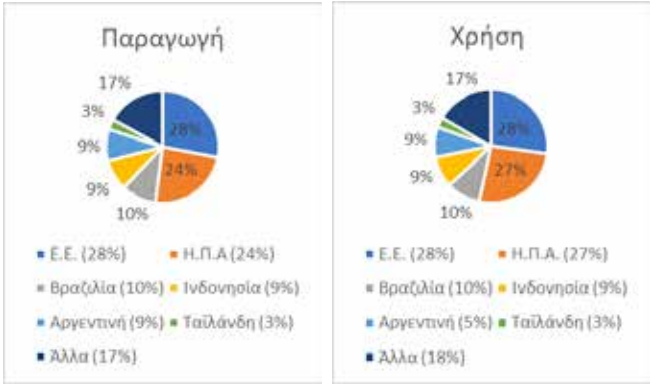
Το συγκεκριμένο Ευρωπαϊκό πρότυπο εξετάζει σχετικούς όρους και ορισμούς που χρησιμοποιούνται σε οδηγίες όπως η οδηγία για την ποιότητα καυσίμων (2009/30/ΕΚ) της Ευρωπαϊκής Επιτροπής και καθορίζει ένα σύνολο κανόνων και απαιτήσεων για την αξιολόγηση της συμμόρφωσης των βιοκαυσίμων και των βιορευστών με τα κριτήρια βιωσιμότητας [60]. Επιπλέον ορίζει κριτήρια και δείκτες για την παροχή αποδεικτικών στοιχείων από οικονομικούς φορείς ότι η παραγωγή, η καλλιέργεια και η συγκομιδή πρώτων υλών είναι σύμφωνη με τις νομικές ή άλλες απαιτήσεις που αφορούν περιοχές για σκοπούς προστασίας της φύσης. Τέλος καθορίζεται μια αναλυτική μεθοδολογία που δίνει τη δυνατότητα σε οικονομικούς φορείς αλυσιδών βιοκαυσίμων ή βιορευστών να υπολογίσουν τις πραγματικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου που σχετίζονται με τις δραστηριότητές τους, με διαφανή τρόπο, λογοδοτώντας για την κατανάλωση θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας [60].

2.6. Παραγωγή υγρών βιοκαυσίμων σε Ελλάδα και Ε.Ε.

Η Ευρώπη κυριαρχεί στην παραγωγή βιοντίζελ παγκοσμίως, ενώ το 2017 οι ΗΠΑ, η Βραζιλία και η Κίνα αποτελέσαν τους μεγαλύτερους καταναλωτές βιοκαυσίμων. Το 2015 καταγράφηκε μερίδιο 6% της ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές και το βιοντίζελ και η βιοαιθανόλη κάλυψαν ποσοστό 79% και 20% αντίστοιχα της συνολικής χρήσης βιοκαυσίμων. Για εκείνο το έτος το βιοντίζελ καταναλώθηκε σε μεγαλύτερο βαθμό στη Γαλλία, στη Γερμανία και στην Ιταλία και η βιοαιθανόλη στη Γερμανία, στο Ηνωμένο Βασίλειο και στη Γαλλία [61]. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, η παραγωγή βιοντίζελ είχε εκτιμηθεί να φτάσει στο μέγιστό της το 2020 με 12,6 δισ. λίτρα, εξίσου και η κατανάλωση του αυξανόμενη από 12 δισ. λίτρα το 2015 σε 13 δισ. λίτρα το 2020, με προβλεπόμενη μείωση μέχρι το 2025 στα 11,6 δισ. λίτρα [62]. Η παραγωγή 1^{ης} γενιάς βιοαιθανόλης για καύσιμα αναμενόταν εξίσου να φθάσει το ανώτατο όριο των 9,7 δισ. λίτρων το 2020, με προβλέψεις μείωσης της σε 9,3 δισ. λίτρα μέχρι το 2025. Το μέσο μερίδιο όγκου δε αιθανόλης στη βενζίνη είχε εκτιμηθεί ότι θα φτάσει το 7,8% μέχρι το 2020 και θα πέσει στο 7% μέχρι το 2025 [62]. Στα παρακάτω 4 σχήματα απεικονίζονται οι προβλεπόμενες κατανομές παραγωγής και χρήσης της βιοαιθανόλης και του βιοντίζελ έως το 2025 σε παγκόσμιο επίπεδο, με την Ευρώπη να παράγει και να καταναλώνει μεγαλύτερα ποσοστά βιοντίζελ σε σύγκριση με τη βιοαιθανόλη.



Σχήματα 1 και 2: Κατανομές παγκόσμιας παραγωγής και χρήσης βιοαιθανόλης το 2025. "OECD-FAO Agricultural Outlook", Agriculture statistics (database)



Σχήματα 3 και 4: Κατανομές παγκόσμιας παραγωγής και χρήσης βιοντίζελ το 2025. "OECD-FAO Agricultural Outlook", OECD Agriculture statistics (database)

Η πολιτική για τα βιοκαύσιμα στην Ελλάδα συμβαδίζει με αυτή της Ευρωπαϊκής Ένωσης, ενισχύοντας τη διείσδυση των ΑΠΕ, στηρίζοντας την ελληνική οικονομία και τονώνοντας τη δημιουργία θέσεων εργασίας, με την αγορά να έχει σταφεί στα βιοκαύσιμα 2^{ης} γενιάς [24]. Στην Ελλάδα υπάρχει ένα σημαντικό δυναμικό ενεργειακών καλλιεργειών για παραγωγή υγρών βιοκαυσίμων, όπως ελαιοκράμβη, ηλίανθος, κριθάρι και αραβόσιτος, δημιουργώντας προϋποθέσεις για κερδοφόρες επενδύσεις [24]. Λόγω της έλλειψης παραγωγής βιοαιθανόλης σε εγχώριο επίπεδο, το μόνο καύσιμο αυτοκινητών με βιοκαύσιμα που διατίθεται στην ελληνική αγορά είναι ένα μίγμα βιοντίζελ (7%), το Fatty Acid Methyl Ester (FAME) με ντίζελ [63]. Η τρέχουσα διείσδυση βιοκαυσίμων, προερχόμενη από το βιοντίζελ 1ης γενιάς (FAME), αντιστοιχεί μόνο στο 2,2% της αγοράς καυσίμων μεταφορών. Τα βιοκαύσιμα επόμενης γενιάς δεν παράγονται σε βιομηχανική κλίμακα αλλά σε μικρές ποσότητες στο πλαίσιο ερευνητικών προγραμμάτων και βιομηχανικών συνεργασιών με τα ερευνητικά ιδρύματα [64, 63]. Το γεγονός αυτό έρχεται σε αντίθεση με το ότι περίπου μόνο το 40% των συνολικών πόρων 2^{ης} γενιάς απαιτούνται για την κάλυψη της προβλεπόμενης μέσης ζήτησης βιοκαυσίμων για το 2030 [24].

2.7. Προσπάθεια ερευνητών για βελτίωση της ποιότητας των υγρών βιοκαυσίμων

Τα κριτήρια βιωσιμότητας, που καθιερώθηκαν το 2019, απαιτούν από τα κράτη μέλη της Ε.Ε. να μειώσουν τα βιοκαύσιμα «υψηλού κινδύνου ILUC» από το 2024, φθάνοντας στο μηδέν έως το 2030. Τα στατιστικά στοιχεία της Ε.Ε. για τη χρήση καυσίμων μεταφορών, συνδυαστικά με το ανώτατο όριο

7% για τα συμβατικά βιοκαύσιμα οδηγούν σε μέγιστη κατανάλωση συμβατικών και προηγμένων βιοκαυσίμων περίπου 23.000 τόνους το 2022 και 21.000 τόνους το 2030 [65]. Ωστόσο, τα κράτη μέλη μπορούν να θέσουν όρια κάτω από το 7% για τη συμβολή βιοκαυσίμων με βάση τα τρόφιμα [10]. Τα κύρια κομμάτια της νομοθεσίας της Ε.Ε. για τη μελλοντική αγορά βιοκαυσίμων, συνδυαστικά με βασικές διατάξεις της οδηγίας ΙΙ για τις ΑΠΕ (RED II) [66] παρατίθονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4: Διατάξεις της οδηγίας ΙΙ για τις ΑΠΕ (RED II) 2018/2001

• Επιβεβαίωση του στόχου της Ε.Ε. για μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά 40% έως το 2030 σε σύγκριση με το 1990
• Στόχος για ποσοστό 32% για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έως το 2030 σε σχέση με τη συνολική τελική κατανάλωση ενέργειας.
• Τα βιοκαύσιμα υψηλού κινδύνου (ILUC) περιορίζονται στο επίπεδο κατανάλωσης του 2019 και θα καταργηθούν έως το 2030. Ορισμός των πρώτων υλών / βιοκαυσίμων χαμηλού και υψηλού κινδύνου ILUC μέχρι το 2023.
• Νέα και προσαρμοσμένα κριτήρια αειφορίας και εξοικονόμησης εκπομπών αερίων θερμοκηπίου θα προκύψουν στο άμεσο μέλλον για τα βιοκαύσιμα.
• Η εντολή για τα προηγμένα βιοκαύσιμα θα οριστεί σε 0,2% το 2022 και θα αυξηθεί στο 3,5% έως το 2030, σε αντίθεση με τα συμβατικά βιοκαύσιμα (με βάση τα τρόφιμα) για τα οποία έχει οριστεί ανώτατο όριο 7%

Μέσω της οδηγίας RED II προωθείται η παραγωγή βιοκαυσίμων από μη τροφικές λιγνοκυτταρινούχες καλλιέργειες, μέσω της αξιοποίησης γεωργικών εκτάσεων ή της διαδοχικής καλλιέργειας φυτών στο ίδιο χωράφι σε περιοχές χαμηλού κινδύνου έμμεσης αλλαγής χρήσης γης [67]. Παράδειγμα αποτελεί το ευρωπαϊκό έργο BIKE, χρηματοδοτούμενο από το πρόγραμμα «Ορίζοντας 2020» της Ε.Ε., έχοντας διάρκεια από το 2020 έως το 2023 [68]. Στοχεύει στην οργάνωση των αλυσιδών παραγωγής βιοκαυσίμων που έχουν χαμηλό κίνδυνο για αλλαγή χρήσης γης, καθώς και στην ενημέρωση της μελλοντικής πολιτικής και λήψης αποφάσεων. Οι αλυσίδες αξίας που χρησιμοποιούνται για το έργο αυτό, προωθώντας την οικονομικά και περιβαλλοντικά βιώσιμη παραγωγή βιοκαυσίμων [69] είναι:

- Αλυσίδα αξίας τύπου 1: Καλλιέργεια ρίκινου (*Ricinus communis*) σε αχρησιμοποίητες ή υποβαθμισμένες εκτάσεις για παραγωγή καστορέλαιου (*Castol oil*) στην Ιταλία, την Τυνησία και την Ελλάδα, καθώς και λιγνοκυτταρινούχες καλλιέργειες για προηγμένα βιοκαύσιμα στην Ιταλία, την Ελλάδα και το Ηνωμένο Βασίλειο.
- Αλυσίδα αξίας τύπου 2: Καλλιέργεια του ανθοφόρου φυτού *brassica carinata* ως ελαιοκαλλιέργεια για την παραγωγή ανανεώσιμου ντίζελ στην Ιταλία, στην Τυνησία στην Ελλάδα και στην Ουρουγουάη, καθώς και παραγωγή βιομεθανίου από ζωικά απόβλητα και καλλιέργειες κάλυψης, που καλλιεργούνται σε εναλλαγή με καλλιέργειες τροφίμων (κυρίως για βιοαέριο) και η περαιτέρω μετατροπή του σε ντίζελ και μεθανόλη.

Για την καλύτερη λοιπόν κατανόηση των διάφορων παραγόντων που επηρεάζουν την ανάπτυξη της αγοράς των βιοκαυσίμων χαμηλού κινδύνου απαιτείται λεπτομερής τεχνο-οικονομική ανάλυση και μοντελοποίηση της εφοδιαστικής αλυσίδας κάθε τόπου [22].

3. ΣΥΖΗΤΗΣΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα τελευταία χρόνια στο επίκεντρο του παγκοσμίου ενδιαφέροντος βρίσκεται η αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών για παραγωγή ενέργειας, όπως της βιομάζας για καύσιμα μεταφορών. Πρόσφατες έρευνες απέδειξαν ότι το βιοντίζελ μπορεί να ενσωματωθεί ως μια επίκαιρη και βιώσιμη λύση για την αυτοκινητοβιομηχανία και το βιομηχανικό τομέα. Σημαντικό ρόλο στη γνωστοποίηση και στην αυξανόμενη παραγωγή και χρήση των υγρών βιοκαυσίμων, έχει παίξει η εγκαθίδρυση διεθνών και ευρωπαϊκών προτύπων για αυτά, ταξινομώντας τα διάφορα χαρακτηριστικά και τους συνδυασμούς τους. Η Ευρώπη αναμένεται να συνεχίσει να είναι ο κύριος παραγωγός και καταναλωτής βιοντίζελ μέχρι και το 2025, ενώ η βιοαιθανόλη προτιμάται πιο πολύ στις ΗΠΑ.

Ωστόσο, η παραγωγή βιοντίζελ έρχεται αντιμέτωπη με την περιορισμένη προσφορά φυτικού ελαίου, ανταγωνιζόμενη άμεσα τη ζήτηση για παραγωγή τροφίμων και η παραγωγή αιθανόλης διαταράσσει τον τομέα του ζαχαροκάλαμου, λόγω του κυκλικού χαρακτήρα παραγωγής του. Ενώ τέτοιες προκλήσεις θα μπορούσαν να αντιμετωπιστούν με τη στροφή στα προηγμένα βιοκαύσιμα που δε βασίζονται σε παραδοσιακά γεωργικά προϊόντα ως πρώτη ύλη [10], η αύξηση της ικανότητας

επεξεργασίας παραμένει αβέβαιη. Στο άμεσο μέλλον, προβλέπεται μείωση της συνολικής ζήτησης καυσίμων, κυρίως του βιοντίζελ στην Ευρώπη και στις ΗΠΑ, υποδηλώνοντας περιορισμένη αύξηση της κατανάλωσης βιοκαυσίμων συνολικά. Παρόλο αυτά, η έρευνα προς αναζήτηση νέων πηγών πρώτης ύλης είναι αναγκαία για την πληρέστερη αξιοποίηση των βιοκαυσίμων, με την οδηγία για τις ΑΠΕ (REDII) και την οδηγία για την ποιότητα των καυσίμων να αποτελούν βασικά κομμάτια της νομοθεσίας της Ε.Ε. για την ανάπτυξη της αγοράς βιοκαυσίμων από το 2009 [10]. Στην Ελλάδα η ερευνητική κοινότητα έχει στραφεί προς τις νέες τεχνολογίες που χρησιμοποιούν λιγνοκυτταρινική βιομάζα, οι οποίες αποσκοπούν στην κάλυψη της ζήτησης βιοκαυσίμων από εγχώριους πόρους, εστιάζοντας στη σημαντικότητα της παροχής κινήτρων από τις κυβερνήσεις για επενδύσεις στον τομέα των βιοκαυσίμων. Πρωτοβουλίες όπως το Ευρωπαϊκό έργο BIKE στοχεύουν στην εκμετάλλευση της αχρησιμοποίητης γης, δημιουργώντας νέες ευκαιρίες για τους ανθρώπους που ζουν σε αγροτικές περιοχές. Συνεπώς, η επιλογή των αλυσιδών αξίας βιομάζας, που ενσωματώνονται στη διαδικασία μετάβασης στα βιοκαύσιμα επόμενης γενιάς, στοχεύοντας στη μελλοντική λήψη αποφάσεων, έχει αποδειχθεί μείζονος σημασίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Elliott, Douglas C. (2013) Transportation fuels from biomass via fast pyrolysis and hydroprocessing. Wiley Online Library, 2(5), 525-533.

[2] Tock Laurence, Gassner Martin & Marechal Francois (2010) Thermochemical production of liquid fuels from biomass: Thermo-economic modelling process design and process integration analysis. Biomass and Bioenergy, 34(12),1838-1854.

[3] ETIP Bioenergy. STRATEGIC RESEARCH AND INNOVATION AGENDA 2018. Cost-competitive innovative world-class bioenergy and biofuel value chains https://www.etipbioenergy.eu/images/ETIP_SRIA_2018.pdf

[4] Eurostat, Statistics Explained. Archive: Consumption of Energy (2018) https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Consumption_of_energy

[5] ETIP Bioenergy, EU Biofuels Annual (2019) *Policy and Programs for Transport Biofuels*

https://www.etipbioenergy.eu/databases/reports/429-eu-biofuels-annual-2019

[6] Olofsson, I., Nordin, A., & Söderlind, U. (2005). Initial Review and Evaluation of Process Technologies and Systems Suitable for Cost-Efficient Medium-Scale Gasification for Biomass to Liquid Fuels. Umeå: Umeå Universitet. Retrieved from http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:miun:diva-5992

[7] Sreenath Jishnu & Pai Anard. (2018) Biodiesel: A Review on Next Generation Fuels. Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences, 43(1), 58-66.

[8] European Commission. Publications Office of the EU, Towards a sustainable Europe by 2030 (2019)https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/c24a27f2-2dae-11e9-8d04-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF/source-search

[9] Bioenergy Europe, Statistical Report, (2020) Report Biofuels. https://bioenergyeurope.org/29-statistical-reports/252-biofuels-for-transport.html

[10] OECD-FAO AGRICULTURAL OUTLOOK 2019-2028 © OECD/FAO 2019 http://www.fao.org/3/CA4076EN/CA4076EN_Chapter1_Overview.pdf

[11] FAO (2013) Biofuels and Food Security. The Committee on World Food Security (CFS), 40th Session 2013 http://www.fao.org/3/a-av033e.pdf

[12] Field Christopher B., Campbell J. Elliott & Lobell David B. (2008) Biomass Energy: the scale of the potential resource. Trends in Ecology & Evolution, 23(2), 65-72.

[13] McKendry Peter. (2002) Energy production from biomass (part 2): conversion technologies. Bioresource Technology, 83(1), 47-54.

[14] Singh Annop, Nigam Poonam Singh & Murphy Jerry D. (2011) Mechanism and challenges in commercialisation of algal biofuels. Bioresource Technology, 102(1), 26-34.

[15] IEA, 2010 Sustainable Production of Second-Generation Biofuels Potential and perspectives in major economies and developing countries. International Energy Agency. IEA/OECD, Paris

[16] Ho Dang P., Ngo Huu Hao & Guo Wenshan. (2014) A mini review on renewable sources for biofuel. Bioresource Technology, 169, 742-749.

[17] Οδηγία 2003/30/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 8ης Μαΐου 2003, σχετικά με την προώθηση της χρήσης βιοκαυσίμων ή άλλων ανανεώσιμων καυσίμων για τις μεταφορές. Επίσημη Εφημερίδα αριθ. L 123 της 17/05/2003 σ. 0042 -0046 https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2003/30/oj/?locale=el

[18] EUR-Lex (2010) Ανακοίνωση της Ευρωπαϊκής Επιτροπής για την οδηγία 2010/C 160/01 https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/HTML/?uri=OJ:C:2010:160:FULL&from=DA

[19] ΟΔΗΓΙΑ 2009/30/ΕΚ ΤΟΥ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟΥ ΚΟΙΝΟΒΟΥΛΙΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΥΜΒΟΥΛΙΟΥ της 23ης Απριλίου 2009 με την οποία τροποποιείται η οδηγία 98/70/ΕΚ όσον αφορά τις προδιαγραφές για τη βενζίνη, το ντίζελ και το πετρέλαιο εσωτερικής καύσης https://eur-lex.europa.eu/legal_content/EL/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009L0030&from=LT

[20] IEA, Tracking Report (2020) Transport Biofuels https://www.iea.org/reports/transport-biofuels

[21] Gasparatos A., Stromberg P. & Takeuchi K. (2013) Sustainability impacts of first-generation biofuels. Animal Frontiers, 3(2), doi:10.2527/af.2013-0011

[22] Sims Ralph E.H, Mabee Warren, Saddler Jack N. & Taylor Michael (2010) An overview of second- generation biofuel technologies. Bioresource Technology, 101, 1570–1580

[23] IEA Bioenergy, OECD/IEA (2008) Sims Ralph, Taylor Michael, Sadder Jack & Mabbe Warren. From 1st to 2nd generation biofuels technologies: An overview of current industry and RD&D activities.

[24] Mitkidis Georgios, Magoutas Anastasios & Kitsios Fotis. (2018) Market and economic feasibility analysis for the implementation of 2nd generation biofuels in Greece. Energy Strategy Reviews, 19, 85-98.

[25] Patumsawad S. (2011) 2nd Generation Biofuels: Technical Challenge and R&D Opportunity in Thailand. Journal of Sustainable Energy & Environment Special Issue, 47-50.

[26] Yen Hong-Wei, Hu I-Chen, Chen Chun-Yen, Ho Shih-Hsin, Lee Duu-Jong & Chang Jo-Shu. (2013) Microalgae-based biorefinery – From biofuels to natural products. Bioresource Technology, 135, 166-174.

[27] Lackner Maximilian (2017) 3rd-Generation Biofuels: Bacteria and Algae as Sustainable Producers and Converters. In: Handbook of Climate Change Mitigation and Adaptation. (eds. Chen Wei-Yin, Suzuki Toshio &Lackner Maximilian).

[28] Monisha J, Harish A, Sushma R, Krishna Murthy T P*, Blessy B Mathew, Ananda S. (2013) Biodiesel: A review. Journal of Engineering Research and Applications, 3(6), 902-912.

[29] Gerpen Jon Van. (2005) Biodiesel processing and production. Fuel Processing Technology, 86(10), 1097-1107.

[30] Marek Adamczak, Uwe T. Bornscheuer and Włodzimierz Bednarski (2009) The application of biotechnological methods for the synthesis of biodiesel, Wiley online library. 111,808-813

[31] Demirbas Ayhan (2007) Importance of biodiesel as transportation fuel. Energy Policy, 35(9) 4661-4670.

[32] Balat M. (2009) Prospects for Worldwide Biodiesel Market Development. Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy, 4(1), 48-58

[33] Μπάτζος Σπυρίδων (2014) Το βιοντίζελ στην Ελλάδα. Παρόν και προοπτικές.

[34] Prince Roger C., Haitemanek Christine & Lee Catherine Coyle (2008) The primary aerobic biodegradation of biodiesel B20. Chemosphere, 71(8), 1446-1451.

[35] Κυδώνη Κατερίνα & Τερζή Φωτεινή (2019) Τεχνολογίες βιοντίζελ και η χρήση του στον τομέα των μεταφορών

[36] Rashid Umer, Anwar Farooq & Arif Muhammad (2009) Optimization of Base Catalytic Methanolysis of Sunflower (Helianthus annuus) Seed Oil for Biodiesel Production by Using Response Surface Methodology. I&EC Research, 48, 1719-1726.

[37] Wyatt Victor T., Hess Melissa A., Dunn Robert O., Foglia Thomas A., Haas Michael J. & Marmer William N. (2005) Fuel Properties and Nitrogen Oxide Emission Levels of Biodiesel Produced from Animal Fats. Journal of American Oil Chemist's society, 82, 585-591.

[38] Lee Ki-Teak, Fogliab Thomas A. & Chang Kyu-Seob (2002) Production of Alkyl Ester as Biodiesel from Fractionated Lard and Restaurant Grease. Journal of the American Oil Chemists' Society, 79,191-195.

[39] Sudhir C.V., Sharma N.Y. & Mohanan P. (2007) Potential Of Waste Cooking Oils As Biodiesel Feed Stock. Emirates Journal for Engineering Research, 12(3), 69-75.

[40] Mohd Azhar Siti Hajar, Abdulla Rahmath, Jambo Siti Azmah, Marbawi Hartinie, & Rodrigues Kenneth Francis (2017) Yeasts in sustainable bioethanol production: A review, Biochemistry and Biophysics Reports, 10, 52-61

[41] OECD/FAO (2016), Regional Distributions of world ethanol production and use in 2025. "OECD-FAO Agricultural Outlook", Agriculture statistics (database), http://dx.doi.org/10.1787/888933382047

[42] John Rojan P., Anisha G.S., Nampoothiri K. Madhavan & Pandey Ashok (2011) Micro and macroalgal biomass: A renewable source for bioethanol. Bioresource Technology, 102(1), 186-193.

[43] Balat Mustafa, Balat Havva & Oz Cahide (2008) Progress in bioethanol processing. Progress in Energy and Combustion Science, 34(5), 551-573

[44] Ferreira Jorge A., Pedro Brancoli, Swarnima Agnihotri, Kim Bolton & Mohammad J.Taherzadeh (2018) A review of integration strategies of lignocelluloses and other wastes in 1st generation bioethanol processes. Process Biochemistry, 75, 173-186

[45] Lin Yan & Tanaka Shuzo (2006) Ethanol fermentation from biomass resources: current state and prospects. Applied Microbiology and Biotechnology, 69, 627-642.

[46] Gombert Andreas K. & Maris Antonius JAvan (2015) Improving conversion yield of fermentable sugars into fuel ethanol in 1st generation yeast-based production processes. Current Opinion in Biotechnology, 33, 81-86

[47] Hendrixs ATWM, Zeeman G (2009) Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. Bioresour Technol 100:10–18

[48] Chiaramonti David, Rizzo Andrea Maria, Prussi Matteo, Tedeschi Silvana, Zimbardi Francesco, Braccio Giacobbe, Viola Egidio & Taddei Pardelli Paolo (2011) 2nd generation lignocellulosic bioethanol: is torrefaction a possible approach to biomass pretreatment? Biomass Conversion and Biorefinery, 1, 9-15.

[49] Alaska Airlines flies first commercial flight with new biofuel made from forest residuals (2016) https://blog.alaskaair.com/alaska-airlines/company-news/nara-flight/

[50] Velazquez-Lucio Jesus, Rosa M. Rodríguez-Jasso, Luciane M. Colla, Aide Sáenz-Galindo, Daniela E. CervantesCisneros, Cristóbal N. Aguilar, Bruno D. Fernandes & Héctor A. Rui (2018) Microalgal biomass pretreatment for bioethanol production: a review. Biofuel Research Journal, 17, 780-791.

[51] Chen Chun-Yen, Zhao Xin-Qing, Yen Hong-Wei, Chieh-LunChengd, Feng-WuBaib & Jo-ShuChang (2013) Microalgae-based carbohydrates for biofuel production. Biochemical Engineering Journal,78, 1-10.

[52] Jambo Siti Azmah, Abdulla Rahmath, Mohd Azhar Siti Hajar, Marbawi Hartinie, Gansau Jualang Azlan & Pogaku Ravindra (2016) A review on third generation bioethanol feedstock. Renewable and Sustainable Energy Reviews,65, 756-769.

[53] Kumar Savinda, Gupta Rishi, Kumar Gaurav, Sahoo Dinabandhu & Kuhad Ramesh Chander (2013) Bioethanol production from Gracilaria verrucosa, a red alga, in a biorefinery approach. Bioresource Technology, 135, 150-156.

[54] Scarlat Nicolae & Dallemand Jean-Francois (2011) Recent developments of biofuels/bioenergy sustainability certification: A global overview. Biochemical Engineering Journal, 39(3), 1630-1646.

[55] STANDARDS BY ISO/TC 28/SC 7. Liquid Biofuels, STANDARD AND/OR PROJECT UNDER THE DIRECT RESPONSIBILITY OF ISO/TC 28/SC 7 SECRETARIAT https://www.iso.org/committee/551957/x/catalogue/p/1/u/0/w/0/d/0

[56] European Committee for Standardization. CEN/TC 19 - Gaseous and liquid fuels, lubricants and related products of petroleum, synthetic and biological origin. https://standards.cen.eu/dyn/www/f?p=204:7:0::::FSP_ORG_ID:6003&cs=1FAF2D8F6A6FE92BF5C85E6AAFDBDD16D

[57] Rutz Dominic & Janssen Rainer (2007) Biofuel Technology Handbook. WIP Renewable Energies.

[58] ATRAX ENERGY (2005): Assessment of bioethanol and biogas initiatives for transport in Sweden. - Background information for the EU-project PREMIA; 58 p.

[59] ETIP Bioenergy. CEN European Committee for Standardization. Biofuels https://www.etipbioenergy.eu/databases/deployment/23-cen-european-committee-for-standardization-biofuels

[60] CEN/TC 383 - Sustainably produced biomass for energy applications. CEN/TC 383 Published Standard. European Committee for Standardization https://standards.cen.eu/dyn/www/f?p=204:32:0::::FSP_ORG_ID,FSP_LANG_ID:648007,25&cs=12A33D937B5D72BE2C6A56EC998F853BF

[61] Ευρωπαϊκή Επιτροπή (2017) Έκθεση Της Επιτροπής προς Το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, το Συμβούλιο, την Ευρωπαϊκή Οικονομική και Κοινωνική Επιτροπή και την Επιτροπή των Περιφερειών. Έκθεση προόδου για την ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές

[62] OECD/FAO (2016), "Biofuels", in OECD-FAO Agricultural Outlook 2016-2025, OECD Publishing, Paris. DOI: http://dx.doi.org/10.1787/agr_outlook-2016-13-en

[63] Tsita Katerina G., Kiartzis Spyros J., Ntavos Nicolaos & Pilavachi Petros A. (2020) Next generation biofuels derived from thermal and chemical conversion of the Greek transport sector. Thermal Science and Engineering Progress, 17.

[64] S. Stefanidis, P. Pilavachi, K. Kalogiannis, A. Lappas, Pyrolysis of agricultural and forest residues for the production of fuels and chemical products, Workshop of the Energy Committee of the Academy of Athens – Management and Energy Exploitation of Residues in Greece, 2015, pp. 147–162. Athens, Greece

[65] EU Energy, Transport and GHG Emission Trends to 2050. Reference Scenario 2013, EUROPEAN COMMISSION Directorate-General for Energy, Directorate-General for Climate Action and Directorate-General for Mobility and Transport doi: 10.2833/17897

[66] ETIP Bioenergy (2019) INPUT PAPER I - Recognizing the position of biofuels within the Renewable Energy Directive (REDII) https://etipbioenergy.eu/etip-bioenergy-input-paper-i-recognizing-the-position-of-biofuels-within-the-renewable-energy-directive-redii

[67] Αλεξοπούλου Έφη (2020) Ανάπτυξη επιλεγμένων αλυσίδων αξίας παραγωγής βιοκαυσίμων από ενεργειακές καλλιέργειες σε περιοχές χαμηλού κινδύνου έμμεσης αλλαγής χρήσης γης. Στο Biomass Day 2/12/2020. «Βιοενέργεια και Βιοοικονομία: Μοχλοί μιας δίκαιης αναπτυξιακής μετάβασης http://bioenergynews.gr/biomass-day-2020/#parousiaseis

[68] BIKE. The project, The core activity of bike https://www.bike-biofuels.eu/the-project/

[69] Poggiaroni Giulio (2020) BIKE. Empowering low ILUC risk biomass value chains for sustainable biofuels and the bioeconomy https://www.bike-biofuels.eu/news/lorem-ipsum/

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΚΑΙ ΑΕΙΦΟΡΙΑΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΧΡΗΣΗ ΒΙΟΝΤΙΖΕΛ ΑΠΟ ΕΛΑΙΟΚΡΑΜΒΗ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Γ. Μαρτινόπουλος[1*], Μ. Σουντουρλής[2] και Ε. Ηρακλέους[1]

[1*] Τμήμα Επιστήμης και Τεχνολογίας, ΠΑΚΕΔΙΠΣ, Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος, ΤΚ 57001, 14ο χλμ Θες/νίκης - Μουδανιών
[2] Φυτοενέργεια ΑΕ, ΤΚ 62100, Παραλίμνιο Σερρών
e-mail: g.martinopoulos@ihu.edu.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην προσπάθεια για απεξάρτηση από τις εισαγωγές καυσίμων αλλά και τη μείωση των εκπομπών θερμοκηπικών αερίων, η Ευρωπαϊκή Ένωση, έχει στραφεί προς την χρήση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Στην προσπάθεια αυτή σημαντικό ρόλο παίζουν και τα βιοκαύσιμα, των οποίων είναι εδώ και χρόνια υποχρεωτική η ανάμειξη στο πετρέλαιο. Στη χώρα μας, η παραγωγή βιοντίζελ βασίζεται στο Πρόγραμμα Κατανομής, το οποίο καθορίζει κάθε χρόνο την ποσότητα για υποχρεωτική ανάμιξη με συμβατικά καύσιμα. Ως βιοντίζελ ορίζεται το προερχόμενο από φυτικά έλαια ή ζωικά λίπη καύσιμο, αποτελούμενο από εστέρες λιπαρών οξέων μακριάς ανθρακικής αλυσίδας οι οποίοι παράγονται με την διεργασία της μετεστεροποίησης με μικρής αλυσίδας αλκοόλη. Το βιοντίζελ εμφανίζει παρόμοιες φυσικοχημικές ιδιότητες με το συμβατικό, διατηρώντας κάποια συγκριτικά πλεονεκτήματα αναφορικά με την απουσία των εκπομπών SO_x , των μειωμένων εκπομπών σε CO, άκαυστους υδρογονάνθρακες και αιθάλη, ενώ στα μειονεκτήματά του συγκαταλέγονται οι χειρότερες ιδιότητες ψυχρής ροής και η παραγωγή παραπροϊόντων (π.χ. γλυκερίνη) κατά την παραγωγή του.

Στη χώρα δραστηριοποιούνται 22 μονάδες παραγωγής βιοντίζελ. Από αυτές, 9 εταιρίες διαθέτουν μονάδα εξευγενισμού ενώ 13 προμηθεύονται την πρώτη ύλη είτε από το εξωτερικό είτε από τις εγχώριες μονάδες εξευγενισμού. Οι περισσότερες εταιρίες επεξεργάζονται φυτικά έλαια με το ηλιέλαιο και το κραμβέλαιο να κατέχουν το μεγαλύτερο μερίδιο στο σύνολο των επεξεργαζόμενων ελαίων.

Στην εργασία για τον υπολογισμό της αειφορίας και τον προσδιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την παραγωγή βιοντίζελ από ελαιοκράμβη, γίνεται χρήση της μεθοδολογίας της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής, σύμφωνα με τα πρότυπα ISO14040-4. Ως δεδομένα εισόδου για τους υπολογισμούς χρησιμοποιούνται πρωτογενή δεδομένα από την υφιστάμενη παραγωγική διαδικασία μιας εκ των εταιριών που δραστηριοποιούνται στον Ελληνικό χώρο. Για την ανάλυση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικές μεθοδολογίες (CML2001 και Impact2002+) με τις οποίες επιβεβαιώνεται η αειφορία του βιοντίζελ ενώ εντοπίζονται και τα κύρια στάδια με την μεγαλύτερη συμμετοχή στην περιβαλλοντική επιβάρυνση (λιπάσματα, χρήση γεωργικού ελκυστήρα).

Λέξεις Κλειδιά: Ανάλυση Κύκλου Ζωής, Αειφορία, Βιοκαύσιμα, Βιοντίζελ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η κλιματική αλλαγή και η υπερθέρμανση του πλανήτη λόγω ανθρωπογενών παραγόντων, όπως η αύξηση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, είναι μερικές από τις μεγαλύτερες προκλήσεις που καλείτε να αντιμετωπίσει η κοινωνία μας. Στην προσπάθεια της για μείωση των εκπομπών θερμοκηπικών αερίων καθώς και για απεξάρτηση από τις εισαγωγές καυσίμων, η Ευρωπαϊκή Ένωση, έχει στραφεί προς την χρήση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Στην προσπάθεια αυτή σημαντικό ρόλο παίζουν και τα βιοκαύσιμα, των οποίων είναι εδώ και χρόνια υποχρεωτική η ανάμειξη στο πετρέλαιο.

Ως βιοντίζελ ορίζεται το προερχόμενο από φυτικά έλαια ή ζωικά λίπη καύσιμο, αποτελούμενο από εστέρες λιπαρών οξέων μακριάς ανθρακικής αλυσίδας οι οποίοι παράγονται με την διεργασία της μετεστεροποίησης με μικρής αλυσίδας αλκοόλη. Το βιοντίζελ εμφανίζει παρόμοιες φυσικοχημικές ιδιότητες με το συμβατικό, διατηρώντας κάποια συγκριτικά πλεονεκτήματα αναφορικά με την απουσία των εκπομπών SO_x , των μειωμένων εκπομπών σε CO, άκαυστους υδρογονάνθρακες και αιθάλη, ενώ στα μειονεκτήματά του συγκαταλέγονται οι χειρότερες ιδιότητες ψυχρής ροής και η παραγωγή παραπροϊόντων (π.χ. γλυκερίνη) κατά την παραγωγή του.

Σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης, οι στόχοι για την εφαρμογή των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας καθορίστηκαν μέσω της «Οδηγίας για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας» [1], η οποία μεταξύ άλλων επέβαλλε τη συμμετοχή με μερίδιο τουλάχιστον 10% των βιοκαυσίμων στον τομέα των μεταφορών για όλα τα κράτη μέλη έως το 2020. Η νέα οδηγία που κυκλοφόρησε πρόσφατα [2] αντιμετωπίζει το ζήτημα της βιωσιμότητας των βιοκαυσίμων και επιβάλλει τη μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου σταδιακά στα βιοκαύσιμα, με υποκατάσταση των ενεργειακών καλλιεργειών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως τρόφιμα. Σε αυτή την Οδηγία, ο συνολικός στόχος για κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της Ευρωπαϊκής Ένωσης από Ανανεώσιμες Πηγές, αυξήθηκε στο 32%, ενώ η αρχική πρόταση δεν περιλάμβανε συγκεκριμένο όριο για τον τομέα των μεταφορών, κάτι το οποίο προστέθηκε στο τελικό κείμενο. Σύμφωνα με αυτό, τα κράτη μέλη δεσμεύονται να καλύπτουν κατ' ελάχιστο το 14% της τελικής ενέργειας στις οδικές μεταφορές (συμπεριλαμβανομένων των σιδηροδρομικών) από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας μέχρι το 2030.

Η Οδηγία καθορίζει μια σειρά κριτηρίων αειφορίας και εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου με τα οποία πρέπει να συμμορφώνονται τα βιοκαύσιμα που χρησιμοποιούνται στις μεταφορές, ώστε να υπολογίζονται στον συνολικό στόχο του 14% και να είναι επιλέξιμα για οικονομική υποστήριξη από τις δημόσιες αρχές. Μερικά από αυτά τα κριτήρια είναι τα ίδια με της αρχικής Οδηγίας [1], ενώ άλλα είναι νέα ή αναδιατυπωμένα.

Αν και τα βιοκαύσιμα αποτελούν ένα σημαντικό παράγοντα στην προσπάθεια της Ευρωπαϊκής Ένωσης να επιτύχει τους στόχους της για τη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου, η παραγωγή βιοκαυσίμων πραγματοποιείται συνήθως σε καλλιεργήσιμες εκτάσεις που είχαν προηγουμένως χρησιμοποιηθεί για άλλες καλλιέργειες, όπως η καλλιέργεια τροφίμων ή ζωοτροφών. Δεδομένου ότι αυτή η γεωργική παραγωγή εξακολουθεί να είναι απαραίτητη, μπορεί να οδηγήσει στην επέκταση της γεωργικής γης σε μη καλλιεργήσιμες εκτάσεις ή ενδεχομένως να περιλαμβάνει περιοχές με υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα, όπως δάση και υγρότοπους, μια διαδικασία γνωστή ως «έμμεση αλλαγή χρήσης γης».

Η έμμεση αλλαγή χρήσης γης μπορεί να προκαλέσει την απελευθέρωση του διοξειδίου του άνθρακα που αποθηκεύεται στα δέντρα και στο έδαφος και να υπερκαλύψει την εξοικονόμηση αερίων του θερμοκηπίου που προκύπτει από την αύξηση της χρήσης βιοκαυσίμων στο ενεργειακό μίγμα. Για την αντιμετώπιση του θέματος αυτού η αναθεωρημένη οδηγία για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας εισάγει μια νέα προσέγγιση θεσπίζοντας όρια τα οποία θα επηρεάσουν την ποσότητα των καυσίμων που τα κράτη μέλη μπορούν να υπολογίζουν στους εθνικούς τους στόχους κατά τον υπολογισμό του συνολικού εθνικού μεριδίου των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και του μεριδίου των ανανεώσιμων πηγών στις μεταφορές. Τα κράτη μέλη θα εξακολουθούν να μπορούν να χρησιμοποιούν (και να εισάγουν) καύσιμα που καλύπτονται από αυτά τα όρια, αλλά δεν θα μπορούν να συμπεριλάβουν αυτούς τους όγκους κατά τον υπολογισμό του βαθμού στον οποίο έχουν εκπληρώσει τους ανανεώσιμους στόχους τους. Αυτά τα όρια συνίστανται σε ένα πάγωμα στα επίπεδα του 2019 για την περίοδο 2021-2023, το οποίο σταδιακά θα μειωθεί από το τέλος του 2023 στο μηδέν έως το 2030.

Η οδηγία εισάγει επίσης μια εξαίρεση από αυτά τα όρια για τα βιοκαύσιμα, τα βιορευστά και τα καύσιμα βιομάζας που πιστοποιούνται ως χαμηλού κινδύνου «έμμεσης αλλαγής χρήσης γης». Τα

βιοκαύσιμα χαμηλού κινδύνου παράγονται από βιομάζα των οποίων η μετατόπιση χρήσης γης μειώνεται σε βαθμό που ο κίνδυνος μπορεί να θεωρηθεί χαμηλός [3].

Στη χώρα μας, η παραγωγή βιοντίζελ βασίζεται στο Πρόγραμμα Κατανομής, το οποίο καθορίζει κάθε χρόνο την ποσότητα για υποχρεωτική ανάμιξη με συμβατικά καύσιμα. Επί του παρόντος η παραγωγή του βιοντίζελ πραγματοποιείται από φυτικά έλαια όπως π.χ. ηλιέλαιο, κραμβέλαιο, βαμβακέλαιο. Στη Ελλάδα περίπου 1.000.000 στρέμματα καλλιεργήσιμης γης είναι αφιερωμένα σε ενεργειακές καλλιέργειες για την παραγωγή βιοντίζελ, των οποίων οι απαιτήσεις σε λίπανση και άρδευση δεν είναι απολύτως εναρμονισμένες με τις κλιματολογικές και εδαφολογικές συνθήκες της εκάστοτε περιοχής. Η οικονομική βιωσιμότητα κάθε βιομηχανικής μονάδας βιοντίζελ συνδέεται στενά με την συνολική στρεμματική απόδοση των καλλιεργειών και το κόστος του φυτικού ελαίου, παράγοντες που κατ' επέκταση καθορίζουν την εκάστοτε τιμή πώλησης του βιοκαυσίμου και την κερδοφορία ή μη της μονάδας. Υπολογίζεται ότι περίπου το 80% της τιμής του βιοντίζελ οφείλεται στο κόστος της πρώτης ύλης. Στη χώρα μας δραστηριοποιούνται 22 μονάδες παραγωγής βιοντίζελ. Από αυτές, 9 εταιρίες διαθέτουν μονάδα εξευγενισμού ενώ 13 προμηθεύονται την πρώτη ύλη είτε από το εξωτερικό είτε από τις εγχώριες μονάδες εξευγενισμού. Συνολικά, οι υπάρχουσες μονάδες εξευγενισμού διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

1. φυσικές ραφιναρίες που παράγουν αυτούσια λιπαρά οξέα,
2. χημικές ραφιναρίες που παράγουν σαπουνόπαστα και έχουν μονάδες σαπουνοδιάσπασης που μετατρέπουν τους σάπωνες σε ελεύθερα λιπαρά οξέα,
3. ραφιναρίες που διαχειρίζονται τις σαπουνόπαστες σαν απόβλητα και τις διαθέτουν είτε σε μονάδες σαπουνοδιάσπασης είτε σε μονάδες βιοαερίου.

Οι περισσότερες εταιρίες επεξεργάζονται φυτικά έλαια είτε εγχώριας παραγωγής είτε εισαγωγής, ενώ το ηλιέλαιο και το κραμβέλαιο κατέχουν το μεγαλύτερο μερίδιο στο σύνολο των επεξεργαζόμενων ελαίων. Λαμβάνοντας υπόψη υπολειμματικές/εναλλακτικές τροφοδοσίες, μόνο μια εταιρία διαθέτει μονάδα επεξεργασίας χρησιμοποιημένων τηγανελαίων. Συμπερασματικά, από τις ραφιναρίες παράγονται περίπου 9000 tn σαπουνόπαστας, από τα οποία προκύπτουν περίπου 4000 tn λιπαρών οξέων, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή βιοκαυσίμων (βιοντίζελ) 2ης γενιάς. Η εγχώρια παραγωγή βιοντίζελ γίνεται με βασική κατάλυση, κατά την οποία απαιτείται πλύσιμο του καυσίμου για την απομάκρυνση των σαπουνιών που έχουν δημιουργηθεί μετά την ολοκλήρωση της αντίδρασης μετεστεροποίησης. Συνεπώς, η εκτίμηση των αντίστοιχων διαθέσιμων ποσοτήτων σαπουνόμαζας και λιπαρών οξέων μπορεί να γίνει με βάση τις ποσότητες του βιοντίζελ όπως αυτές αναφέρονται στα αντίστοιχα ΦΕΚ κατανομής της παραγωγής του και αντιστοιχεί περίπου σε 1400 tn [4].

Συνοψίζοντας, από τις δραστηριότητες επεξεργασίας των φυτικών ελαίων προκύπτει πως στην Ελλάδα παράγονται συνολικά ετησίως περίπου 9000 τόνοι σαπουνόμαζας και περίπου 5400 τόνοι λιπαρών οξέων. Οι ποσότητες αυτές αντιστοιχούν περίπου στο 10% της ποσότητας των φυτικών ελαίων που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή βιοντίζελ, συνεπώς εύκολα συνάγεται το συμπέρασμα πως για την Ελλάδα η αειφορική παραγωγή βιοκαυσίμων και ιδιαίτερα του βιοντίζελ βασίζεται στην χρήση τέτοιων εναλλακτικών τροφοδοσιών.

Στα πλαίσια αυτά, και σε μια προσπάθεια για την διερεύνηση της αειφορίας και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων στην παρούσα εργασία γίνεται χρήση της μεθοδολογίας της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής, σύμφωνα με τα πρότυπα ISO14040-4 για την παραγωγή βιοντίζελ από ελαιοκράμβη,. Ως δεδομένα εισόδου για τους υπολογισμούς χρησιμοποιούνται πρωτογενή δεδομένα από την υφιστάμενη παραγωγική διαδικασία μιας εκ των εταιριών που δραστηριοποιούνται στον Ελληνικό χώρο.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

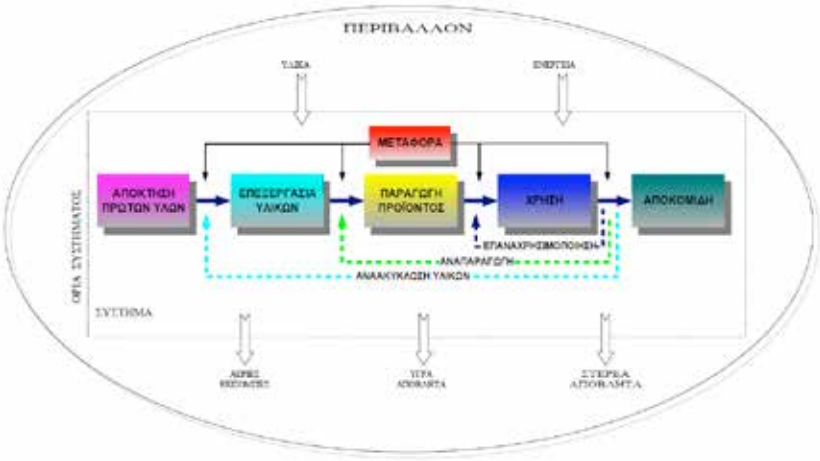
Στην βιβλιογραφία τα σχετικά πλεονεκτήματα της καύσης βιοντίζελ έναντι των πετρελαιοειδών είναι καλά τεκμηριωμένα από πολλούς ερευνητές [5, 6]. Στην παρούσα εργασία σκοπός είναι η διερεύνηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την παραγωγή βιοντίζελ σε βιομηχανική κλίμακα χρησιμοποιώντας ως πρώτη ύλη, ελαιοκράμβη η οποία είναι και η πλέον διαδεδομένη στην Ελληνική επικράτεια με τη μεθοδολογία της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ).

Η μεθοδολογία της ΑΚΖ υπήρξε το πρότυπο πλαίσιο για την αξιολόγηση της βιωσιμότητας των βιοκαύσιμων [7] η οποία είχε αναπτυχθεί αρχικά από την SETAC (Society of Environmental Toxicology And Chemistry) ενώ αργότερα βελτιστοποιήθηκε και τυποποιήθηκε από τον παγκόσμιο οργανισμό τυποποίησης ISO [8]. Με την διεξαγωγή της ΑΚΖ μπορούν να υπολογιστούν με

αντικειμενικό και κυρίως με επιστημονικό τρόπο οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις, που σχετίζονται με την παραγωγή και χρήση των συστημάτων. Τα αποτελέσματα της ΑΚΖ εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από το σκοπό της ανάλυσης, καθώς και από την μεθοδολογία αποτίμησης που χρησιμοποιείται. Είναι σημαντικό να χρησιμοποιείται μια καλά δομημένη μεθοδολογία και τυποποιημένα δεδομένα. Καθορισμένες οδηγίες για την διεξαγωγή της ΑΚΖ ενός προϊόντος έχουν δοθεί από τα διεθνή πρότυπα ISO 14040-14043 [8]. Στην εργασία χρησιμοποιείται η μεθοδολογία και η βάση δεδομένων του Eco-Indicator 99, που καλύπτει σήμερα το μεγαλύτερο φάσμα δραστηριοτήτων και επιπτώσεων και τυγχάνει ευρείας αποδοχής [9, 10] από την επιστημονική κοινότητα.

Ο Eco-Indicator 99 είναι ένας δείκτης (single indicator) που εκφράζει την συνολική περιβαλλοντική επιβάρυνση ενός προϊόντος ή μιας διαδικασίας για ολόκληρο τον κύκλο ζωής του. Ως μονάδα μέτρησης του βαθμού επιβάρυνσης χρησιμοποιείται ο ένας βαθμός Οίκο-δείκτη ο οποίος συμβολίζεται με τα γράμματα Pt συνήθως όμως χρησιμοποιείται το χιλιοστό mPt. Η κλίμακα έχει επιλεχθεί έτσι ώστε η αξία 1 Pt να αντιπροσωπεύει το ένα χιλιοστό του ετήσιου περιβαλλοντικού φορτίου ενός μέσου Ευρωπαίου πολίτη [11].

Η μεθοδολογία αυτή στηρίζεται σε μεγάλο βαθμό στην μεθοδολογία που διατυπώνει το διεθνές πρότυπο ISO 14042, ενώ πάνω σε αυτή τη μεθοδολογία στηρίζουν την λειτουργία τους μερικά από τα πιο διαδεδομένα λογισμικά εργαλεία της ΑΚΖ, όπως είναι το SimaPro.



Εικόνα 1: Κύκλος Ζωής Προϊόντος και ανταλλαγές με το περιβάλλον

Η μεθοδολογία αποτελείται από τέσσερα στάδια:

- Το πρώτο στάδιο στην ΑΚΖ είναι ο καθορισμός του στόχου και του πεδίου εφαρμογής της μελέτης και τα όρια του συστήματος, σε αυτό το στάδιο ορίζεται και η λειτουργική μονάδα του προϊόντος.
- Στο δεύτερο στάδιο γίνεται ανάλυση του πίνακα απογραφής. Στον πίνακα απογραφής συλλέγονται όλα τα απαραίτητα δεδομένα (εισροές στο σύστημα και εκροές προς το περιβάλλον) των αλληλοεπιδράσεων με το περιβάλλον (Εικόνα 1).
- Το τρίτο στάδιο αποτελεί η αποτίμηση των επιπτώσεων και ο υπολογισμός των επιβαρύνσεων των αλληλεπιδράσεων στο περιβάλλον χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανάλυση απογραφής.
- Το τελευταίο στάδιο αποτελεί η ερμηνεία των επιπτώσεων [12]

Το στάδιο της αποτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων είναι αυτό που δίνει την δυνατότητα να αξιολογούμε τα προϊόντα και να κάνουμε τη αντικειμενική σύγκριση μεταξύ τους από περιβαλλοντική άποψη. Αν και έχουν αναπτυχθεί πολλές μεθοδολογίες αποτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, καμία δεν καλύπτει όλες τις κατηγορίες των επιπτώσεων.

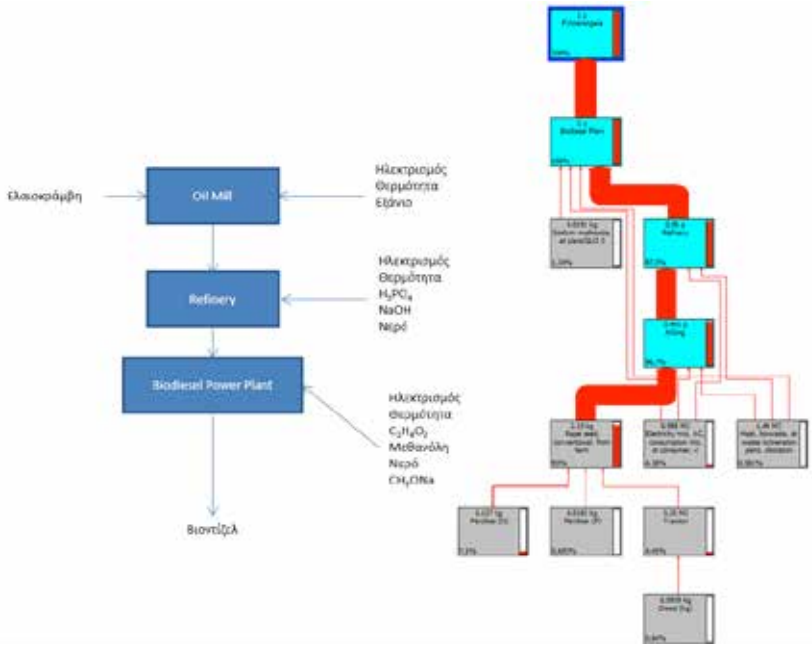
Ως δεδομένα εισόδου για τους υπολογισμούς χρησιμοποιούνται πρωτογενή δεδομένα από την υφιστάμενη παραγωγική διαδικασία μιας εκ των εταιριών που δραστηριοποιούνται στον Ελληνικό χώρο και συγκεκριμένα της εταιρείας Φυτοενέργεια Α.Ε η οποία είναι μια κάθετη μονάδα παραγωγής βιοντίζελ από ελαιούχους σπόρους, με έδρα το Παραλίμνιο Σερρών.

Η κύρια δραστηριότητα της εταιρίας είναι η παραγωγή βιοκαυσίμων και συγκεκριμένα βιοντίζελ, το οποίο παράγεται από ενεργειακούς σπόρους ελαιοκράμβης, ηλίανθου και σόγιας προερχόμενους κυρίως από τοπικές συμβολαιακές καλλιέργειες, ενώ παράλληλα η εταιρία δραστηριοποιείται και στην αξιοποίηση των υποπροϊόντων παραγωγής του βιοντίζελ καθώς διαθέτει μονάδα επεξεργασίας γλυκερίνης που παράγει προϊόν καθαρότητας 92-95%. Για τις ανάγκες της μελέτης, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα ενός πλήρους έτους παραγωγής βιοντίζελ από ελαιοκράμβη ώστε να ληφθεί έμμεσα υπόψη και η επίδραση της εποχικότητας στα διάφορα στάδια του κύκλου ζωής.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Το πρώτο στάδιο της ΑΚΖ περιλαμβάνει τον προσδιορισμό του σκοπού και του στόχου και τον ορίων του συστήματος καθώς και της λειτουργικής μονάδας. Στα πλαίσια της μελέτης, στόχος είναι η ανάλυση όλων των διαφορετικών διεργασιών οι οποίες είναι απαραίτητες για την παραγωγή βιοντίζελ κατάλληλου για χρήση (παραγωγή ελαιοκράμβης, εξαγωγή ελαίου, ραφινάρισμα ελαίου, διεστεροποίηση και συλλογή γλυκερόλης), η καταγραφή όλων των ροών μάζας και ενέργειας καθώς και των εκπομπών όπως περιγράφονται στην Εικόνα 2.

Ως λειτουργική μονάδα, ορίζεται το 1 kg βιοντίζελ.

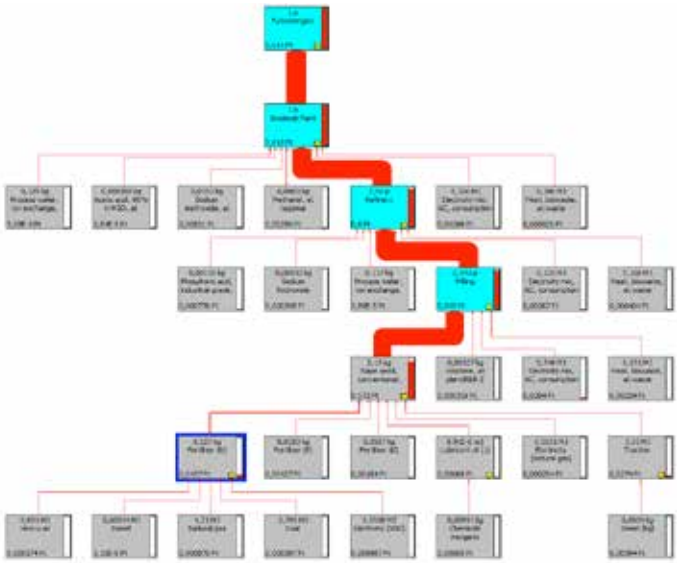


Εικόνα 2: Σχηματική αναπαράσταση της παραγωγικής διαδικασίας μετατροπής ελαιοκράμβης σε βιοντίζελ

Τα δεδομένα των ροών μάζας και ενέργειας περιλαμβάνουν όλη την διαδικασία που συνδέεται με την παραγωγή ελαιοκράμβης (σπορά, χρήση φυτοφαρμάκων και συλλογή καρπού) καθώς και τη χρήση ενέργειας για την λειτουργία του μηχανολογικού εξοπλισμού στα επιμέρους στάδια. Περιλαμβάνει τον καθαρισμό, πλύσιμο και ξήρανση των σπόρων όταν φτάσουν στο βιο-διυλιστήριο καθώς και την εισαγωγή τους στον μύλο ώστε να ληφθεί το έλαιο. Καθώς η σύνθλιψη δεν είναι ικανή να αφαιρέσει όλο το έλαιο, στην εναπομείνουσα ελαιόπαστα προστίθεται διαλυτικό (εξάνιο) και με χρήση φυγοκεντρητή αφαιρείτε και το εναπομείναν έλαιο. Στη συνέχεια το έλαιο υπόκειται σε διαδικασία

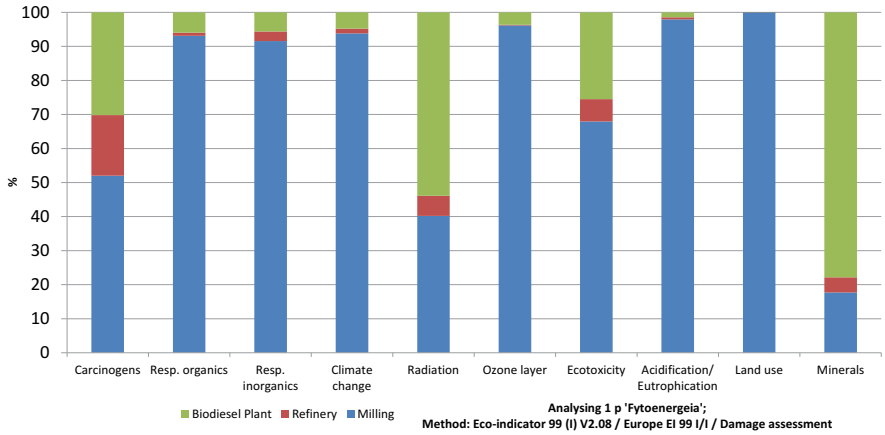
εξευγενισμού όπου και τα λιπαρά οξέα απομακρύνονται με χρήση καυστικής σόδας. Το παραγόμενο προϊόν μετατρέπεται σε βιοντίζελ με τη χρήση μεθανόλης παρουσία καταλύτη.

Τα παραπάνω δεδομένα δόθηκαν για το σύνολο της παραγωγής ενός έτους από την Φυτοενέργεια και στη συνέχεια οι τιμές του ανήχθηκαν ανά 1 kg τελικού βιοντίζελ. Για την πραγματοποίηση της ΑΚΖ χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό SimaPro και η βάση δεδομένων "Eco-Invent" που περιλαμβάνει. Το διάγραμμα ροής της όλης διαδικασίας με τις κύριες φάσεις διεργασίας παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.



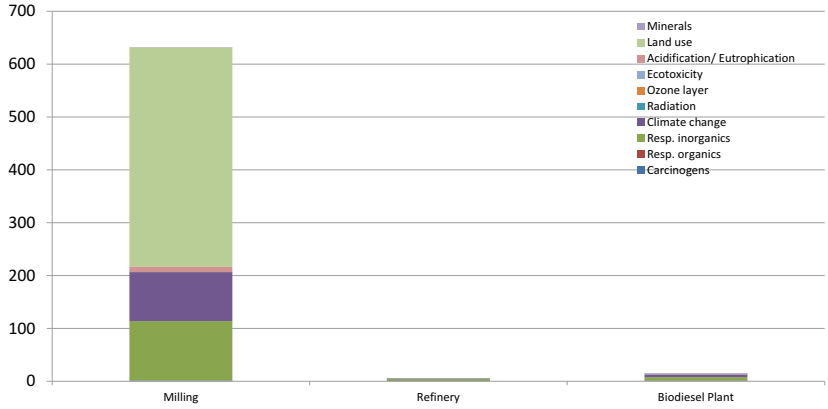
Εικόνα 3: Διάγραμμα ροής και ισοζύγια μάζας ενέργειας για την παραγωγή 1 kg βιοντίζελ από ελαιοκράμβη.

Σχετικά με την κατανομή των περιβαλλοντικών επιπτώσεων στις 10 κατηγορίες επιβάρυνσης που περιλαμβάνει η μεθοδολογία Eco-Indicator 99 (Εικόνα 4), σε όλες εκτός της κατηγορίας «Ακτινοβολία» και «Μεταλλικά Στοιχεία» την μεγαλύτερη επιβάρυνση την δίνει η χρήση του μύλου για την αφαίρεση του ελαίου.



Εικόνα 4: Ποσοστιαία συμμετοχή σε κάθε κατηγορία επιβάρυνσης των τριών παραγωγικών διαδικασιών (EcoIndicator 99I/I)

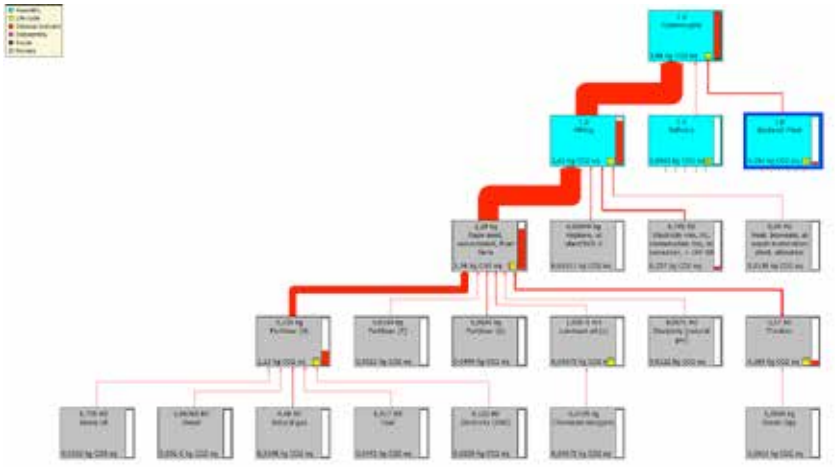
Σε απόλυτα νούμερα η συμμετοχή της χρήσης μύλου είναι ακόμα μεγαλύτερη και σχεδόν μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από τις άλλες δύο κατηγορίες (Εικόνα 5). Κύριος λόγος είναι η σημαντική χρήση ενέργειας που απαιτείτε για την παραγωγή και σύνθλιψη των σπόρων. Τα αποτελέσματα για την περιβαλλοντική επιβάρυνση από την παραγωγή 1 kg βιοντίζελ από ελαιοκράμβη στην Ελλάδα, είναι αντίστοιχα με αυτά διεθνών ερευνών της βιβλιογραφίας [7,13,14].



Εικόνα 5: Απόλυτη τιμή (σε mPt) επιβάρυνσης των τριών παραγωγικών διαδικασιών σε κάθε κατηγορία (EcoIndicator 99I/I)

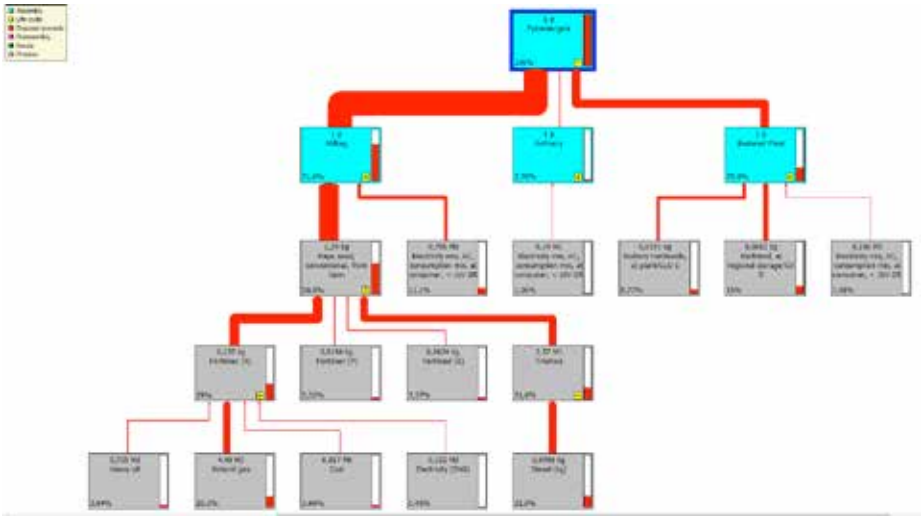
Για τον καλύτερο προσδιορισμό των σταδίων με τη μεγαλύτερη συμμετοχή στην εκπομπή αέριων του θερμοκηπίου (με τη μορφή ισοδυνάμου CO_2) και συνολικά ορυκτών καυσίμων στην εργασία χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικές μεθοδολογίες, η CML2001 και η Impact2002+.

Η πρώτη είναι μια μεθοδολογία εκτίμησης επιπτώσεων η οποία περιορίζει την ποσοτική υποδειγματοποίηση στα πρώτα στάδια της αλυσίδας αίτιο – αιτιατό ώστε να μειώσει κατά το δυνατόν τις αβεβαιότητες. Τα αποτελέσματα, δίνονται ομαδοποιημένα σε ενδιάμεσες κατηγορίες (midpoint) στη βάση συνηθισμένων μηχανισμών (πχ κλιματικής αλλαγής) ή συνηθισμένων ομαδοποιήσεων (πχ οικοτοξικότητα) [15]. Όπως προκύπτει από την Εικόνα 6, η χρήση ορυκτών καυσίμων στον μηχανολογικό εξοπλισμό (γεωργικό ελκυστήρα) κατά το στάδιο της παραγωγής των σπόρων και λιπασμάτων αποτελεί τους κύριους λόγους για την τόσο σημαντική συμμετοχή αυτού του σταδίου στις συνολικές εκπομπές CO_{2eq}.



Εικόνα 6: Εκπομπές CO_{2eq} σε κάθε στάδιο της ΑΚΖ (Μεθοδολογία CML2001)

Για την ποσοτικοποίηση της χρήσης ενέργειας και της επιβάρυνσης που επιφέρουν στα διάφορα στάδια του κύκλου ζωής της παραγωγικής διαδικασίας γίνεται χρήση της μεθοδολογίας Impact2002+ η οποία προτείνει μια λογική εφαρμογή ενός συνδυασμού ενδιάμεσων κατηγοριών και επιβάρυνσης, με την οποία συνδέει όλα τα αποτελέσματα του πίνακα απογραφής από τον κύκλο ζωής με τις ροές, μέσω 14 ενδιάμεσων κατηγοριών οι οποίες ομαδοποιούνται σε τέσσερις βασικές ομάδες επιβάρυνσης [16]. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην Εικόνα 7 όπου για άλλη μια φορά επιβεβαιώνεται η επίδραση των λιπασμάτων και του γεωργικού ελκυστήρα στην χρήση ενέργειας.



Εικόνα 7: Χρήση ορυκτών καυσίμων σε MJ για κάθε στάδιο της AKZ (Μεθοδολογία Impact2002+)

Θα πρέπει να τονιστεί, ότι στα πλαίσια της μελέτης δεν έγινε σύγκριση με την χρήση κοινού ντίζελ, καθώς είναι αυτονόητο ότι αν περιλάβουμε στα όρια του συστήματος και την τελική χρήση του βιοντίζελ η συνολική του επιβάρυνση είναι σε όλες τις περιπτώσεις τουλάχιστον δύο τάξεις μεγέθους μικρότερες, καθιστώντας σαφή την συγκριτική αειφορία του βιοκαυσίμου.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την ανάλυση είναι ξεκάθαρο ότι η παραγωγή βιοντίζελ από ελαιοκράμβη είναι μια και περιβαλλοντικά θετική, δίνοντας τη δυνατότητα στην τοπική αγροτική παραγωγή να συμβάλει στην ενεργειακή ανεξαρτησία της χώρας, προσδίδοντας της ταυτόχρονα και σημαντικά οικονομικά οφέλη. Επιπρόσθετα είναι επίσης σαφές ότι ως υπάρχουν δυνατότητες βελτίωσης της αειφορίας, της περιβαλλοντικής επίδοσης και της οικονομικής βιωσιμότητας της βιομηχανίας παραγωγής βιοντίζελ στην Ελλάδα λαμβάνοντας υπόψη τη δυνατότητα περαιτέρω ανακύκλωσης και αξιοποίησης υγρών αποβλήτων (σαπουνόπαστα από την βιομηχανία ραφιναρίας ελαίων), την αναβάθμιση του παραγόμενου βιοκαυσίμου και την αξιοποίηση του παραπροϊόντος (γλυκερόλη) προς παραγωγή υψηλής προστιθέμενης αξίας προϊόντος.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία υλοποιήθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού έργου «Αξιοποίηση υγρών αποβλήτων ραφιναρίας ελαίων με ταυτόχρονη ανακύκλωση γλυκερίνης από μονάδες παραγωγής βιοντίζελ, προς παραγωγή γλυκεριδίων και προϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας (προπυλένιο) - “PropErDiesel», και συγχρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση και εθνικούς πόρους μέσω του Ε.Π. Ανταγωνιστικότητα, Επιχειρηματικότητα & Καινοτομία (ΕΠΑνΕΚ 2014-2020), Δράση ΕΡΕΥΝΩ-ΔΗΜΙΟΥΡΓΩ-ΚΑΙΝΟΤΟΜΩ (κωδικός έργου: Τ1ΕΔΚ-02864).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Parliament, E. (2009). Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC. Official Journal of the European Union, 5, 2009.

[2] Parliament, E. (2018). Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources. Off. J. Eur Union Belgium, 20, 2018.

[3] Peters, D., Spöttle, M., Hähl, T., Kühner, A. K., Cuijpers, M., Stomp, T. J., & Grass, M. (2016). Methodologies for the identification and certification of Low ILUC risk biofuels, Draft report for consultation. Utrecht, Netherlands.

[4] Τ1ΕΔΚ-02864 (2020), "Αξιοποίηση υγρών αποβλήτων ραφιναρίας ελαίων με ταυτόχρονη ανακύκλωση γλυκερίνης από μονάδες παραγωγής βιοντίζελ, προς παραγωγή γλυκεριδίων και προϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας (προπυλένιο)," Ενδιάμεση Έκθεση.

[5] Srivastava, A., & Prasad, R. (2000). Triglycerides-based diesel fuels. Renewable and sustainable energy reviews, 4(2), 111-133.

[6] Ma, F., & Hanna, M. A. (1999). Biodiesel production: a review. Bioresource technology, 70(1), 1-15.

[7] Requena, J. S., Guimaraes, A. C., Alpera, S. Q., Gangas, E. R., Hernandez-Navarro, S., Gracia, L. N., & Cuesta, H. F. (2011). Life Cycle Assessment (LCA) of the biofuel production process from sunflower oil, rapeseed oil and soybean oil. Fuel Processing Technology, 92(2), 190-199.

[8] Tsilingiridis, G. , Martinopoulos, G., & Kyriakis, N. (2004). Life cycle environmental impact of a thermosyphonic domestic solar hot water system in comparison with electrical and gas water heating. Renewable Energy, 29(8), 1277-1288.

[9] Alemam, A., Cheng, X., & Li, S. (2018). Treating design uncertainty in the application of Eco-indicator 99 with Monte Carlo simulation and fuzzy intervals. International Journal of Sustainable Engineering, 11(2), 110-121.

[10] Foteinis, S., Chatzisymeon, E., Litinas, A., & Tsoutsos, T. (2020). Used-cooking-oil biodiesel: Life cycle assessment and comparison with first-and third-generation biofuel. Renewable Energy, 153, 588-600.

[11] M. Goedkoop, S. Effting, M. Colligno, (2000)."The Eco-Indicator 99 – A damage-oriented method for Life Cycle Impact Assessment – Manual for Designers", Pre Consultants B.V., Second Edition, April 2000

[12] Μαρτινόπουλος Γ., Ekhrawat M., Τσιλιγκιρίδης Γ., (2002), "Εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής ηλιακών θερμοσιφωνικών συστημάτων", Πρακτικά 7ου Εθνικού Συνεδρίου ΙΗΤ, Πάτρα, 2002.

[13] Bonomi, A., Cavalett, O., Klein, B. C., & Ferreira, M. (2019). Comparison of Biofuel Life Cycle Analysis Tools.

[14] Schmidt, J. H. (2015). Life cycle assessment of five vegetable oils. Journal of Cleaner Production, 87, 130-138.

[15] Guinée, J. B., & Lindeijer, E. (Eds.). (2002). Handbook on life cycle assessment: operational guide to the ISO standards (Vol. 7). Springer Science & Business Media.

[16] Jolliet, O., Margni, M., Charles, R., Humbert, S., Payet, J., Rebitzer, G. and Rosenbaum, R.,2003. IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology. Int J. of LCA 8 (6) 324-330

ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΦΛΟΙΟΥ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Γεωργία Πασχαλίδου[1*], Βασιλική Καμπερίδου[1], Ιωάννης Μπαρμπούτης[1]

[1]Τμήμα Δασολογίας και Φυσικού Περιβάλλοντος, Σχολή Γεωπονίας, Δασολογίας και Φυσικού Περιβάλλοντος, ΑΠΘ

*e-mail: pasgeogeo@for.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Μεγάλες ποσότητες δασικής βιομάζας φλοιού συσσωρεύονται κάθε χρόνο σε βιομηχανίες επεξεργασίας ξύλου και παραγωγής σύνθετων προϊόντων ξύλου, ή παραμένουν στο υλοτόμιο μετά την αποφλοίωση των κορμοτεμαχίων, όπου αποσυντίθεται απελευθερώνοντας το δεσμευμένο διοξείδιο του άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Στο πλαίσιο της οικονομίας υλών, της ορθής αξιοποίησης των φυσικών πόρων, αλλά και της προσπάθειας σταδιακής απεξάρτησης από τις μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, η αξιοποίηση και συμβολή του φλοιού στην παραγωγή ενέργειας, όπως και άλλων υπολειμμάτων ή χαμηλής ποιότητας δασικής βιομάζας, αποκτά ιδιαίτερη σημασία. Η παρούσα μελέτη εξετάζει τις δυνατότητες και προοπτικές αξιοποίησης του φλοιού κωνοφόρων και πλατύφυλλων δασικών ειδών στην παραγωγή ενέργειας, με στόχο την αύξηση της ποσότητας βιομάζας που αξιοποιείται σήμερα για ενεργειακούς σκοπούς. Αναλύονται οι φυσικές και θερμικές ιδιότητες του φλοιού, η χημική του σύσταση, καθώς και ο τρόπος με τον οποίο τα συστατικά του επηρεάζουν τις δυνατότητες ένταξής του ως πρώτη ύλη στην παραγωγή διαφόρων τύπων στερεών, υγρών ή αέριων βιοκαυσίμων. Αξιολογούνται η διαθεσιμότητα του φλοιού ως πρώτη ύλη, η ενεργειακή του απόδοση, το κόστος της συλλογής, μεταφοράς και μεταποίησής του, τα δίκτυα πώλησης, ο απαραίτητος εξοπλισμός επεξεργασίας και μετατροπής του σε ενέργεια, ώστε να αξιολογηθεί συνολικά η αλυσίδα αξίας του φλοιού, από τη συλλογή έως τη μετατροπή του σε ενέργεια, σε εφαρμογές οικιακού ή βιομηχανικού περιβάλλοντος.

Λέξεις Κλειδιά: Ανανεώσιμες, βιομάζα, βιο-οικονομία, βιοκαύσιμα, ενέργεια, πρώτη ύλη.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Με στόχο τη μείωση της κλιματικής αλλαγής και παράλληλα την αύξηση της βιωσιμότητας [1] των φυσικών πόρων, έγινε αντιληπτό ότι θα πρέπει να αντικατασταθούν οι πρώτες ύλες που προέρχονται από μη ανανεώσιμους πόρους, με άλλες οι οποίες βρίσκονται διαθέσιμες στο οικοσύστημα [2] και γίνεται άμεσα η ανανέωση τους.

Η ενέργεια έχει μεγάλη ζήτηση παγκοσμίως και αποτελεί σημαντικό πυλώνα της οικονομίας [3] μετατρέποντας τις ενεργειακές πρώτες ύλες σε κερδοφόρο παράγοντα. Σήμερα, ολοένα και μεγαλώνει η ανάγκη για ενεργειακή παραγωγή με χρήση ανανεώσιμων πρώτων υλών οι οποίες δεν έχουν αρνητικό αντίκτυπο στο περιβάλλον, αλλά μειωμένο αποτύπωμα άνθρακα [4]. Συγκεκριμένα, η δασική βιομάζα αποτελεί μία εξαιρετική πρώτη ύλη για την παραγωγή ενέργειας, με την προϋπόθεση όμως ότι χρησιμοποιείται ορθολογικά και αειφορικά [5].

Η δασική βιομάζα αναφέρεται πρωτίστως στο ξύλο ως βασικό δασικό προϊόν, και σε ύλες όπως ο φλοιός, φύλλα, βελόνες, κώνοι, κλάδοι και αρκετές άλλες ύλες. Η παρούσα μελέτη στόχο έχει να αξιολογήσει την ενεργειακή αξιοποίηση του φλοιού και να αναλύσει τις ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά καύσης του, τα οποία δύνανται να καταστήσουν ικανοποιητική τη χρήση του και την απόδοση του ως βιοκαύσιμο και να αναδείξει την προοπτική χρήσης του ως επιλογή, εναλλακτική των συμβατικών καυσίμων.

Ο φλοιός, καθόσον παραμένει ως υπόλειμμα κατά τη βιομηχανική αξιοποίηση της ξυλείας, θα μπορούσε να αποτελέσει ένα σημαντικό υλικό για χρήση στην παραγωγή ενέργειας, αλλά και ως πρώτη ύλη σε πλήθος προϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας.

Τα τελευταία χρόνια βρίσκει πεδίο αξιοποίησης στην παραγωγή μονωτικών υλικών [14] εξαιτίας των θερμομονωτικών και ηχομονωτικών ιδιοτήτων του, καθώς και λόγω του ότι αποτελεί ένα φυσικό, ανανεώσιμο υλικό με περιορισμένη απελευθέρωση διοξειδίου του άνθρακα, σε σύγκριση με τις συμβατικές πρώτες ύλες, σημειώνοντας με αυτό τον τρόπο θετικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις κατά τη χρήση του. Γενικότερα, οι μηχανικές του ιδιότητες όπως η αντοχή του σε διάφορους τύπους φορτίσεων ή η ακαμψία καθώς και οι ιδιότητες ανατομίας και μορφολογίας όπως το πάχος του [15] αποτελούν πλεονέκτημα για τη χρήση του ως βιομηχανικό υλικό.

Η μεταποίηση προϊόντων δασικής βιομάζας, όπως υπολείμματα ξύλου και φλοιού που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή μοριοσανίδων, ινοσανίδων και σκυροδεμάτων βρίσκουν θέση τα τελευταία χρόνια σε κτιριακές κατασκευές, αυξάνοντας με αυτό τον τρόπο τη διατήρηση θερμότητας των κτισμάτων μέσω της φυσικής μόνωσης που δημιουργούν [18].

Φαίνεται ότι ο φλοιός αξιοποιείται σε παγκόσμιο επίπεδο σύμφωνα με αναφορές σε έρευνες που γίνονται στην Κίνα όπου γίνονται δοκιμές αντικατάστασης δομικών υλικών με φλοιό δέντρων σε δομικά υλικά. Στην έρευνα των Li et al., [38], συλλέχθηκαν δείγματα φλοιού από δεκαπέντε διαφορετικές περιοχές της δυτικής Κίνας. Μετά από αυτή τη συγκομιδή έγιναν μετρήσεις στις συγκεντρώσεις των χημικών ιδιοτήτων των δειγμάτων και βρέθηκαν οι μέσες τιμές τους. Στη συνέχεια, έγινε σύγκριση των τιμών αυτών με τις αντίστοιχες τιμές του αφρού πολυουρεθάνης, η οποία χρησιμοποιείται στην παραγωγή δομικών υλικών, και έγινε αντιληπτό ότι οι τιμές του φλοιού υπερτερούσαν σημαντικά καταστόντας τον φλοιό ανταγωνιστικό υλικό που είναι δυνατό να αντικαταστήσει τον αφρό πολυουρεθάνης σε διάφορες εφαρμογές.

2. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΦΛΟΙΟΥ

Ο φλοιός αποτελεί το περίβλημα του δέντρου, το οποίο δρα προστατευτικά σε αυτό [6], έναντι των τραυματισμών, προσβολών από έντομα, μικροοργανισμούς, κλιματικούς παράγοντες κ.α., παράγοντες οι οποίοι ενδέχεται να προκαλέσουν βλάβες τόσο στη φυσική λειτουργία του δέντρου όσο και στην ποιότητα του παραγόμενου ξύλου [7]. Παράλληλα, πρόκειται για σχετικά δύσκολα εμπορεύσιμο υλικό, ενώ αξιοποιείται περισσότερο ως υπόλειμμα.

Από τις βασικότερες ιδιότητες του φλοιού ως υλικό, έχουν μελετηθεί κατά κόρον η αντισηπτική και αντιμικροβιακή του ιδιότητα. Όσον αφορά στην αντισηπτική του δράση, επισημαίνεται ότι ο φλοιός αποτελείται από χημικές ενώσεις κυρίως αρωματικής φύσεως, όπως η μεθανόλη, αλκοόλες, φαινόλη, χλωροφόρμιο κ.α., [8]. Ωστόσο είναι δύσκολη η απομόνωση των πτητικών αυτών συστατικών μετά την απομάκρυνση και την ξήρανση του φλοιού [9] και χαμηλότερης απόδοσης, σε σχέση με τη διαδικασία

της εκχύλισης, η οποία μπορεί να υλοποιηθεί άμεσα μετά την απομάκρυνση του και πριν ξηρανθεί και χάσει μεγάλο ποσοστό των εκχυλισμάτων του. Παράλληλα, ποιοτική ανάλυση των εκχυλισμάτων του φλοιού αποδεικνύει αντιμικροβιακή δραστηριότητα που οφείλεται στην παρουσία οξικού αιθυλεστέρα [10].

Η αντιοξειδωτική δράση του φλοιού [11], αποτελεί παράγοντα που συμβάλει στην επιβίωση του ατόμου καθώς το προστατεύει από έντομα και μύκητες που ενδέχεται να το προσβάλλουν. Επιπλέον, αποτελεί ένα μέσο προστασίας από τις δασικές πυρκαγιές, έχοντας αντιπυρικές ιδιότητες ικανές να επιβραδύνουν την εξάπλωση της φωτιάς [12]. Η πυκνότητά του διαφέρει από είδος σε είδος, ενώ πολλές φορές διαφορές παρατηρούνται ακόμη και σε δέντρα του ίδιου είδους. Μάλιστα σε ορισμένα είδη η πυκνότητα του φλοιού ενδέχεται να είναι μεγαλύτερη ακόμη και από αυτή του ξύλου [13].

Στο επίκεντρο του ενδιαφέροντος βρίσκονται επίσης, οι θερμικές ιδιότητες του φλοιού, ο οποίος παρουσιάζει χαμηλή θερμοαγωγιμότητα όταν βρίσκεται σε συνθήκες υγρασίας κάτω από 20%. Όσο όμως, αυξάνεται το ποσοστό της υγρασίας αυξάνεται και η θερμοαγωγιμότητα του φλοιού προσεγγίζοντας αυτή του καθαρού ξύλου [13]. Ταυτόχρονα, η θερμαντική αξία του φλοιού με μηδενική υγρασία διαφέρει στα κωνοφόρα και τα πλατύφυλλα, εξαιτίας της διαφοράς στη χημική τους σύσταση, κάνοντας τα κωνοφόρα να υπερτερούν λόγω της μεγαλύτερης ποσότητας ρητίνης. Ωστόσο, διαφορά θερμαντικής αξίας του φλοιού παρουσιάζεται και μεταξύ των ειδών.

Η χημική σύσταση του φλοιού περιλαμβάνει δομικές πολυμερείς ενώσεις όπως κυτταρίνη, ημικυτταρίνες και λιγνίνη, αλλά και μη δομικές τέφρα και εκχυλίσματα, συστατικά τα οποία διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην μετέπειτα αξιοποίηση του φλοιού, δεδομένου ότι εξαιτίας της χημικής τους σύστασης διαφοροποιούνται και οι φυσικές, θερμικές και υγροσκοπικές ιδιότητες του φλοιού [32]. Σαφώς το πεδίο εφαρμογής του φλοιού, εξαρτάται από την ποιότητα και τις ιδιότητές του [16].

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα είναι η διαθεσιμότητα μεγάλης κλίμακας [28] αφού πρόκειται για ανανεώσιμη πρώτη ύλη που βρίσκεται εύκολα στο φυσικό περιβάλλον σε μεγάλες ποσότητες. Στα θετικά συνυπολογίζεται, η λήψη ενεργού άνθρακα από το φλοιό, ο οποίος ενεργοποιείται σε διαφορετικές θερμοκρασίες με τη συνδρομή σφαιριδίων υδροξειδίου του καλίου [29] έχοντας τη δυνατότητα να δώσει ηλεκτρική ενέργεια όταν συνυπάρχει με ηλεκτρολύτες, με τρόπο φιλικό προς το περιβάλλον. Εν κατακλείδι, σημαντικό παράγοντα αποτελεί το γεγονός ότι χρησιμοποιώντας ακόμη και την πιο απλή μέθοδο μετατροπής σε ενέργεια, αυτή της καύσης μπορεί ο φλοιός [7] να συμβάλει σε μεγάλο βαθμό στην παραγωγή ενέργειας.

Από την άλλη πλευρά, εντοπίζονται αδυναμίες στην αξιοποίηση του φλοιού στην παραγωγή ενέργειας, ξεκινώντας από τη χαμηλότερη απόδοση που έχει σε σχέση με καθαρό ξύλο [30], ιδίως σε ανοιχτού τύπου συστήματα καύσης. Η χαμηλότερη ενεργειακή απόδοση αφορά το υψηλό πορώδες του υλικού και τις διαφορές του φλοιού σε χημική σύσταση σε σχέση με το ξύλο [31], καθώς η περιεκτικότητα σε κυτταρίνη και ημικυτταρίνες είναι υψηλότερη στο φλοιό, ενώ ταυτόχρονα οι πηκτινικές ουσίες παρουσιάζουν μεγαλύτερα ποσοστά σε σύγκριση με το ξύλο [13]. Λόγω της υψηλής περιεκτικότητας του σε τέφρα [32], ο φλοιός μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα στη λειτουργία του καυστήρα διότι απαιτείται πολύ πιο συχνός καθαρισμός της τέφρας σαν υπόλειμμα, αλλά και της αιωρούμενης τέφρας που επικάθεται στα τοιχώματα των καυστήρων, προκαλώντας διάβρωση και σταδιακή καταστροφή τους. Ταυτόχρονα, η καύσης του φλοιού ενδέχεται να προκαλέσει δευτερογενή προβλήματα σχετικά με τους περιβαλλοντικούς ρύπους καθώς η διαδικασία καύσης απαιτεί χρήση εξωγενών παραγόντων οι οποίοι παράγουν τοξική σκόνη, οξείδια του αζώτου κ.α., που βλάπτουν το περιβάλλον [28]. Για την επεξεργασία του φλοιού έως την τελική κατεργασία για την παραγωγή ενέργειας απαιτείται νέος εξειδικευμένος εξοπλισμός [33], ώστε να υπάρχει σύστημα αυτοκαθαρισμού της τέφρας ή ειδικές επιστρώσεις στα εσωτερικά τοιχώματα του καυστήρα ώστε να ανθίσταται η εγκατάσταση του καυστήρα στη φθορά και καταστροφή του.

3. ΤΥΠΟΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.

Η άμεση καύση είναι αυτή που ενδιαφέρει περισσότερο, αφού μελλοντικός στόχος είναι η μετατροπή της βιομάζας (φλοιός, βελόνες, κλαδιά) σε πρώτη ύλη που θα προσδώσει θερμική ενέργεια μέσω της καύσης της. Η θερμική ενέργεια που παράγεται από φλοιό, πρόκειται για τύπο ενέργειας, ο οποίος αφορά άμεσα τους καταναλωτές λόγω της χαμηλότερης τιμής [20] σε σχέση με άλλες ενεργειακές πρώτες ύλες (πετρέλαιο, αέριο κ.α.).

Η χρήση του φλοιού για την παραγωγή θερμικής ενέργειας είναι ζωτικής σημασίας καθώς με βάση την έρευνα των Wang et al., [21] οι οποίοι μελέτησαν το φλοιό της ερυθρελάτης (Norway spruce) και το

επίπεδο θερμογόνου δύναμης που μπορεί να παραχθεί από αυτόν, όταν πραγματοποιείται πυροσυσσωμάτωση σε σωληνωτό αντιδραστήρα. Τα αποτελέσματα της μελέτης, έδειξαν ότι η θέρμανση έχει αυξητική τάση και σταθερή περιεκτικότητα άνθρακα. Πιο συγκεκριμένα, ο φλοιός παρέμεινε στον αντιδραστήρα στους 225, 275 και 300 ℃για 30 και 60 λεπτά. Εν συνεχεία, μετρήθηκαν οι γενικές ιδιότητες του, η χημική σύσταση, η δυνατότητα αλέσεως, η μικροδομή και η μορφολογία του μετά την παραμονή του στο σωληνωτό αντιδραστήρα στα δύο χρονικά επίπεδα αλλά και την έκθεση του στα τρία επίπεδα θερμοκρασίας. Με βάση αυτές τις μετρήσεις τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι τιμές της κυτταρίνης και της ημικυτταρινών μειώνονταν με τη σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας και την εκτεταμένη παραμονή του στον αντιδραστήρα. Η μορφολογική δομή φαίνεται να έχει αλλάξει ενώ ταυτόχρονα μειώθηκαν οι αναλογίες του μήκους. Όπως προκύπτει από τα παραπάνω αποτελέσματα, η βελτίωση των φυσικοχημικών ιδιοτήτων μπορεί να φέρει θετικά αποτελέσματα στην αξιοποίηση του φλοιού για παραγωγή ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, ο ακατέργαστος φλοιός διατηρεί την ινώδη δομή του με αποτέλεσμα να μην μειώνονται οι αναλογίες της διαμέτρου του πάχους του, έχοντας έτσι μεγαλύτερη θερμαντική αξία.

Επιπροσθέτως, ενέργεια μπορεί να παραχθεί από τη χρήση δασικών υπολειμμάτων και συγκεκριμένα από την καύση τεμαχιδίων ξύλου (wood chips) και σύμπηκτων ξύλου (pellets) [22]. Ο φλοιός μπορεί να αποτελέσει μέρος της βασικής πρώτης ύλης για την παραγωγή των συγκεκριμένων στερεών βιοκαυσίμων [23], μαζί με καθαρό ξύλο και πιθανόν άλλα μέρη ενός δέντρου όπως, κλαδιά, κορυφή, ρίζες κτλ. Με τον όρο ότι τηρούνται οι προϋποθέσεις των αντίστοιχων προτύπων των στερεών βιοκαυσίμων σε ποσοστό τέφρας, θερμογόνου δύναμης, υγρασίας και άλλων ιδιοτήτων [35].

4. ΚΟΣΤΟΣ ΦΛΟΙΟΥ

Ο φλοιός χαρακτηρίστηκε παραπάνω ως μία πολύ καλή πρώτη ύλη για την παραγωγή ενέργειας, το κόστος του όμως δεν βοηθούσε στην ανάπτυξη εμπορίου του τα προηγούμενα χρόνια. Αυτό συνέβαινε κυρίως διότι σε πολλές περιπτώσεις μετά την υλοτομία, τα κορμοτεμάχια αποφλοιώνονταν μέσα στο δάσος και μετά μεταφέρονταν με ζώα ή ελκυστήρες εκτός δασικού οικοσυστήματος, αφήνοντας το υλικό του φλοιού μέσα στο υλοτόμιο, όπου υποβαθμιζόταν η ποιότητά του, εξαιτίας της δράσης βιοτικών και αβιοτικών παραγόντων, ενώ απαιτούνταν διπλός κόπος για τη συγκομιδή του σε δεύτερο χρόνο. Συνεπώς, η επεξεργασία και αξιοποίηση του φλοιού αποτελούσε επένδυση αρκετά υψηλή [24] και εξαιρετικά χρονοβόρα. Ουσιαστικά, οι ξυλουργικές εταιρείες χρησιμοποιούσαν το φλοιό περισσότερο ως συσκευασία στη μεταφερόμενη ξυλεία εφόσον την προστατεύει από τυχόν χτυπήματα, ενώ ταυτόχρονα ο διαχωρισμός του φλοιού από το ξύλο, απαιτούσε μεγάλη δαπάνη. Σύμφωνα, με τους Kizha και Han [25], οι οποίοι μελέτησαν τη διαδικασία συγκομιδής της δασικής βιομάζας και το στάδιο της επεξεργασίας της με σκοπό την ανάλυση των μηχανημάτων που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν δίνοντας την υψηλότερη απόδοση, το μεγαλύτερο κόστος αφορά στη συλλογή και μεταφορά της βιομάζας φλοιού και όχι τόσο στην επεξεργασία της. Παράλληλα, να σημειωθεί ότι οι τιμές των προϊόντων ξύλου έκρυβαν αβεβαιότητα [23] διότι επρόκειτο για ετήσια συγκομιδή η οποία βασιζόταν στο ποσοστό της ληφθείσας ύλης και το πόσο αυτή κάλυπτε τις ανάγκες της αγοράς. Δεδομένου αυτού, οι τιμές διέφεραν ετησίως γεγονός που ήταν συχνά καθησυχαστικό για τον έμπορο πώλησης αλλά δημιουργούσε μεγάλη ανησυχία στους αγοραστές. Ωστόσο, σήμερα η ανάπτυξη της ανακύκλωσης και της ανάκτησης των ξύλινων κατασκευών, αυξάνει τη διαθεσιμότητα ξύλου στην αγορά γεγονός που οδηγεί σε σταθεροποίηση τιμών. Ταυτόχρονα, η ενεργειακή καλλιέργεια λιγνοκυτταρινικών ειδών συμβάλλει στη σταθεροποίηση των τιμών και την εξέλιξη του εμπορίου των βιοκαυσίμων τόσο του φλοιού όσο και ξύλου.

5. ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΥ ΦΛΟΙΟΥ

Σημαντικός παράγοντας για την άμεση αξιοποίηση του φλοιού αποτελεί η μετατόπιση ολόκληρου του κορμού από το υλοτόμιο καθώς είναι ευκολότερο να αξιοποιηθεί το σύνολο της δασικής βιομάζας του δέντρου [26], ενώ παράλληλα, αποτελεί οικονομικότερη δίοδο σε σχέση με τον τεμαχισμό του κορμού σε μικρότερα μέρη. Για την απομάκρυνση του φλοιού από το υλοτομημένο δέντρο και την λήψη τυπικής δομής πριστών και υψηλής ποιότητας κορμοτεμαχίων [27] χρησιμοποιούνται μηχανήματα αποφλοίωσης δέντρου. Θεωρείται προτιμότερη η αποφλοίωση του κορμού στη βιομηχανία ξύλου, ώστε να μην τίθεται κίνδυνος προσβολής από μικροοργανισμούς στο υλοτόμιο. Στη συνέχεια, αναλόγως με το είδος της ενέργειας για την παραγωγή της οποίας διατίθεται ο φλοιός και το σύστημα του καυστήρα που θα χρησιμοποιηθεί, το υλικό μπορεί να θρυμματιστεί σε τεμαχίδια φλοιού ή να πολτοποιηθεί σε κατάλληλα μηχανήματα (σπαστήρες, μύλους, κ.α.) Ωστόσο η δημιουργία της σκόνης

φλοιού σε μηχανήματα θρυμματισμού έχει την τάση να δημιουργεί δυσκολίες λειτουργίας εξαιτίας του υψηλού ποσοστού εκχυλισμάτων του, κάνοντας το υλικό να κολλάει στα τοιχώματα του μύλου και συχνά να αναπτύσσονται υψηλότερες θερμοκρασίες, με αποτέλεσμα να αλλοιώνεται η χημική σύσταση της πρώτης ύλης και να υπάρχει κίνδυνος φθοράς και καταστροφής των μέσων θρυμματισμού.

6. ΜΕΛΕΤΗ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΦΛΟΙΟΥ ΣΕ ΕΛΛΑΔΑ ΚΑΙ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟ

6.1. Μελέτη αξιοποίησης του φλοιού στην Ελλάδα

Στην Ελλάδα η χρήση της δασικής βιομάζας έχει αρχίσει να συγκεντρώνει το ενδιαφέρον των επιστημόνων οι οποίοι εκπονούν μελέτες οι οποίες συμβάλουν στην ανάπτυξη νέων επιχειρηματικών καινοτόμων ιδεών. Καταρχάς, ο φλοιός καιγόταν μαζί με το κύριο σώμα του ξύλου στη μορφή καυσόξυλου, από καταβολής της χρήσης του έως και σήμερα. Παράλληλα, μία εναλλακτική χρήση του αποτέλεσε η παραγωγή εξευγενισμένων στερεών βιοκαυσίμων υψηλής ποιότητας (σύμπηκτα, μπρικέτες, κ.α.). Ωστόσο, το γεγονός ότι ο φλοιός είναι το μέρος της μάζας του δέντρου το οποίο έχει τη μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε τέφρα [7], καθιστά τη χρήση του για την παραγωγή ενέργειας δύσκολη, καθώς τα ευρωπαϊκά και διεθνή πρότυπα σχετικά με τα στερεά βιοκαύσιμα οικιακής, αλλά και βιομηχανικής χρήσης [34], επιβάλουν αρκετά χαμηλά ποσοστά περιεχόμενης τέφρας. Συνεπώς, δύναται να χρησιμοποιείται ένα μέρος του φλοιού και ένα μέρος του ξύλου σε μείξη, ώστε να παραγονται στερεά βιοκαύσιμα αποδεκτής ποιότητας.

Στην έρευνα των Καμπερίδου και Μπαρμπούτη [35], αντικείμενο μελέτης αποτέλεσε ο φλοιός της ακακίας, ενός είδους με χαμηλές απαιτήσεις ανάπτυξης, το οποίο έχει μικρότερο ποσοστό περιεχόμενης τέφρας, συγκριτικά με άλλα είδη. Ο φλοιός χρησιμοποιήθηκε για έλεγχο της θερμογόνου δύναμης που φέρει καθώς μετρήθηκαν και συγκρίθηκαν οι τιμές θερμογόνου δύναμης που παράχθηκαν από τις ίδιες ποσότητες καύσης καθαρού ξύλου και φλοιού, αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο φλοιός εμφάνισε υψηλότερες τιμές θερμαντικής αξίας από ότι το καθαρό ξύλο, παρά το υψηλό ποσοστό τέφρας.

Συνεπώς, κύριος στόχος κατά την παραγωγή στερεών βιοκαυσίμων με συμμετοχή φλοιού είναι η επίτευξη ελάττωσης περιεκτικότητας του σε τέφρα. Σε έρευνα των Kamperidou et al. [34], παρουσιάζονται κάποια βασικά θερμικά χαρακτηριστικά τα οποία συνδράμουν στην κατανόηση της ενεργειακής τους συμπεριφοράς. Αναλύονται οι ιδιότητες Μεσογειακών ειδών όπως η βελανιδιά, η οξιά και η ψευδοακακία, τα οποία αποτελούν τα βασικά είδη που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ενέργειας στην Ελλάδα. Σημειώθηκε υψηλή θερμογόνος δύναμη στο φλοιό ακακίας, σε αντίθεση με τη δρύ και οξιά. Η θερμογόνος δύναμη βρέθηκε υψηλότερη στο ξύλο των ειδών ενώ το ποσοστό τέφρας ήταν ελάχιστο. Με βάση αυτά τα αποτελέσματα προκύπτει ότι το ξύλο των ειδών αυτών είναι ιδανικό για την παραγωγή σύμπηκτων που ανταποκρίνονται στα πρότυπα, ενώ ένας συνδυασμός ποσοστών φλοιού, θα μπορούσε να εξασφαλίσει την υψηλότερη θερμογόνο δύναμη και χαμηλότερο ποσοστό τέφρας.

Διαφαίνεται ότι στην Ελλάδα υπάρχει ενδιαφέρον αξιοποίησης της δασικής βιομάζας ως σύνολο, αλλά ο φλοιός ως ξεχωριστή ύλη εξετάζεται κυρίως τα τελευταία χρόνια, στην παραγωγή καύσιμης ύλης [36]. Η χρήση του φλοιού ως πρώτη ύλη για την παραγωγή σύμπηκτων (pellets) αποτελεί αντικείμενο μελέτης από τους επιστήμονες, καθώς φαίνεται ότι η μίξη του φλοιού με ξύλο δίνει χαμηλό ποσοστό τέφρας. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της μελέτης των Kamperidou και Barboutis [35] η αναλογία των ποσοστών μίξης των πρώτων υλών καθιστά τα σύμπηκτα κατάλληλα τόσο για οικιακή (5-15% φλοιός), όσο και για βιομηχανική χρήση (20-25% φλοιός).

6.2. Μελέτη αξιοποίησης του φλοιού σε Ευρώπη

Στην Ευρώπη καταγράφεται εντατικότερη συγκομιδή και αξιοποίηση του φλοιού καθώς και εξειδικευμένη κατεργασία του ώστε να αξιοποιηθεί με βέλτιστο τρόπο. Σε κάποιες χώρες γίνεται χρήση σύμπηκτων ξύλου για οικιακή θέρμανση αλλά και για θέρμανση θερμοκηπίων [19], τα οποία συμπεριλαμβάνουν και μέρος του φλοιού. Σύμφωνα με στατιστικά του FAO (Food and Agricultural Organization) [17] για το έτος 2019 η παραγωγή ξυλόσκονης και τεμαχιδίων φτάνει τα 89.515.114 m^3 ενώ η παραγωγή σύμπηκτων ανέρχεται σε 21.553.778 τόνους. Αυτά τα δεδομένα δείχνουν την πρακτική αξιοποίηση του φλοιού κατά το περασμένο έτος, αποδεικνύοντας ότι πέρα από τη θεωρητική μελέτη υπάρχει εφαρμογή αξιοποίηση και προώθησης στην ευρωπαϊκή αγορά. Ωστόσο, αναφερόμενοι στην παγκόσμια παραγωγή, τα αντίστοιχα ποσά είναι 274.653.843 m^3 και 39.628.803 τόνοι.

Ταυτόχρονα πραγματοποιούνται ερευνητικές προσπάθειες που συμβάλουν στην αξιοποίηση του φλοιού. Οι Filbakk et al., [37] πραγματοποίησαν δοκιμές αντικατάστασης ξύλου με φλοιό σε μπρικέτες σε ποσοστά της τάξης 5, 10, 30 και 100%. Η ανθεκτικότητα δεν έδειξε να διαφέρει πολύ αλλά η πυκνότητα παρουσίασε υψηλότερη τιμή σε σχέση με τα δοκίμια που αποτελούνταν από καθαρό ξύλο. Ως εκ τούτου, η υψηλή περιεκτικότητα σε φλοιό είχε ως αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη παραγωγή τέφρας η οποία αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα στη χρήση. Ωστόσο, η πιο ιδανική από τις εξεταζόμενες περιεκτικότητες σε φλοιό ήταν σε ποσοστό 10%, στην οποία η τέφρα έφτανε το 0,7%.

Σύμφωνα με τον Toklu [39], σε μελέτη που υλοποίησε για τη χρήση της βιομάζας στη χώρα, τα υπολείμματα ξύλου δείχνουν να αποτελούν την κύρια πηγή ενέργειας για την αγροτική Τουρκία με αυτό να συνεπάγεται ότι παράγεται ηλεκτρική ενέργεια, θερμαίνονται οι κατοικίες, κ.α., αξιοποιώντας σε μεγάλο βαθμό και το φλοιό. Πιο συγκεκριμένα, μελετήθηκε η προτίμηση των καταναλωτών στα καύσιμα από λιγνοκυτταρινικές πρώτες ύλες ή αυτούσια καυσόξυλα, αφού το ποσοστό τους στην παραγωγή ενέργειας φτάνει το 14%. Αυτό σημαίνει ότι, τα καύσιμα από βιομάζα άρχισαν να χρησιμοποιούνται περισσότερο, γεγονός που δείχνει ότι το ενεργειακό δυναμικό της βιομάζας είναι ικανοποιητικό, ώστε να μειωθούν οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και ταυτόχρονα να αυξηθεί η βιωσιμότητα της χώρας.

Η περιεκτικότητα του φλοιού σε υγρασία κατά το στάδιο της υλοτομίας και συγκομιδής του, διαφοροποιείται ανάλογα με το είδος, αλλά και τις συνθήκες στις οποίες βρισκόταν το δέντρο κατά την υλοτομία [7]. Οι Nemeth και Molnar [40], κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι ανάλογα με το είδος του δέντρου οι ιδιότητες του φλοιού μπορεί να διαφέρουν σημαντικά με αποτέλεσμα να μην αντιστοιχούν σε υψηλή ενεργειακή απόδοση. Παράλληλα, οι ιδιότητες του καθαρού ξηρού ξύλου συμπεριλαμβανομένου και του φλοιού ενδέχεται να διαφέρουν σχετικά με το φλοιό ως ανεξάρτητη πρώτη ύλη. Σε πολλές περιπτώσεις είναι ανάγκη να γίνεται διαχωρισμός του φλοιού από το ξύλο, ώστε να είναι μεγαλύτερη η δυνατότητα επεξεργασίας και αξιοποίησης του φλοιού.

Η μετατροπή του φλοιού σε βιοαέριο μέσω της αναερόβιας χώνευσης, όπως αναδεικνύει η μελέτη των Zheng et al. [41] έχει υψηλές προοπτικές τοποθετώντας την αξιοποίηση της λιγνοκυτταρινικής βιομάζας στο επίκεντρο. Πρόκειται για μία τεχνολογία μετατροπής σε ενέργεια, οικονομική, η οποία χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, θερμότητας και συμπίεσης αερίου, που όμως θεωρείται αρκετά περίπλοκη όταν πρόκειται για την επεξεργασία λιγνοκυτταρινικής βιομάζας. Αυτό συμβαίνει λόγω της περίπλοκης δομής που διαθέτουν τα φυτικά κύτταρα, τα οποία ενδέχεται να ευνοήσουν τις μικροβιακές προσβολές. Για αυτό το λόγο, είναι απαραίτητη μία προγενέστερη επεξεργασία ώστε να γίνει εφικτή η μεγαλύτερη απόδοση βιοαερίου από την επεξεργασία λιγνοκυτταρινικής βιομάζας. Οι προεργασίες που υλοποιούνται ώστε να βελτιώσουν την κατάσταση της λιγνοκυτταρινικής βιομάζας είναι άλεση, εισαγωγή σε πυραντήριο, ξήρανση, έκθεση σε ατμό, υγρή οξείδωση, κατεργασία με ζεστό νερό, αλκαλική υδρόλυση, οζονόλυση, έκρηξη ινών αμμωνίας, θερμικό οξύ, θερμικό αλκάλιο, θερμικό οξειδωτικό και βιολογική προεπεξεργασία [41,42].

Η παραγωγή βιοελαίου, παρουσιάζει επίσης ένα αυξανόμενο ενδιαφέρον, καθώς μέσω της πυρόλυσης που διενεργείται από τα βιοδιυλιστήρια είναι, πλέον, δυνατή η απομόνωση των χρήσιμων συστατικών της ξυλώδους βιομάζας ώστε να παραχθεί βιοέλαιο, για παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας. Σύμφωνα με τους Mourant et al. [43], ο φλοιός αποτελεί πρώτη ύλη η οποία άρχισε να εξετάζεται τα τελευταία χρόνια ως αυτόνομο κομμάτι της ξυλώδους βιομάζας χωρίς να διαφέρει έντονα η συμπεριφορά του κατά τη διαδικασία πυρόλυσης συγκριτικά με το ξύλο. Η διαδικασία πυρόλυσης του φλοιού ευκαλύπτου που χρησιμοποίησαν στο πείραμα τους, έγινε σε αντιδραστήρα ρευστοποιημένης κλίνης όπου χρησιμοποιήθηκε αέριο αζώτου που προθερμάθηκε ηλεκτρικά πριν την ανάμιξη του με άμμο. Πραγματοποιήθηκε διαχωρισμός των στερεών μερών από τον ατμό και σημειώθηκε αρκετά μεγάλη συγκέντρωση ανόργανων στοιχείων που ενδεχομένως θα μπορούσαν να αποβούν προβληματικά εάν δεν επιτυγχανόταν η συγκράτησή τους σε άνθρακα ώστε να μην κινδυνεύουν από αλλοίωση κατά το χρόνο αποθήκευσής τους.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συμπερασματικά, ο φλοιός των δασικών δέντρων αποτελεί μία πολύτιμη, ανανεώσιμη πρώτη ύλη, η οποία είναι ικανή να συμβάλλει δυναμικά στην παραγωγή ενέργειας ενώ παράλληλα έχει μηδενικό ισοζύγιο άνθρακα και ρύπων. Καθίσταται φανερό ότι η βιομάζα χρησιμοποιείται σε μεγάλο βαθμό παγκοσμίως ενώ και ο φλοιός έλκει το ενδιαφέρον του ερευνητικού και βιομηχανικού κόσμου, ως πρώτη ύλη, προς βελτίωση της αξιοποίησης του. Αποτελεί μία πρώτη ύλη υψηλής διαθεσιμότητας, η οποία ταυτόχρονα ανανεώνεται με ικανοποιητική ταχύτητα ώστε να τροφοδοτεί την ενεργειακή παραγωγή, καθώς διαθέτει υψηλό ενεργειακό δυναμικό. Η συγκομιδή, η μεταφορά και η αποφλοίωση

των κορμών αποτελεί επίπονη, χρονοβόρα και κοστοβόρα διαδικασία, αλλά όχι περισσότερο από τις αντίστοιχες διαδικασίες συγκομιδής ξύλου. Ο φλοιός καίγεται μαζί με το ξύλο παραδοσιακά στην μορφή του καυσόξυλου, μπορεί να συμμετέχει σε υψηλότερης ποιότητας εξευγενισμένα στερεά βιοκαύσιμα (σύμπηκτα, μπρικέτες, τεμαχίδια κ.α.). Η υψηλή περιεκτικότητά του σε τέφρα μειώνει τις προοπτικές αξιοποίησης του στην παραγωγή ενέργειας, καθώς τα ευρωπαϊκά και διεθνή πρότυπα για τα στερεά βιοκαύσιμα απαιτούν αρκετά χαμηλά όρια περιεχόμενης τέφρας, απαιτήσεις που με τα χρόνια φαίνεται να σκληραίνουν. Συνεπώς, δύναται να χρησιμοποιείται ένα μικρό μέρος μόνο φλοιού μαζί με καθαρό ξύλο σε μείξη για την παραγωγή στερεών βιοκαυσίμων, για χρήση σε οικιακό περιβάλλον, ή σε λίγο υψηλότερα ποσοστά συμμετοχής για βιομηχανικές ενεργειακές εφαρμογές. Ο φλοιός δύναται να αξιοποιηθεί ενεργειακά, αλλά χρειάζονται ειδικοί καυστήρες που αντέχουν στη συσσώρευση τέφρας και δεν φθείρονται εύκολα, το οποίο είναι πιο σύνηθες σε βιομηχανικό και λιγότερο σε οικιακό περιβάλλον. Η επέκταση των ερευνητικών προσπαθειών για την αξιοποίηση του φλοιού στην παραγωγή ενέργειας είναι επιβεβλημένη για την πληρέστερη και πιο εκτεταμένη χρήση αυτής της άφθονης βιολογικής πρώτης ύλης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Moreli, J., (2011) Environmental sustainability: A definition for environmental professionals. Journal of Environmental Sustainability, 1(1), 2. DOI: 10.14448/jes.01.0002

[2] McKendry, P., (2002) Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. Bioresource Biology, 83(1), pp. 37-46. https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00118-3

[3] Yao, X., Yasmeen, R., Padda, I.U.H., Shah, W.U.H., Kamal, M.A., (2020) Inequalities by energy sources: An assessment of environmental quality. PLoS ONE 15(3): e0230503. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0230503

[4] Venter, M., Venter, O., Edwards, W., Bird, M.I., (2015) Validating Community-Led Forest Biomass Assessments. PLoS ONE 10(6): e0130529. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0130529

[5] Jakubowicz, P.P., (2018) Forest biomass as a renewable energy source-consequences for forestry. Sylwan, 162(8), pp 688-695. https://sylwan.lasy.gov.pl/

[6] Chrabąszcz, M. and Mróz, L., (2016) Tree Bark, a valuable source of information on air quality. Polish Journal of Environmental Studies, 26(2), pp. 453-466, DOI: https://doi.org/10.15244/pjoes/65908

[7] Pásztory, Z., Ronyecz Mohácsiné, I., Gorbacheva, G., Börcsök Z., (2016) The utilization of tree bark. BioResources, 11(3). 7859-7888. https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/the-utilization-of-tree-bark/

[8] Shukla, S., Mishra, T., Pal, M., Meena, B., Singh Rana, T., Upreti, D.K., (2017) Comparative Analysis of Fatty Acids and Antioxidant Activity of Betula utilis Bark Collected from Different Geographical Region of India. Free Radicals and Antioxidants, 7(1), pp. 1-10.

[9] Navaratne, S.B., (2015) Determination of the effectiveness of hal bark (Vateria copallifera) as a natural preservative for food security of confectionery industry. Department of Food Science and Technology, University of Sri Jayewardenepura, Sri Lanka.

[10] Thambi, M. and Cherian T., (2015) Phytochemical investigation of the bark of Strychnosnux-vomica and its antimicrobial properties. The Pharma Innovation, 4(5), pp. 70-72.

[11] Tálos-Nebehaj, E., Levente, A., Visi-Rajczi, E., Hofmann, T., (2020) Combined multi-assay evaluation of the antioxidant properties of tree bark. Acta Silvatica et Lignaria Hungarica, 15(2), pp. 85-97.

[12] Pásztory, Z., Ronyecz Mohácsiné, I. and Börcsök Z., (2017) Investigation of thermal insulation panels made of black locust tree bark. Construction and Builting Materials, 147, pp. 733-735.

[13] Tsoumis, G.T., (1983) Science and technology of wood, Volume B'. Industrial utilization. Published by A.S. Gartaganis, Thessaloniki, Greece, E.U.

[14] Kain, G., Barbu, M-C., Richter, K., Plank, B., Tondi, G., Petutschnigg, A., (2015) Use of tree bark as insulation material. Forest Product Journal, 65(3-4).

[15] Finto, A., Schimleck, R.L., Daniels, F.R., Clark, A., Borders, E.B., Kane, B.M., Burkhart, E.H., (2014) Whole-tree bark and wood properties of loblolly pine from intensively managed plantations. Forest Science, 61(1), pp. 55-66.

[16] MacDonald, E. and Hubert, J.. 2002. A review of the effects of silviculture on timber quality of Sitka spruce. Forestry 75(2), pp. 107–138.

[17] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2019) Forestry Production and Trade Data.

[18] Jungki, S., Seunghwan, W., Sumin, K., (2016) Evaluation and analysis of the building energy saving performance by component of wood products using energyPlus. Journal of the Korean Wood Science and Technology, 44(5), pp. 655-663.

[19] Vindiš, P., Stajnko, D., Lakota, M., Berk, P., Muršec, B., (2011) Energy efficiency of two types of greenhouses heated by wood biomass. Aktualni Zadaci Mehanizacije Poljoprivrede. Zbornik radova, 39. Međunarodnog Simpozija iz Područja Mehanizacije Poljoprivrede, Opatija, Hrvatska, 22-25 veljače 2011. pp. 161-170.

[20] Wang, K., Zhang, Y., Sekelj, G., Hopke, P.K., (2019) Economic analysis of a field monitored residential wood pellet boiler heating system in New York State. Renewable Energy, 133, pp. 500-511

[21] Wang, L., Barta-Rajnai, E., Skreiberg, O., Khalil, R., Czegeny, Z., Jakab, E., Barta, Z., Gronli, M., (2018) Effect of torrefaction on physiochemical characteristics and grindability of stem wood, stump and bark. Applied Energy, 227, pp. 137-148.

[22] Weldu, Y.W., Assefa, G., Jolliet, O., (2017) Life cycle human health and ecotoxicological impacts assessment of electricity production from wood biomass compared to coal fuel. Applied energy, 187, pp. 564-574.

[23] Roder, M., Whittaker, C. and Thornley, P., (2015) How certain are greenhouse gas reductions from bioenergy? Life cycle assessment and uncertainty analysis of wood pellet-to-electricity supply chains from forest residues. Biomass and Bioenergy, 79, pp. 50-63.

[24] Jansone, Z., Muizniece, I., Blumberga, D., (2017) Analysis of wood bark use opportunities. Energy Procedia, 128, pp. 268-274.

[25] Kizha, A.R. and Han, H.-S., (2016) Processing and sorting forest residues: Cost, productivity and managerial impacts. Biomass and Bioenergy, 93, pp. 97-106.

[26] Τσούμης, Γ., (2002) Δομή και ιδιότητες ξύλου. Υπηρεσία Δημοσιευμάτων, Α.Π.Θ. Θεσσαλονίκη.

[27] Barbosa, A.C.F., Costa, G.R.O., Angyalossy, V., Dos Santos, T.C., Pace, M.R., (2018) A simple and inexpensive method for sharpening permanent steel knives with sandpaper. IAWA Journal, 39(4), pp. 497-503.

[28] Panepinto, D., Zanetti, M.C., Gitelman, L., Kozhevnikov, M., Magaril, E., Magaril, R., (2017) Energy from biomass for sustainable cities. Earth and Environmental Science, 72.

[29] Momodu, D.,Madito, M., Barzegar, F., Bello, A., Khaleed, A., Olaniyan, O., Dangbegnon, J., Manyala, N., (2016) Activated carbon derived from tree bark biomass with promising material properties for supercapacitors. Journal of Solid State Electrochemistry, 21, pp. 859-872.

[30] Rosillo-Calle, F., De Groote, P., Hemstock, S.L., Woods, J., (2006) The Biomass Assessment Handbook, Energy for a Sustainable Environment. Roytledge Taylor and Francis Group, London, U.K. and New York, U.S.A.

[31] Φιλίππου, Ι., (2014) Χημική τεχνολογία ξύλου, Θεσσαλονίκη.

[32] Nosek, R., Holubcik, M., Jandacka, J., (2016) The impact of bark content of wood biomass on biofuel properties. BioResources, 11(1).

[33] Yang, S., Yang, Y., Kankala, R.K., Li, B., (2018) Sustainability assessment of synfuels from biomass or coal: An insight on the economic and ecological burdens. Renewable Energy, 118, pp. 870-878.

[34] Kamperidou, V., Lykidis, C. and Barmpoutis, P., (2016) Thermal characteristics of wood of some common native species. 27thInternational Conference on Wood Modification and Tehnology 2016, Implementation of Wood Science in Woodworking Sector.

[35] Kamperidou, V. and Barboutis I., (2017) Utilization perspectives of wood and bark of the invasive species of Ailanthus and Acacia in the production of pellets. International Forestry and Environment Symposium, Trabzon, Turkey.

[36] Barmpoutis, P., Lykidis, C. and Barboutis, I., (2015) Influence of stem diameter and bark ratio of evergreen hardwoods on the fuel characteristics of the produced pellet. Pro Ligno, 11(4), pp. 673-679. ISSN 2069-7430.

[37] Filbakk, T., Jirjis, R., Nurmi, J., and Høibø, O. (2011). "The effect of bark content on quality parameters of Scots pine (Pinus sylvestris L.) pellets," Biomass and Bioenergy 35(8), pp. 3342-3349. DOI: 10.1016/j.biombioe.2010.09.011

[38] Li, Q., JunJin, YL., Li, G., Li, P., He, C., Wang., Y., (2016) Comparison of using polyurethane foam passive samplers and tree bark samples from Western China to determine atmospheric organochlorine pesticide. Journal of Environmental Sciences, 41, pp. 90-98.

[39] Toklu, E., (2017) Biomass energy potential and utilization in Turkey. Renewable energy, 107, pp. 235-244.

[40] Németh, K., and Molnár, S. (1983). "Az akácfa égésmelegének és fűtőértékének vizsgálata" ("Investigation of fuel value of black locust"), Faipar 3.

[41] Zheng, Y., Zhao, J., Xu, F., Li, Y., (2014) Pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biogas production. Progress in Energy and Combustion Science, 42, pp. 35-53.

[42] Taherzadeh, M.J. and Karimi, K., (2008) Pretreatment of lignocellulosic wastes to improve ethanol and biogas production: A review. International Journal of Molecular Sciences, 9(9), pp. 1621-1651.

[43] Mourant, D., Lievens, C., Gunawan, R., Wang, Y., Hu, X., Wu, L., Syed-Hassan, S.S.A., Li, C.Z., (2013) Effects of the temperature on the yields and properties of bio-oil from the fast pyrolysis of mallee bark. Fuel, 108, pp. 400-408.

ΑΕΙΦΟΡΙΚΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΣΕ ΑΓΡΟΤΙΚΕΣ ΚΟΙΝΟΤΗΤΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΒΙΟΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΕΔΑΦΟΒΕΛΤΙΩΤΙΚΟΥ

Χρ. Βλαχοκώστας*[1], Χ. Αχίλλας[2], Α.Β. Μιχαηλίδου[1,2], Ε. Φελέκη[1], Ν. Μουσιόπουλος[1]

[1]* Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 54124 Θεσσαλονίκη,
[2] Τμήμα Διοίκησης Εφοδιαστικής Αλυσίδας, Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος, 60110, Κατερίνη
e-mail: vlahoco@auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το μοντέλο της κυκλικής οικονομίας έχει αποκτήσει τεράστιο παγκόσμιο ενδιαφέρον. Τα απόβλητα θεωρούνται ωφέλιμος πόρος που είναι αναγκαίο να εισαχθεί εκ νέου στις εφοδιαστικές αλυσίδες. Αναμφισβήτητα, υπάρχει μια ισχυρή σύνδεση μεταξύ της βιοοικονομίας, της κυκλικής οικονομίας και της βιοενέργειας. Στην εργασία, προτείνεται ένα γενικό μεθοδολογικό σχήμα για το σχεδιασμό μονάδων εναλλακτικής επεξεργασίας βιοαποβλήτων, με έμφαση στην παραγωγή βιοενέργειας και άλλων βιοπροϊόντων. Με τη χρήση της πολυκριτηριακής ανάλυσης το μεθοδολογικό σχήμα συμπεριλαμβάνει ταυτόχρονα περιβαλλοντικά, οικονομικά και κοινωνικά κριτήρια για την υποστήριξη της λήψης απόφασης αειφορικής διαχείρισης. Η μεθοδολογία εφαρμόζεται σε μια πραγματική μελέτη περίπτωσης σχεδιασμού μιας πιλοτικής μονάδας παραγωγής βιοαερίου και εδαφοβελτιωτικού από γεωργικά, κτηνοτροφικά απόβλητα και ζωικά υποπροϊόντα. Η μονάδα προβλέπεται να κατασκευαστεί στην περιοχή των Σερρών στο πλαίσιο του έργου ZEFFIROS. Το έργο συμβάλλει στην προώθηση ενός μοντέλου αειφορικής διαχείρισης που θα εφαρμοστεί από δημοτικές αρχές στη διασυνοριακή περιοχή Ελλάδας και Δημοκρατίας της Βόρειας Μακεδονίας και πιο συγκεκριμένα από τους Δήμους Σερρών, Εμμανουήλ Παππά και Dojran. Στη μελέτη περίπτωσης επιλέγεται η βέλτιστη τοποθεσία της εγκατάστασης στη βάση και της αξιολόγησης πολλαπλών κριτηρίων οικονομικής και περιβαλλοντικής απόδοσης, αλλά και κοινωνικής αποδοχής. Επιπρόσθετα, προτείνονται αποτελεσματικές και βιώσιμες λύσεις διαχείρισης των βιοαποβλήτων της περιοχής με στόχο την μέγιστη αξιοποίηση των γεωργοκτηνοτροφικών αποβλήτων, την προαγωγή της τοπικής βιοοικονομίας και την προστασία του περιβάλλοντος.

Λέξεις Κλειδιά: *Αειφορική διαχείριση, Βιοενέργεια, Λήψη απόφασης, Πολυκριτηριακή ανάλυση, Κυκλική οικονομία.*

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η κυκλική οικονομία και η αποτελεσματικότητα στη διαχείριση των πόρων αποτελούν το κέντρο βάρους της ατζέντας της περιβαλλοντικής πολιτικής τα τελευταία χρόνια. Η «κυκλικότητα» μπορεί να αποτελέσει καταλύτη για παραγωγική ανοικοδόμηση και έχει μια σαφή περιφερειακή διάσταση. Βασικό στοιχείο αποτελεί η αξία του αποβλήτου. Εντός του πλαισίου της κυκλικής οικονομίας, τα απόβλητα, η ενέργεια και η κατανάλωση νερού πρέπει να ελαχιστοποιηθούν [1-3] και, σε κάθε περίπτωση, τα αντίστοιχα περιβαλλοντικά πρότυπα πρέπει να επιβάλλονται και να τηρούνται. Η βιοοικονομία επικεντρώνεται στη αξιοποίηση της βιομάζας/βιολογικών αποβλήτων από διαδικασίες πρωτογενούς παραγωγής (π.χ. γεωργία, κτηνοτροφία, δασοκομία, κ.λπ.) και στην προώθηση σχετικών επιχειρηματικών μοντέλων. Τα βιοαπόβλητα αναμένεται να υποστηρίξουν ουσιαστικά την επίτευξη των στόχων της ΕΕ για τις ήπιες και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας [4]. Στο πλαίσιο της εργασίας παρουσιάζεται και εφαρμόζεται ένα μεθοδολογικό πλαίσιο υποστήριξης απόφασης για την εφαρμογή μιας μονάδας εναλλακτικής επεξεργασίας βιοαποβλήτων. Στόχος του επιχειρηματικού μοντέλου η παραγωγή βιοενέργειας (ΣΗΘ) και βιοπροϊόντων (υγρό κλάσμα χωνεμένου υπολείμματος και κομπόστ).

2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η μεθοδολογία που ακολουθείται για τον σχεδιασμό μονάδων εναλλακτικής επεξεργασίας βιοαποβλήτων, με έμφαση στην παραγωγή βιοενέργειας και άλλων βιοπροϊόντων, ακολουθεί τα βήματα, όπως αυτά περιγράφονται στις επόμενες παραγράφους.

2.1 Προσδιορισμός ευρύτερης περιοχής για την ανάπτυξη μονάδων εναλλακτικής επεξεργασίας βιοαποβλήτων

Το πρώτο βήμα της μεθοδολογικής προσέγγισης αφορά στον προσδιορισμό της ευρύτερης περιοχής για την ανάπτυξη μονάδων εναλλακτικής επεξεργασίας βιοαποβλήτων. Βασικές πτυχές αυτής της απόφασης είναι η διαθεσιμότητα, η ποσότητα και η ποιότητα των βιολογικών αποβλήτων σε περιφερειακό επίπεδο. Οι χαρακτηριστικές τυπολογίες περιγράφονται στην Κοινοτική Οδηγία Πλαίσιο για τα απόβλητα [5] και σχετικούς κανονισμούς. Για να διασφαλιστεί η ομαλή τροφοδότηση και μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα μιας τέτοιας μονάδας είναι κρίσιμη η προ-εκτίμηση της διαρκούς διαθεσιμότητας και εποχικότητας των βιολογικών αποβλήτων σε τοπικό επίπεδο. Λόγω της κρίσιμης σημασίας τους στη βιωσιμότητα μιας τέτοιας μονάδας, είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη οι περιφερειακές υποδομές εφοδιαστικής αλυσίδας και κυρίως οι εγκαταστάσεις μεταφοράς και αποθήκευσης για τη διαθέσιμη πρώτη ύλη. Επίσης, κρίσιμη παράμετρος για τη βιωσιμότητα του δικτύου αλυσίδας αξίας αποτελεί το κόστος μεταφοράς [6]. Όλα τα παραπάνω μπορούν να αποτελέσουν τα δεδομένα μιας SWOT ανάλυσης (δυνατοτήτων, αδυναμιών, ευκαιριών και απειλών) για την υπό εξέταση περιοχή.

2.2 Ανάλυση αποθέματος βιοαποβλήτων

Σε περίπτωση που μια περιοχή θεωρείται «επιλέξιμη» για την ανάπτυξη μονάδων εναλλακτικής επεξεργασίας βιοαποβλήτων, το δεύτερο βήμα αφορά στην προετοιμασία μιας λεπτομερούς ανάλυσης του διαθέσιμου αποθέματος βιολογικών αποβλήτων. Η εν λόγω ανάλυση σχετίζεται (α) με τον σχολαστικό προσδιορισμό των βιολογικών αποβλήτων και των διαθέσιμων πηγών, (β) τον υπολογισμό των διαθέσιμων ποσοτήτων βιολογικών αποβλήτων και (γ) την περιγραφή των χαρακτηριστικών του διαθέσιμου βιολογικού αποβλήτου.

2.3 Βέλτιστη χωροθέτηση μονάδας εναλλακτικής επεξεργασίας βιοαποβλήτων

Το τρίτο βήμα της διαδικασίας αφορά στον προσδιορισμό της βέλτιστης χωροθέτησης μιας τέτοιας μονάδας εναλλακτικής επεξεργασίας βιοαποβλήτων με τη χρήση πολυκριτηριακής ανάλυσης. Αυτή η διαδικασία συνδέεται έντονα και συνήθως πραγματοποιείται παράλληλα με την επιλογή της καταλληλότερης τεχνολογίας. Επίσης σημαντικός παράγοντας προς μια αποτελεσματική χωροθέτησης είναι και η κοινωνική συναίνεση. Η πολυκριτηριακή ανάλυση αποτελεί μια εύχρηστη μεθοδολογία, η οποία βασίζεται στη συνεξέταση (πολλές φορές αλληλοσυγκρουόμενων) παραγόντων που επηρεάζουν τη διαδικασία λήψης αποφάσεων [7–12]. Σε αυτή τη βάση, και μετά τον έλεγχο όλων των νομοθετικών περιορισμών καθορίζεται η κατάλληλη μεθοδολογία πολυκριτηριακής ανάλυσης. Στη

βιβλιογραφία αναφέρεται σημαντικός αριθμός διαθέσιμων τεχνικών με διαφορετικά χαρακτηριστικά και χρήσεις [13-14]. Στις περισσότερες των περιπτώσεων, η μοντελοποίηση λαμβάνει κυρίως υπόψη την οικονομική και περιβαλλοντική διάσταση του προβλήματος, ενώ η κοινωνική διάσταση συνήθως παραμελείται. Οι Morrissey και Browne [15] αναφέρονται με λεπτομέρεια σε σχετικές εφαρμογές πολυκριτηριακής ανάλυσης σε προβλήματα βιώσιμης διαχείρισης αποβλήτων. Αξίζει να τονιστεί ότι ο κοινωνικός πυλώνας αποτελεί κρίσιμο ζήτημα για τη μελλοντική βιωσιμότητα της επένδυσης σε περιπτώσεις όπως αυτή που εξετάζεται στο πρόβλημα χωροθέτησης μιας μονάδας εναλλακτικής επεξεργασίας βιοαποβλήτων και πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τη διαδικασία λήψης σχετικής απόφασης.

Η τεχνική που υιοθετείται στην παρούσα εργασία είναι η ELECTRE III [16]. Η συγκεκριμένη τεχνική είναι μία ευρέως γνωστή μέθοδο πολυκριτηριακής ανάλυσης, με μακροχρόνιο ιστορικό επιτυχημένων πρακτικών εφαρμογών [17], ειδικά σε προβλήματα περιβαλλοντικών υποδομών. Το πρότυπο της συγκεκριμένης μεθόδου απαιτεί τον καθορισμό των τιμών τριών κατώτατων ορίων των κριτηρίων που χρησιμοποιούνται, όπως είναι το κατώτατο όριο αδιαφορίας, το όριο προτίμησης και το όριο άρνησης [18]. Αυτά επιτρέπουν στις αβεβαιότητες των κριτηρίων αξιολόγησης να ενσωματωθούν στη διαδικασία λήψης μιας απόφασης. Η συγκεκριμένη μέθοδος αποτελεί πρότυπο το οποίο μπορεί να προσαρμοστεί για την περιβαλλοντική αξιολόγηση σύνθετων προγραμμάτων εφαρμοσμένης μηχανικής, όπου απαιτούνται πληροφορίες για τη σημασία των κριτηρίων που χρησιμοποιούνται.

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο καθορισμός των δεδομένων προτίμησης του λήπτη μιας απόφασης που εκφράζεται ως βαρύτητα των κριτηρίων, αποτελεί μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους της ELECTRE III. Κατ' επέκταση είναι λογικό να υπάρχει ένας βαθμός υποκειμενικότητας, ο οποίος αφορά στα επίπεδα προτίμησης, αλλά και τα προαναφερθέντα κατώτατα όρια. Οι στόχοι και η προσωπική κρίση του λήπτη απόφασης επηρεάζουν συνήθως τον υποκειμενικό χαρακτήρα της μεθόδου.

Για την αποτύπωση του μαθηματικού υποβάθρου της ELECTRE III θεωρείται ένας πεπερασμένος αριθμός κριτηρίων g_j, όπου j=1,2,…,r και μια ομάδα εναλλακτικών σεναρίων A. Μεταξύ δύο σεναρίων a και b είναι δυνατόν να ισχύει:

- aPb: Το a είναι ισχυρά προτιμητέο του b, όταν $g(a) - g(b) > p$,
- aQb: Το a είναι ισχνά προτιμητέο του b, όταν $q < g(a) - g(b) \leq p$,
- aIb: Αδιαφορία μεταξύ των a και b, όταν $|g(a) - g(b)| \leq q$,

όπου «p» είναι το όριο προτίμησης και «q» το όριο αδιαφορίας.

Για την εφαρμογή της μεθόδου ELECTRE III εισάγεται επιπλέον η σχέση aSb, η οποία δηλώνει ότι το σενάριο a είναι τουλάχιστον τόσο καλό όσο το b. Το σύμβολο aS_jb δηλώνει ότι το σενάριο a είναι τουλάχιστον τόσο καλό όσο το σενάριο b, σε σχέση με το κριτήριο j. Για να θεωρηθεί το κριτήριο j σε συμφωνία με τη δήλωση aSb, πρέπει να ισχύει aS_jb, δηλαδή $g_j(a) \geq g_j(b) - q_j$. Αντίστοιχα το κριτήριο j βρίσκεται σε ασυμφωνία με τη δήλωση aSb, όταν ισχύει bP_ja, δηλαδή όταν $g_j(b) \geq g_j(a) - p_j$. Με τη χρήση της μεθόδου ELECTRE III είναι εφικτή η κατάταξη των εναλλακτικών σεναρίων λαμβάνοντας υπόψη τους συντελεστές βαρύτητας των κριτηρίων, καθώς επίσης και τα όρια αδιαφορίας και προτίμησης για κάθε κριτήριο.

Η απόφαση για τη βέλτιστη χωροθέτηση στην ευρύτερη περιοχή παρουσιάζει μια ισχυρή αλληλεπίδραση με τον προσδιορισμό της τεχνολογίας που πρόκειται να υιοθετηθεί. Όσον αφορά στις τεχνολογίες, στη διάθεση του λήπτη απόφασης διατίθεται μια σειρά διαθέσιμων τεχνολογιών, όπως αναερόβια χώνευση, αερόβια χώνευση, αεριοποίηση, πυρόλυση κλπ., καθώς επίσης και συνδυασμός αυτών. Οι βασικοί παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη για την επιλογή της βέλτιστης τεχνολογίας αφορούν στις δυνατότητες για παραγωγή βιοενέργειας (ηλεκτρισμός, θερμότητα ή βιοαέριο), στην πιθανή αξιοποίηση των καταλοίπων κάθε τεχνολογικής λύσης (π.χ. βιολογικό λίπασμα), στην καταλληλότητα των διαθέσιμων βιολογικών πόρων ή/και στις απαιτήσεις προ-επεξεργασίας. Όλες οι παραπάνω πληροφορίες αξιοποιούνται για τη βέλτιστη απόφαση σχετικά με την τεχνολογία που θα προτιμηθεί για την ανάπτυξη μονάδας εναλλακτικής επεξεργασίας βιοαποβλήτων, στη βάση των υφιστάμενων κατά περίπτωση περιορισμών, οι οποίοι σχετίζονται αφενός με τον τύπο των βιολογικών αποβλήτων, αφετέρου με τις απαιτήσεις των επιμέρους τεχνολογικών λύσεων.

2.4 Διαστασιολόγηση μονάδας εναλλακτικής επεξεργασίας βιοαποβλήτων

Ως επόμενο βήμα, πραγματοποιείται η αξιολόγηση του μεγέθους και της χωρητικότητας μιας μονάδας εναλλακτικής επεξεργασίας βιοαποβλήτων. Το συγκεκριμένο βήμα βασίζεται σε ανάλυση κόστους –

οφέλους (Cost – Benefit Analysis) και στον προσδιορισμό του κατάλληλου μείγματος βιολογικών υλικών για τη μονάδα. Η οικονομική διάσταση είναι κρίσιμη και αποτελεί το υπόβαθρο που υποστηρίζει τη βέλτιστη διαστασιολόγηση και τον λεπτομερή σχεδιασμό των τεχνικών προδιαγραφών της μονάδας.

2.5 Ανάλυση κινδύνου

Το τελευταίο βήμα της μεθοδολογικής προσέγγισης αφορά στον προσδιορισμό και την ενδελεχή ανάλυση των στρατηγικών κινδύνων. Στο στάδιο αυτό, πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας όλων των παραμέτρων (τεχνολογικών και μη) που λήφθηκαν υπόψη κατά τη διαδικασία λήψης απόφασης ώστε να εκτιμηθεί ο τρόπος που αυτές επηρεάζουν τη βέλτιστη λύση. Παράλληλα, στο πέμπτο αυτό βήμα της μεθοδολογίας, εντοπίζονται πιθανοί κίνδυνοι που σχετίζονται με την επένδυση, αξιολογείται η επίπτωση που οι εν λόγω κίνδυνοι επιφέρουν στη βιωσιμότητα της επένδυσης, καθώς επίσης και η πιθανότητα εμφάνισής τους, ενώ καταστρώνονται και οι στρατηγικές για τη μείωση της πιθανότητας να συμβούν ή την ελαχιστοποίηση του αντίκτυπού τους.

Το ως άνω μεθοδολογικό πλαίσιο αναμένεται να υποστηρίξει τους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής για να διευκολύνει την εννοιολογική φάση προς την ανάπτυξη μιας μονάδας εναλλακτικής επεξεργασίας βιοαποβλήτων, πριν τη φάση του αναλυτικού σχεδιασμού όπου απαιτούνται περισσότεροι πόροι. Υπό αυτό το πρίσμα, οι υπεύθυνοι λήψης αποφάσεων μπορούν να εξετάσουν τις διαθέσιμες επιλογές και να εγκρίνουν μια περισσότερο λεπτομερή ανάλυση και σχεδιασμό, μόνο για τις περιπτώσεις όπου η επένδυση αποδεικνύεται βιώσιμη.

3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ

3.1 Περιοχή εφαρμογής

Η εφαρμοσιμότητα του μεθοδολογικού πλαισίου επικυρώθηκε σε μια πραγματική μελέτη περίπτωσης στην περιοχή των Σερρών. Η περιοχή των Σερρών επιλέχθηκε στη βάση της σημαντικής γεωργικής δραστηριότητας και της διαθεσιμότητας σε βιολογικά υλικά. Ο πληθυσμός της ευρύτερης περιοχής των Σερρών είναι περίπου 200.000, εκ των οποίων το 25% χαρακτηρίζεται αστικός πληθυσμός, το 20% ήμι-αστικός και το 55% αγροτικός. Η οικονομική δραστηριότητα της περιοχής σχετίζεται με τον πρωτογενή τομέα και κυρίως με τη γεωργία (περίπου 60%). Στην περιοχή, υπάρχουν 162.800 εκτάρια καλλιεργήσιμης γης και 113.300 εκτάρια βοσκοτόπων. Περισσότερο από το 90% της καλλιεργούμενης γης είναι ιδιωτική. Η αναπτυγμένη γεωργική παραγωγή της περιοχής συμβάλλει στο 3,4% του συνολικού εθνικού γεωργικού προϊόντος. Τη μερίδα του λέοντος κατέχουν η παραγωγή γαλακτοκομικών προϊόντων και η παραγωγή κρέατος. Εκτός από τους αγρότες, σε απόσταση 20 km. από τον δήμο Σερρών, υπάρχουν αρκετοί παραγωγοί τροφίμων. Πιο συγκεκριμένα, στην περιοχή υπάρχουν 2 κορυφαίες βιομηχανίες γαλακτοκομικών προϊόντων, 6 μονάδες παραγωγής τυριών / γιαουρτιού, 2 ελαιοτριβεία, 1 μονάδα επεξεργασίας και συσκευασίας πατάτας, 4 κτηνοτροφικές μονάδες, περισσότερες από 30 μονάδες εκτροφής βοοειδών και χοίρων για την παραγωγή γαλακτοκομικών προϊόντων και την παραγωγή κρέατος, και 1 σφαγείο.

Οι ως άνω παραγωγικές μονάδες παράγουν επαρκείς ποσότητες βιοαποβλήτων για τη δημιουργία ενός μείγματος που διασφαλίζει τη συνεχή λειτουργία μίας μονάδας εναλλακτικής επεξεργασίας βιοαποβλήτων. Λαμβάνοντας υπόψη τα διαθέσιμα δεδομένα και δεδομένου του μεγέθους του πληθυσμού και των βασικών χαρακτηριστικών της οικονομικής δραστηριότητας της περιοχής μελέτης, δράσεις σχετικές με το ενεργειακό περιεχόμενο των βιοαποβλήτων είναι δυνατό να υποστηριχθούν από το πρόσφατο νομοθετικό πλαίσιο της χώρας σχετικά με τις ενεργειακές κοινότητες. Η νομοθεσία ορίζει τους κανόνες δημιουργίας των ενεργειακών κοινοτήτων, οι οποίοι είναι αστικοί συνεταιρισμοί ιδιωτών με δυνατότητα συμμετοχής των δήμων ως μετόχων, καθώς επίσης και οικονομικά κίνητρα για τη λειτουργία μονάδων παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Τέτοια στρατηγικά σχέδια είναι δυνατό να επωφεληθούν από εταιρικά σχήματα δημόσιου και ιδιωτικού τομέα.

Η υπό μελέτη περιοχή προσφέρεται για την εφαρμογή ενός παραγωγικού μοντέλου μίας μονάδας εναλλακτικής επεξεργασίας βιοαποβλήτων για πολλούς λόγους, όπως: (i) διαθεσιμότητα πόρων και βιοαποβλήτων, (ii) επιστημονικό δυναμικό και τεχνογνωσία, και (iii) ύπαρξη ενός πρωτογενούς τομέα με αναπτυξιακό δυναμικό και ανάγκες για εκσυγχρονισμό και μείωση του κόστους παραγωγής. Επιπρόσθετα, οι αγρότες της περιοχής δείχνουν έντονο ενδιαφέρον για την προσαρμογή της παραδοσιακής δραστηριότητάς τους στο μοντέλο της κυκλικής οικονομίας. Σημαντικό ρόλο σε αυτό διαδραμάτισαν οι δραστηριότητες / εκστρατείες ευαισθητοποίησης (π.χ. ενημερωτικά φυλλάδια, δημόσιες παρουσιάσεις, επισκέψεις σε έργα επίδειξης, κ.ά.) καθώς και οι έρευνες κοινής γνώμης, που

είχαν ως αποτέλεσμα την ακριβή χαρτογράφηση προσδοκιών όλων των εμπλεκόμενων τοπικών ενδιαφερομένων [19].

3.2 Εναλλακτικά σημεία και πολυκριτηριακή ανάλυση

Σύμφωνα με το μεθοδολογικό πλαίσιο που αναλύθηκε στη δεύτερη ενότητα, προκρίθηκαν διαφορετικές τοποθεσίες στην υπό μελέτη περιοχή για την ανάπτυξη μίας μονάδας εναλλακτικής επεξεργασίας βιοαποβλήτων. Μετά από λεπτομερή έρευνα σχετικά με τη διαθεσιμότητα γης, επιλέχθηκαν τέσσερα εναλλακτικά σημεία εγκατάστασης της μονάδας (Πίνακας 1).

Πίνακας 1: Εναλλακτικά σημεία κατασκευής της μονάδας εναλλακτικής επεξεργασίας βιοαποβλήτων στην υπό μελέτη περιοχή.

	Σημείο 1	Βρίσκεται σε δημόσιο χώρο στο Κτηνοτροφικό Πάρκο στον Ελαιώνα. Η πρόσβαση γίνεται μέσω του δασικού οδικού δικτύου με μεγάλη δυσκολία. Απαιτούνται οδικά έργα υποδομής και έργα υδροδότησης. Η απόσταση από την πόλη των Σερρών είναι περίπου 10 km και 23 km από το σφαγείο.
	Σημείο 2	Βρίσκεται σε δημόσιο χώρο στο Αγρόκτημα Σερρών, 2 km από την πόλη των Σερρών και 7 km από το σφαγείο. Η πρόσβαση είναι εύκολη μέσω της επαρχιακής οδού Σερρών-Νέου Σκοπού. Σε κοντινή απόσταση υπάρχει ένα δημοτικός λαχανόκηπος και ένα θερμοκήπιο.
	Σημείο 3	Βρίσκεται σε δημόσιο χώρο στο Αγρόκτημα Σερρών, 0,5 km από το χωριό Κρίνος και 8 km από το σφαγείο (μέσω χωματόδρομου ή 12 km μέσω δημοτικών οδών)
	Σημείο 4	Βρίσκεται σε δημόσιο χώρο στο Αγρόκτημα Σερρών, πλησίον του Αθλητικού Πάρκου Ομόνοιας. Η τοποθεσία απέχει 13,5 km από το σφαγείο μέσω δημοτικών οδών και 0,5 km από την πόλη των Σερρών

Στη συνέχεια, καθορίστηκαν τα κριτήρια για την προσέγγιση της πολυκριτηριακής ανάλυσης. Σκοπός αποτελεί η σύνθεση της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας, της περιβαλλοντικής απόδοσης και της αποδοχής από την τοπική κοινότητα, λαμβάνοντας επιπλέον υπόψη όλους τους νομοθετικούς

περιορισμούς. Προσκλήθηκαν τοπικοί εμπειρογνώμονες, με γνώση των τοπικών ειδικών χαρακτηριστικών. Συνολικά, 13 εμπειρογνώμονες, που εκπροσωπούν τις τοπικές και περιφερειακές αρχές και τον επιχειρηματικό τομέα στην περιοχή μελέτης, συμμετείχαν σε συνεντεύξεις για τον καθορισμό των κριτηρίων που θα εφαρμοστούν στη μελέτη περίπτωσης. Επιλέχθηκαν τα ακόλουθα κριτήρια: (Cr1) Απόσταση από το σημείο παραγωγής των βιοαποβλήτων, (Cr2) Προσβασιμότητα του σημείου εγκατάστασης σε υφιστάμενες υποδομές, (Cr3) Απόσταση από μονάδες κατανάλωσης παραγόμενης ενέργειας (ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας), (Cr4) Απόσταση από αγρούς για χρήση λιπάσματος, (Cr5) Αξία γης, (Cr6) Επιπτώσεις στον τοπικό πληθυσμό (π.χ. ατμοσφαιρική ρύπανση, οσμές, ηχορύπανση), (Cr7) Επιπτώσεις στα τοπικά οικοσυστήματα, (Cr8) Αισθητική υποβάθμιση, (Cr9) Αύξηση της οδικής κυκλοφορίας εξαιτίας της λειτουργίας της μονάδας και (Cr10) Κοινωνική αποδοχή.

Τα τέσσερα εναλλακτικά σημεία εγκατάστασης της μονάδας αξιολογήθηκαν για την απόδοσή τους στη βάση των 10 κριτηρίων (Πίνακας 2). Τα κριτήρια Cr2, Cr6, Cr7, Cr8, Cr9 και Cr10 αξιολογήθηκαν ποιοτικά από τους εμπειρογνώμονες που συμμετείχαν στην έρευνα. Τα κριτήρια που σχετίζονται με τις αποστάσεις (Cr1, Cr3, Cr4) αξιολογήθηκαν με τη χρήση των χαρτών της Google και πάντα λαμβάνοντας υπόψη τη θέση των διαθέσιμων σημείων παραγωγής βιολογικών υλικών για το μείγμα που θα οδηγείται στη μονάδα. Το κριτήριο Cr5, που σχετίζεται με την αξία της γης, αξιολογήθηκε στη βάση των αντικειμενικών αξιών γης της Ελληνικής Στατιστικής Αρχής. Για όλα τα κριτήρια ισχύει ότι όσο υψηλότερη είναι η απόδοση τους τόσο προτιμότερη η εναλλακτική.

Πίνακας 2: Αξιολόγηση εναλλακτικών σημείων τοποθέτησης της μονάδας (κλίμακα 1-10, με 10 το προτιμότερο).

Κριτήρια	**Σημείο 1** (1-10)	**Σημείο 2** (1-10)	**Σημείο 3** (1-10)	**Σημείο 4** (1-10)	**Συντελεστές βαρύτητας** (%)	p_i	q_i
Cr_1 - Απόσταση από το σημείο παραγωγής των βιοαποβλήτων	1,46	8,92	6,92	5,69	15	1,87	0,56
Cr_2 - Προσβασιμότητα του σημείο εγκατάστασης σε υφιστάμενες υποδομές	1,69	9,62	6,31	6,77	14	1,98	0,59
Cr_3 - Απόσταση από μονάδες κατανάλωσης παραγόμενης ενέργειας	2,00	9,46	7,54	7,15	12	1,87	0,56
Cr_4 - Απόσταση από αγρούς για χρήση λιπάσματος	3,85	9,23	8,31	7,69	8	1,35	0,40
Cr_5 - Αξία γης	2,85	9,15	7,62	7,23	12	1,58	0,47
Cr_6 - Επιπτώσεις στον τοπικό πληθυσμό	9,23	7,31	2,62	2,00	10	1,81	0,54
Cr_7 - Επιπτώσεις στα τοπικά οικοσυστήματα	3,85	8,00	5,92	5,77	10	1,04	0,31
Cr_8 - Αισθητική υποβάθμιση	4,85	8,46	4,69	3,23	6	1,31	0,39
Cr_9 - Αύξηση της οδικής κυκλοφορίας εξαιτίας της λειτουργίας της μονάδας	3,08	7,08	2,85	3,46	5	1,06	0,32
Cr_{10} - Κοινωνική αποδοχή	8,69	8,46	2,69	2,23	8	1,62	0,48

Βασικό παραγόμενο προϊόν των συνεντεύξεων με τους εμπειρογνώμονες αποτέλεσαν οι βαρύτητες των κριτηρίων που λαμβάνονται υπόψη στην ανάλυση. Οι συντελεστές βαρύτητας περιλαμβάνονται στον Πίνακα 2 και εκτιμήθηκαν ως ο μέσος όρος των συντελεστών βαρύτητας των 13 εμπειρογνωμόνων. Με τον τρόπο αυτό πραγματοποιείται σύνθεση όλων των απόψεων σε μια μέση γραμμή. Για να ξεπεραστούν θέματα υποκειμενικότητας, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας. Στην υπό μελέτη περίπτωση, απαιτείται χαμηλός υπολογιστικός χρόνος για τον εκ νέου υπολογισμό των βέλτιστων λύσεων με τις τροποποιημένες παραμέτρους. Για τον υπολογισμό του p_i για τα όλα κριτήρια χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση (1), ενώ για τον υπολογισμό του q_i χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση (2) (όπου «p» είναι το όριο προτίμησης και «q» το όριο αδιαφορίας). Σημειώνεται ότι στο πλαίσιο της ανάλυσης δεν χρησιμοποιήθηκε η λογική του βέτο, δυνατότητα που αποτελεί χαρακτηριστικό της ELECTRE-III.

$$p_i = \frac{1}{n}(V_i\ max - V_i\ min) \quad (1)$$

$$q_i = 0.3 \cdot p_i \quad (2)$$

3.3 Τεχνολογία, μέγεθος και δυναμικότητα μονάδας εναλλακτικής επεξεργασίας βιοαποβλήτων

Στη βάση της ως άνω ανάλυσης, ο συνδυασμός αναερόβιας και αερόβιας χώνευσης επιλέγεται ως η καταλληλότερη τεχνολογική λύση. Η αναερόβια χώνευση ταιριάζει καλά στην τοπική γεωργία και καλλιέργεια δεδομένου ότι η κοπριά, το τυρόγαλα, και τα υποπροϊόντα (δηλαδή, πολτός πατάτας, απόβλητα ελαιοτριβείων, κλπ.) και τα απόβλητα του σφαγείου μπορούν να αποτελέσουν κατάλληλες βιολογικές πηγές εισόδου στη μονάδα ως υποστρώματα. Όλοι αυτοί οι βιολογικοί πόροι είναι διαθέσιμοι στην περιοχή μελέτης. Η αναερόβια χώνευση θεωρείται αποτελεσματική για την παραγωγή βιοενέργειας (ΣΗΘ) και και βιοπροϊόντων (υγρό κλάσμα χωνεμένου υπολείμματος και κομπόστ). Η αναερόβια χώνευση είναι διεργασία ζύμωσης η οποία πραγματοποιείται σε χωνευτές σε συνθήκες απουσίας οξυγόνου.

Σημειώνεται ότι η πρώτη ύλη (υποστρώματα βιοαποβλήτων) μετατρέπεται σε καύσιμο αέριο και χωνεύεται (ως βιολογικό προϊόν). Το βιοαέριο που παράγεται αποτελείται κυρίως από CH_4 (50% - 70%) και CO_2 (30% -50%). Επιπλέον, σε μικρότερες ποσότητες, το βιοαέριο περιέχει ατμούς H_2O, H_2S και άλλα στοιχεία. Το προϊόν της χώνευσης (digestate) παράγεται από τη χώνευση των υποστρωμάτων μετά από την εξαγωγή του βιοαερίου. Το υγρό κλάσμα της χώνευσης περιλαμβάνει θρεπτικά συστατικά (π.χ. άζωτο, φώσφορο, κάλιο), καθώς και άλλα ανόργανα συστατικά. Ως εκ τούτου, είναι κατάλληλο για χρήση ως φυσικό λίπασμα. Στη βιβλιογραφία, υπάρχουν πολλές μελέτες που σχετίζονται με την αξιοποίηση της αναερόβιας χώνεψης για την παραγωγή βιοενέργειας π.χ. [20–23]. Σημαντικό χαρακτηριστικό αποτελεί η αποκεντρωμένη παραγωγή βιοενέργειας σε τοπικό ή/και περιφερειακό επίπεδο. Αντίστοιχες εφαρμογές της αναερόβιας χώνεψης περιγράφονται λεπτομερώς στο [24]. Τα υποστρώματα που χρησιμοποιούνται καθορίζουν την κατάλληλη τεχνική υποδομή που απαιτείται (π.χ. μέγεθος σωληνώσεων, προδιαγραφές αντλιών, απαιτήσεις αποθήκευσης αερίου, τεχνολογία επεξεργασίας αερίου και σχεδιασμός της μονάδας συμπαραγωγής θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας).

Η τεχνολογία αυτή δεν επιβαρύνει με επιπρόσθετες εκπομπές CO_2 την ατμόσφαιρα, καθώς το CO_2 που παράγεται αντισταθμίζεται από τις εκπομπές CH_4 που αποφεύγονται στην περίπτωση που τα βιοαπόβλητα εναποτίθενται σε ανοιχτούς χώρους. Υπό αυτό το πρίσμα, το βιοαέριο μπορεί να συμβάλει σημαντικά στην απεξάρτησης της οικονομίας από τον άνθρακα. Επιπλέον, η αποκεντρωμένη παραγωγή βιοενέργειας από βιοαπόβλητα σε μονάδα εναλλακτικής επεξεργασίας βιοαποβλήτων με μονάδες ΣΗΘ γίνεται πιο ελκυστική για τις περιπτώσεις όπου η παραγόμενη θερμότητα αξιοποιείται σε εγκαταστάσεις κοντά στη μονάδα εναλλακτικής επεξεργασίας βιοαποβλήτων. Επιπλέον, η χρήση των τελικών προϊόντων της μονάδας εναλλακτικής επεξεργασίας βιοαποβλήτων (ενέργεια και βιοπροϊόντα) πρέπει να εξεταστούν σχολαστικά κατά τη φάση σχεδιασμού της μονάδας. Σε αυτό το πλαίσιο, η χρήση του παραγόμενου βιολιπάσματος σε αγρούς κοντά στις μονάδες εναλλακτικής επεξεργασίας βιοαποβλήτων συμβάλλουν αποφασιστικά στην οικονομική απόδοση και την αποτελεσματικότητά τους. Η επάρκεια καλλιεργήσιμης γης για τη διάθεση του βιολογικού λιπάσματος και μια διαθέσιμη γειτονική αγορά θα πρέπει να διερευνηθούν. Επιπρόσθετα, τα θρεπτικά συστατικά των λιπασμάτων περιέχονται κυρίως σε μορφή ανόργανων στοιχείων, που επιτρέπει την ευκολία απορρόφησης από τα φυτά και την αυξημένη αποδοτικότητα πρόσληψης, σε σύγκριση με τα θρεπτικά συστατικά σε ακατέργαστη κοπριά ή σε πολτό [25].

Με βάση τα παραπάνω, αποδεικνύεται στην πράξη με τη λειτουργία τέτοιων πολυλειτουργικών εγκαταστάσεων ότι αυτή η τεχνολογία προσφέρει μειωμένο ενεργειακό κόστος, χαμηλό κόστος και περιβαλλοντικά ασφαλή ανακύκλωση κοπριάς και βιοαποβλήτων, φθηνό και αποτελεσματικό λίπασμα, και μείωση των οσμών που προέρχονται από την εντατική αγροτική δραστηριότητα. Επομένως, λαμβάνοντας υπόψη ότι σε πολλές περιοχές, οργανικά απόβλητα εξακολουθούν να διατίθενται σε χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων (συμβάλλοντας στις εκπομπές CH_4), η προτεινόμενη μονάδας εναλλακτικής επεξεργασίας βιοαποβλήτων συμβάλλει διπλά στο μετριασμό της κλιματικής αλλαγής μέσω (α) μειωμένων εκπομπών CH_4 από κτηνοτροφικές μονάδες (λόγω της διαχείρισης του υποστρώματος και της αποφυγής της ανοικτής αποθήκευσης πολτού), και (β) παραγωγής πράσινης βιοενέργειας. Εκτός από τα προαναφερόμενα, η βελτιωμένη διαχείριση του χωνεμένου υπολείμματος σε συνδυασμό με την εφαρμογή του ορθού κώδικα γεωργικής πρακτικής συμβάλλει στη μείωση των

εκπομπών NH_3 and NOx και του ευτροφισμού των επίγειων και υπόγειων υδάτων, δεδομένου ότι διαρροές είναι δυνατό να περιοριστούν ή να αποφευχθούν.

4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

4.1 Τροφοδοσία

Η μέγιστη δυνατή αποικοδόμηση του οργανικού κλάσματος προς βιοαέριο σε αναερόβιες συνθήκες είναι μια σύνθετη διεργασία που απαιτεί την αλληλεπίδραση διαφορετικών ομάδων μικροοργανισμών. Στην πράξη, η πρώτη ύλη για την αναερόβια χώνευση σπάνια αποτελείται από μόνο ένα είδος οργανικού βιοαποβλήτου (υπόστρωμα), αλλά συνηθέστερα από μίγμα υποστρωμάτων. Κάθε ένα από τα υποστρώματα συνεισφέρει τόσο στην αύξηση του εύρους των ειδών των μικροοργανισμών, όσο και στη βελτίωση ιδιοτήτων που μπορούν να επιφέρουν αύξηση του ποσοστού αποικοδόμησης του οργανικού κλάσματος. Χαρακτηριστικό παράδειγμα η ρευστότητα, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε επίτευξη υψηλού βαθμού ανάμειξης και σε υψηλότερο βαθμό ομοιομορφίας των διεργασιών που λαμβάνουν χώρα εντός των χωνευτήρων.

Στη βάση της μεθοδολογίας που περιγράφεται στη δεύτερη ενότητα η πιλοτική μονάδα θα υποδέχεται τους τύπους οργανικών βιοαποβλήτων που περιγράφονται ακολούθως στον Πίνακα 1. Στον ίδιο πίνακα περιγράφονται οι ετήσιες προμηθευόμενες ποσότητες από κάθε τύπο, οι ημέρες προμήθειάς τους κατ' έτος και η ποσότητα για κάθε τύπο ανά ημέρα προμήθειας. Επίσης, δίδεται σε αυτόν ο κωδικός του κάθε τύπου προμηθευόμενου βιοποβλήτου σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό Κατάλογο Αποβλήτων (ΕΚΑ).

Πίνακας 3: Σύνθεση μείγματος υποστρώματος, ετήσιο πρόγραμμα εφοδιασμού και ετήσιες ποσότητες εφοδιασμού

Πρώτη ύλη	t/ημέρα προμήθειας	ημέρες προμήθειας /έτος	t/έτος	ΚΩΔ. ΕΚΑ
Κοπριά αγελάδων γαλακτοπαραγωγής	6,27	200	1.254	**02 01 06**
Κοπριά μοσχίδων αντικατάστασης 18-27 μηνών	5,91	200	1.183	**02 01 06**
Κοπριά μοσχαριών 3-12 μηνών	0,51	200	102	**02 01 06**
Κοπριά αιγοπροβάτων	0,73	200	146	**02 01 06**
Κοπριά πουλερικών αυγοπαραγωγής & κρεατοπαραγωγής	0,32	104	33	**02 01 06**
Τυρόγαλο	1,78	156	278	**02 05 01**
Σάπιες πατάτες (μετά τεμαχισμού)	1,00	32	32	**02 01 03**
Ημι-στερεά απόβλητα ελαιοτριβείου	2,37	32	76	**02 03 01**
Περιεχόμενο πεπτικού συστήματος σφαγείων	1,44	104	150	**02 02 01**
Στομάχια και λίπος σφαγείων	0,24	52	13	**02 02 02**
Αίμα σφαγείων	0,35	52	18	**02 02 02**
Σύνολο			**3.285**	

Αξίζει να σημειωθεί ότι η κοπριά ως πρώτη ύλη σε ένα μίγμα προς αναερόβια χώνευση παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα λόγω του πλούσιου περιεχομένου της σε αναερόβια βακτήρια και την υψηλή περιεκτικότητά της σε νερό, η οποία οδηγεί σε μίγμα υψηλότερης ρευστότητας και δημιουργεί συνθήκες για καλύτερη ανάμιξη των συνιστωσών ενός μίγματος. Περαιτέρω σημαντικά πλεονεκτήματα της κοπριάς είναι το χαμηλό κόστος κτήσης της και η διαθεσιμότητά της, αφού η συλλογή της γίνεται καθημερινά. Επίσης μέρος των υγειονομικά ελεγμένων αποβλήτων σφαγείου χαρακτηρισμένων ως ζωικά υποπροϊόντα (ΖΥΠ) κατηγορίας 2 και κατηγορίας 3 (ΕΚ 1062/2009) επιλέγονται ως πρώτη ύλη σε μίγματα προς αναερόβια χώνευση λόγω κυρίως της υψηλής περιεκτικότητάς τους σε πτητικά στερεά και συνεισφέρουν στην αύξηση του παραγόμενου βιοαερίου. Το τυρόγαλο είναι βιοαπόβλητο που είναι διαθέσιμο σε σημαντική ποσότητα στην εγγύς περιοχή της μονάδας, χρήζει ορθολογιστικής διαχείρισης και συμβάλλει στην αραίωση υποστρωμάτων με υψηλή συγκέντρωση σε στερεή ύλη, λόγω της μεγάλης περιεκτικότητάς του σε νερό. Εν κατακλείδι, οι αδιάθετες (ή σάπιες) πατάτες, καθώς και τα ημι-στερεά απόβλητα ελαιοτριβείου (κατσίγαρος) είναι επίσης διαθέσιμα σε αρκετή ποσότητα στη περιοχή εγκατάστασης της μονάδας και χρήζουν επίσης ορθολογικής διαχείρισης. Η επιλογή τους

συμβάλλει στην επάρκεια περιεκτικότητας του μίγματος σε ολικά στερεά. Επιπλέον, η χρήση τους σαν υποστρώματα του μίγματος χρησιμεύει στην εκτροφή των μικροοργανισμών που περιέχονται στο μείγμα.

4.2 Βέλτιστη χωροθέτηση

Η χρήση της ELECTRE III στη παρούσα περίπτωση πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό που διαθέτει το Εργαστήριο Μετάδοσης Θερμότητας και Περιβαλλοντικής Μηχανικής. Προέκυψαν δύο κατανομές (αύξουσα και φθίνουσα) από την ανάλυση των διαφορετικών χωροθετήσεων. Τόσο η αύξουσα όσο και φθίνουσα κατανομή προκρίνουν τη Θέση 2 ως τη βέλτιστη εναλλακτική για την εγκατάσταση της μονάδας εναλλακτικής επεξεργασίας βιοαποβλήτων. Η Θέση 2 (βέλτιστη εγκατάσταση) είναι σχεδόν 1,5 km νότια-νοτιοδυτικά από τη πόλη των Σερρών, σε δημοτική έκταση σχεδόν 160 στρεμμάτων. Η Θέση 2 προκρίνεται και λόγω του γεγονότος ότι βρίσκεται εγγύτερα στους μεγαλύτερους παραγωγούς βιοαποβλήτων, καθώς και σε δυνητικούς τελικούς χρήστες της παραγόμενης ενέργειας. Δίπλα στην περιοχή υπάρχει θερμοκήπιο στο οποίο μπορεί να αξιοποιείται η παραγόμενη θερμική ενέργεια. Η Θέση 2 παρουσιάζει και πολύ καλή επίδοση σε σχέση με κοινωνικά κριτήρια (επίδραση στο τοπικό πληθυσμό και στο οικοσύστημα, αισθητικοί παράγοντες, οδικές μεταφορές, κοινωνική αποδοχή).

Ακολούθως, διενεργήθηκε ανάλυση ευαισθησίας. Τα κατώτατα όρια στη μαθηματική διατύπωση (προτίμηση/preference και αδιαφορία/indifference) διαφοροποιήθηκαν για τα διάφορα σενάρια, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 4. Πιο συγκεκριμένα, εξετάστηκαν έξι σενάρια. Η βέλτιστη χωροθέτηση για την εγκατάσταση της μονάδας εναλλακτικής επεξεργασίας βιοαποβλήτων στην ευρύτερη περιοχή των Σερρών είναι η Θέση 2, όπως προκύπτει μετά από εξέταση όλων των σεναρίων γεγονός που καταδεικνύει και τη στιβαρότητα της λύσης χωροθέτησης που επιλέχθηκε.

Πίνακας 4: Ανάλυση ευαισθησίας

Όρια	Σενάρια						
	Κατώτατο όριο	A	B	C	D	E	F
p_i	p_i	1,25 × p_i	1,50 × p_i	0,75 × p_i	0,50 × p_i	p_i	0,50 × p_i
q_i	0,3 × p_i	0,375 × p_i	0,45 × p_i	0,225 × p_i	0,15 × p_i	0	0,30 × p_i
Απόκλιση	-	+25%	+50%	-25%	-50%	$p_i = p_i \mid q_i = 0$	$p_i = 1/2\ p_i \mid q_i = 0$
Κατάταξη	$1^η$: Θέση 2 $2^η$: Θέση 3 $3^η$:Θέση 1,4	$1^η$: Θέση 2 $2^η$: Θέση 3,4 $3^η$: Θέση 1	$1^η$: Θέση 2 $2^η$: Θέση 3,4 $3^η$: Θέση 1	$1^η$: Θέση 2 $2^η$: Θέση 3 $3^η$: Θέση 1,4	$1^η$: Θέση 2 $2^η$: Θέση 3 $3^η$: Θέση 1,4	$1^η$: Θέση 2 $2^η$: Θέση 3 $3^η$: Θέση 1,4	$1^η$: Θέση 2 $2^η$: Θέση 3 $3^η$: Θέση 1,4

4.2 Τεχνικές προδιαγραφές

Τα βιοαπόβλητα συλλέγονται από τους τόπους παραγωγής και διάθεσης και μεταφέρονται στη μονάδα εναλλακτικής επεξεργασίας βιοαποβλήτων. Τα βιοαπόβλητα τροφοδοτούνται στις δεξαμενές υποδοχής και αναμειγνύονται με χρήση αναδευτήρων, ώστε να διαμορφωθεί τελικά ένα μείγμα υποστρωμάτων για αναερόβια χώνευση. Το μείγμα αντλείται και μεταφέρεται (μέσω των αντλιών μετατόπισης) στους χωνευτές.

Βάσει του σχεδιασμού που υλοποιήθηκε, η μονάδα εκτιμάται ότι θα επεξεργάζεται 3.285 τόνους βιοαποβλήτων ετησίως και πέραν της ΣΗΘ από την καύση του βιοερίου που παράγεται από την αναερόβια χώνευση σε σύστημα ΣΗΘ (ΜΕΚ+Γεννήτρια), θα οδηγεί στην παραγωγή 3.121 τόνων υδαρού χωνεμένου υπολείμματος (digestate/βιολογικού εδαφοβελτιωτικού πλούσιου σε θρεπτικά συστατικά) προς διάθεση σε παρακείμενες καλλιέργειες.

Από τη λειτουργία της μονάδας θα παράγονται περίπου 160.000 m^3 βιοαερίου κατ' έτος. Η εκτιμώμενη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας της μονάδας ανά έτος λειτουργίας ανέρχεται σε 311.996 kWh, συμπεριλαμβανομένων των αναγκών ιδιοκατανάλωσης και απωλειών δικτύου, ενώ η εκτιμώμενη

παραγωγή θερμικής ενέργειας (θερμότητας), ανέρχεται σε 356.216 kWh, συμπεριλαμβανομένων των θερμικών απωλειών και των αναγκών ιδιοκατανάλωσης. Η περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας θα διατίθεται στο δίκτυο χαμηλής τάσης της περιοχής και η αξία της θα συμψηφίζεται στο κόστος αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας του Δήμου Σερρών, ενώ από την περίσσεια θερμικής ενέργειας θα εξεταστεί το ενδεχόμενο μελλοντικά να εξυπηρετηθεί για τις ανάγκες θέρμανσής του θερμοκήπιο που ήδη λειτουργεί σε αγροτεμάχιο παρακείμενο στη θέση εγκατάστασης της μονάδας. Θερμική ενέργεια θα χρησιμοποιείται και για τη θέρμανση του μείγματος υποστρωμάτων στο εσωτερικό των βιο-χωνευτήρων, με χρήση εναλλάκτη θερμότητας. Η θερμότητα θα μεταφέρεται από τα καυσαέρια της ΜΕΚ στο κλειστό κύκλωμα ζεστού νερού, διερχόμενη από τους χωνευτήρες. Η προτεινόμενη μέθοδος αναερόβιας χώνευσης είναι θερμόφιλη. Το υπόστρωμα παραμένει στα χωνευτήρια για τουλάχιστον 20 ημέρες σε θερμοκρασία τουλάχιστον 52^{o}C. Το προϊόν της χώνευσης αντλείται με ελεγχόμενο τρόπο και μεταφέρεται σε διαχωριστή, όπου ανακτάται το στερεό κλάσμα του προς αποθήκευση, ενώ το υγρό κλάσμα οδηγείται σε δεξαμενή φύλαξης. Οι σάκοι στερεού κλάσματος παραλαμβάνονται με φορτηγά και το υγρό κλάσμα αντλείται και μεταφέρεται από βυτία. Τόσο οι σάκοι, όσο και το υγρό κλάσμα οδηγούνται σε παρακείμενες καλλιέργειες, προς χρήση τους ως εδαφοβελτιωτικά.

Το δυνατό σημείο της προτεινόμενης μεθοδολογίας έγκειται στην αποτελεσματικότητα της τεχνολογικής λύσης, από οποιαδήποτε σκοπιά κι αν το δει κανείς. Η βιωσιμότητα των μονάδων εναλλακτικής επεξεργασίας βιοαποβλήτων μπορεί να δικαιολογηθεί λαμβάνοντας υπόψιν σε (α) εκμετάλλευση του οργανικού αποβλήτου (β) αναβαθμισμένη διαχείριση κοπριάς, (γ) αυξημένη αποδοτικότητα πρόσληψης θρεπτικών ουσιών, (δ) μειωμένες οσμές, (ε) προστασία του περιβάλλοντος και μειωμένες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, (στ) απόδοση αξίας στο παραπροϊόν και (ζ) βιοενέργεια (με τη μορφή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας) και παραγωγή βιοκαυσίμου. Σε κάθε περίπτωση έχει αποδειχθεί στην πράξη ότι από τη λειτουργία τέτοιου είδους εγκαταστάσεων σε όλο τον κόσμο ότι η παραγωγή βιοαερίου αποτελεί αποτελεσματικό μέσο ανάκτησης ανεκμετάλλευτης διαθέσιμης στο περιβάλλον ενέργειας. Η υπό εξέταση μονάδα αποτελεί ολοκληρωμένο σύστημα ανακύκλωσης και ανάκτησης η οποία συμβάλλει στη:

- Μείωση του κόστους ενέργειας της τοπικής κοινωνίας.
- Φθηνή και περιβαλλοντικά ασφαλή ανακύκλωση των κοπριών και βιοαποβλήτων.
- Φθηνή και αποδοτική λίπανση.
- Μείωση των οσμών σε περιοχές έντονης αγροκτηνοτροφικής δραστηριότητας.

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στη παρούσα εργασία, προτάθηκε ένα μεθοδολογικό σχήμα, με σκοπό την υποστήριξη λήψης απόφασης για την ανάπτυξη μονάδας εναλλακτικής επεξεργασίας βιοαποβλήτων, βασισμένης σε συνεκτίμηση διάφορων κριτηρίων και παραγόντων. Η μεθοδολογία επικυρώθηκε με την υλοποίηση πραγματικής μελέτης περίπτωσης στην περιοχή των Σερρών. Στη προτεινόμενη προσέγγιση, η απόφαση για την βέλτιστη χωροθέτηση της μονάδας στην υπό εξέταση περιοχή βασίστηκε σε πολυκριτηριακή ανάλυση (με τη χρήση της ELECTRE III) λαμβάνοντας υπόψιν τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά κριτήρια. Στην υπό εξέταση περίπτωση, η απόφαση για τη βέλτιστη χωροθέτηση της μονάδας βασίστηκε στην προσεκτική αξιολόγηση των κριτηρίων, που αντικατοπτρίζουν όλους τους πυλώνες της βιώσιμης ανάπτυξης, δηλαδή την οικονομική βιωσιμότητα, την κοινωνική αποδοχή και την περιβαλλοντική προστασία.

Το προτεινόμενο μεθοδολογικό σχήμα παρέχει έναν ‘‘οδικό χάρτη’’ είτε για δημόσιους φορείς είτε για ιδιωτικές επιχειρήσεις, που στοχεύουν να επενδύσουν σε έργα πράσινης ενέργειας. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στη παρούσα εργασία είναι γενική και μπορεί να παραμετροποιηθεί και να εφαρμοστεί και για διαφοροποιημένες συνθήκες και παραμέτρους, για άλλες περιπτώσεις αντίστοιχων επενδύσεων. Εφόσον υπάρξει ανάγκη, η μεθοδολογία θα προσαρμοστεί ανάλογα με τα διαφορετικά κριτήρια ή τιμές σε κατώτατα αποδεκτά όρια και σε συντελεστές βαρύτητας, ανάλογα με τη περίπτωση. Το μεθοδολογικό πλαίσιο μπορεί, επίσης να χρησιμοποιηθεί, μετά από κατάλληλη προσαρμογή, σε ζητήματα λήψης αποφάσεων σχετικά με τη διαχείριση θεμάτων εφοδιαστικής αλυσίδας, για παράδειγμα για την βέλτιστη χωροθέτηση εγκαταστάσεων συλλογής, αποθήκευσης, κέντρων διαλογής κτλ.

Παρόλο που η παραγωγή βιοαερίου εφαρμόζεται ευρέως τις τελευταίες δεκαετίες, η υποκατάσταση ορυκτών καυσίμων σε μεγάλη κλίμακα εξακολουθεί ακόμη να θεωρείται σημαντική πρόκληση στον ενεργειακό τομέα. Τεχνολογίες ενέργειας που εκμεταλλεύονται τη βιομάζα για παραγωγή ενέργειας

εξακολουθούν να είναι μη-ανταγωνιστικές, τεχνολογικά αναποτελεσματικές και ανώριμες σε σχέση με τη συμβατική χρήση των μη ανανεώσιμων πηγών. Η μεθοδολογία που παρουσιάστηκε προσθέτει ένα μικρό λίθο προς την κατεύθυνση της υποστήριξης της βιοοικονομίας και ευρύτερα, της έννοιας της κυκλικής οικονομίας. Πρέπει να τονιστεί ότι αντίστοιχες τεχνολογικές λύσεις αναερόβιας χώνεψης έρχονται αντιμέτωπες με προκλήσεις, που περιορίζουν την ευρεία δυνατότητα εφαρμογής, δηλαδή, (i) την έλλειψη αγορών για το προϊόν της χώνευσης, λόγων της μειωμένης κοινωνικής αποδοχής της μεθόδου και του προϊόντος αυτής (ii) έλλειψη αναγνώρισης της αναερόβιας χώνευσης και της κομποστοποίησης, ιδίως όσον αφορά στην επαναχρησιμοποίηση των θρεπτικών συστατικών (iii) καθαρότητα του ρεύματος βιολογικών αποβλήτων και (iv) επενδυτικές απαιτήσεις.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς θα ήθελαν να ευχαριστήσουν ολόψυχα τους εμπειρογνώμονες που συμμετείχαν στην εφαρμογή της προσέγγισης πολυκριτηριακής ανάλυσης στην περιοχή μελέτης. Επίσης θερμές ευχαριστίες σε όλους τους εταίρους του έργου ZEFFIROS (INTERREG IPA CBC Program CCI 2014 TC 16 I5CB 009).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] European Investment Bank. Circular Economy Guide—Supporting the Circular Transition. January 2019. Available online: https://www.eib.org/en/publications/the-eib-in-the-circular-economy-guide (accessed on 10 March 2020).

[2] Sariatli, F. Linear economy versus circular economy: A Comparative and analyzer study for optimization of economy for sustainability. Visegr. J. Bioecon. Sustain. Dev. 2017, 1, 31–34. [CrossRef]

[3] Ellen MacArthur Foundation. Towards the Circular Economy: Economic Business Rationale for an Accelerated Transition; Ellen MacArthur Foundation: Cowes, UK, 2012.

[4] European Commission. Directive 2009/28/EC on the Promotion of the Use of Energy from Renewable Sources, Official Journal of the European Union: Strasbourg, France, 2009.

[5] European Commission. Directive 2008/98/EC on Waste (Waste Framework Directive); Official Journal of the European Union: Strasbourg, France, 2008..

[6] Achillas, C.; Vlachokostas, C.; Moussiopoulos, N.; Perkoulidis, G.; Banias, G.; Mastropavlos, M. Electronic waste management cost: A scenario-based analysis for Greece (2011). Waste Manag. Res. **2011**, 29, 963–972.

[7] Le Hesran, C.; Ladier, A.L.; Botta-Genoulaz, V.; Laforest, V. Operations scheduling for waste minimization: A review. J. Clean. Prod. 2019, 206, 211–226.

[8] Silva, S.; Alçada-Almeida, L.; Dias, L. Biogas plants site selection integrating Multicriteria Decision Aid methods and GIS techniques: A case study in a Portuguese region. Biomass Bioenergy 2014, 71, 58–68.

[9] Banias, G.; Achillas, C.; Vlachokostas, C.; Moussiopoulos, N.; Tarsenis, S. Assessing multiple criteria for the optimal location of a construction and demolition waste management facility. Build. Environ. 2010, 45, 2317–2326.

[10] Iakovou, E.; Moussiopoulos, N.; Xanthopoulos, A.; Achillas, C.; Michailidis, N.; Chatzipanagioti, M.; Koroneos, C.; Bouzakis, K.D.; Kikis, V. Multicriteria Matrix: A methodology for end-of-life management. Resour. Conserv. Recycl. 2009, 53, 329–339.

[11] Rousis, K.; Moustakas, K.; Malamis, S.; Papadopoulos, A.; Loizidou, M. Multi-criteria analysis for the determination of the best WEEE management scenario in Cyprus. Waste Manag. 2008, 28, 1941–1954.

[12] Hokkanen, J.; Salminen, P. Choosing a solid waste management system using multicriteria decision analysis. Eur. J. Oper. Res. 1997, 98, 19–36.

[13] Chatterjee, P.; Yazdani, M.; Chakraborty, S.; Panchal, D.; Bhattacharyya, S. (Eds.) Advanced Multi-Criteria Decision Making for Addressing Complex Sustainability Issues. In Advances in

Environmental Engineering and Green Technologies, 1st ed.; IGI Global: Hershey, PA, USA, 2019.

[14] Ishizaka, A.; Nemery, P. Multi-Criteria Decision Analysis: Methods and Software; Wiley: Hoboken, NJ, USA, 2013.

[15] Morrissey, A.J.; Browne, J. Waste management models and their application to sustainable waste management. Waste Manag. 2004, 24, 297–308.

[16] Roy, B. Electre III: Algorithme de classement base sur une representation floue des preferences en presence de criteres multiples. Cah. CERO 1978, 20, 3–24.

[17] Achillas, C.; Moussiopoulos, N.; Karagiannidis, A.; Banias, G.; Perkoulidis, G. Use of multi-criteria decision analysis to tackle waste management problems: A literature review. Waste Manag. Res. 2013, 31, 115–129.

[18] Rogers, M.; Bruen, M. Choosing realistic values of indifference, preference and veto thresholds for use with environmental criteria within ELECTRE. Eur. J. Oper. Res. 1998, 107, 542–551.

[19] ZEFFIROS Project. Offi cialWebsite. 2020. Available online: https://www.ze_rosproject.eu (accessed on March 2021).

[20] Kumar, A.; Samadder, S. Performance evaluation of anaerobic digestion technology for energy recovery from organic fraction of municipal solid waste: A review. Energy 2020, 197, 117253.

[21] Srisowmeya, G.; Chakravarthy, M.; Nandhini Devi, G. Critical considerations in two-stage anaerobic digestion of food waste—A review. Renew. Sustain. Energy Rev. 2020, 119, 109587.

[22] Wainaina, S.; Awasthi, M.K.; Sarsaiya, S.; Chen, H.; Singh, E.; Kumar, A.; Ravindran, B.; Awasthi, S.K. Liu, T.; Duan, Y.; et al. Resource recovery and circular economy from organic solid waste using aerobic and anaerobic digestion technologies. Bioresour. Technol. 2020, 30, 122778.

[23] Pramanik, S.K.; Suja, F.B.; Zain, S.; Pramanik, B.K. The anaerobic digestion process of biogas production from food waste: Prospects and constraints. Bioresour. Technol. Rep. 2019, 8, 100310.

[24] Mc Cabe, B.; Schmidt, T. Integrated Biogas Systems—Local Applications of Anaerobic Digestion towards Integrated Sustainable Solutions; Murphy, J.D., Ed.; International Energy Agency: Cork, Ireland, 2018.

[25] Al Seadi, T.; Stupak, I.; Smith, C.T. Governance of Environmental Sustainability of Manure-Based Centralised Biogas Production in Denmark; Murphy, J.D., Ed.; IEA Bioenergy: Cork, Ireland, 2018.

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΥΝΘΕΤΙΚΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΜΕΣΩ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΟΥ H_2 ΚΑΙ ΔΕΣΜΕΥΜΕΝΟΥ CO_2 ΑΠΟ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ

Γεώργιος Βαρβούτης[1,2*], Δημήτρης Ιψάκης[3], Ευρυδίκη Μαντέλα[2], Μιχάλης Κονσολάκης[3], Γεώργιος Ε. Μαρνέλλος[1,2]

[1] Ινστιτούτο Διεργασιών και Ενεργειακών Πόρων, ΕΚΕΤΑ, Θεσσαλονίκη
[2] Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, Κοζάνη
[3] Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά
e-mail: gvarvoutis@uowm.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο πλαίσιο των μέτρων αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής που υιοθετούνται από διακρατικούς και διεπιστημονικούς φορείς σε όλο τον πλανήτη, η Ευρωπαϊκή Ένωση πρόσφατα ανακοίνωσε το "Πράσινο Συμβόλαιο – Green Deal", το οποίο αποτελεί ένα θεσμοθετημένο πλαίσιο για να καταστήσει την Ευρωπαϊκή ήπειρο ανθρακικά ουδέτερη το 2050. Η μείωση της συγκέντρωσης του CO_2 στην ατμόσφαιρα, το οποίο αποτελεί το κατεξοχήν αέριο του θερμοκηπίου, μπορεί να επιτευχθεί αφενός μέσω της συμμετοχής των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) στο ενεργειακό μίγμα, αφετέρου μέσω της δέσμευσης και επαναχρησιμοποίησης βιομηχανικών εκπομπών CO_2 από μονάδες παραγωγής ισχύος ορυκτών καυσίμων, τσιμεντοβιομηχανίες, χαλυβουργεία κ.ά. Η συνήθης πρακτική για την ενεργοποίηση του CO_2 προς καύσιμα και χρήσιμα χημικά προϊόντα δύναται να λάβει χώρα μέσω της αναγωγής του με ανανεώσιμο H_2 που μπορεί να προέλθει από την ηλεκτρόλυση του νερού από ΑΠΕ, όπως ο ήλιος και ο άνεμος. Σε επόμενο στάδιο, το παραγόμενο υδρογόνο αλληλοεπιδρά με το δεσμευμένο CO_2 προς παραγωγή συνθετικού φυσικού αερίου (SNG), σε μία συνδυασμένη διεργασία που καλείται "Power-to-Gas".

Στην παρούσα εργασία μελετάται σχεδιαστικά μία συνδυασμένη και περιβαλλοντικά φιλική διεργασία παραγωγής συνθετικού φυσικού αερίου από εκπομπές CO_2 τσιμεντοβιομηχανίας και ηλιακά/αιολικά παραγόμενο H_2. Ειδικότερα, στην προτεινόμενη μονάδα, το απαιτούμενο CO_2 δεσμεύεται απευθείας από το ρεύμα καυσαερίων μίας τσιμεντοβιομηχανίας με τη μέθοδο της απορρόφησης-εκρόφησης σε διάλυμα μονοαιθανολαμίνης, ενώ το H_2 παράγεται εξ' ολοκλήρου από ηλεκτρόλυση του H_2O με χρήση αιολικής ή/και ηλιακής ενέργειας. Τα δύο (υψηλής καθαρότητας) αέρια οδηγούνται στο σύστημα του καταλυτικού αντιδραστήρα, το οποίο παράγει ως τελικό προϊόν SNG, το οποίο πληροί τις προδιαγραφές της ΔΕΣΦΑ για απευθείας εισαγωγή στο υπάρχον δίκτυο. Μέρος της παραγωγής του συνθετικού φυσικού αερίου δύναται να αντικαταστήσει πλήρως την χρήση ορυκτών καυσίμων στη διεργασία παραγωγής τσιμέντου, καλύπτοντας τις ενεργειακές απαιτήσεις και βελτιώνοντας περαιτέρω το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της συνολικής διεργασίας.

Στα ανωτέρω πλαίσια, η εργασία παρουσιάζει τον προκαταρκτικό σχεδιασμό των διαγραμμάτων ροής και τον υπολογισμό των ισοζυγίων μάζας κι ενέργειας (με χρήση των λογισμικών Aspen Plus και HOMER) για το σύνολο των κυρίως τμημάτων της διεργασίας α) της μονάδας δέσμευσης CO_2, β) της μονάδας ηλεκτρόλυσης H_2O και γ) του συστήματος του αντιδραστήρα. Τέλος, πραγματοποιείται οικονομική αποτίμηση της προτεινόμενης διεργασίας και μελέτη βιωσιμότητάς της για τον Ελλαδικό χώρο, λαμβάνοντας υπόψιν τωρινά και μελλοντικά κόστη για την παραμετρική ανάλυση.

Λέξεις Κλειδιά: [Ηλεκτρόλυση H_2O, Δέσμευση CO_2, παραγωγή SNG, Μελέτη βιωσιμότητας]

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι ολοένα αυξανόμενες εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου είναι αδιαμφισβήτητα πλέον συνδεδεμένες με την άκρως επιβλαβή για τον πλανήτη αύξηση της θερμοκρασίας, με το φαινόμενο αυτό να έχει επιταθεί τις τελευταίες δεκαετίες. Το κυριότερο αέριο του θερμοκηπίου δεν είναι άλλο από το CO_2, το ποσοστό του οποίου στην ατμόσφαιρα έχει αυξηθεί δραματικά λόγω ανθρωπογενών δραστηριοτήτων όπως η χρήση ορυκτών καυσίμων, η εκτεταμένη βιομηχανική δραστηριότητα και ο τομέας των μεταφορών. Προς τούτο, έχει τεθεί από διάφορους φορείς σε παγκόσμιο επίπεδο ο στόχος μείωσης των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου κατά 80% σε σχέση με τα επίπεδα της δεκαετίας του 1990 έως το 2050 [1]. Εξάλλου, η παραγωγής ενέργειας με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας παρουσιάζει αυξανόμενη τάση, λόγω της μείωσης του κόστους ανά μονάδα ενέργειας προερχόμενη από «πράσινες» πηγές. Παρόλα αυτά, η μετάβαση σε μια οικονομία η οποία δεν εξαρτάται από ορυκτά καύσιμα σε παγκόσμια κλίμακα δε μπορεί να πραγματοποιηθεί ταχέως, ακόμα και αν υπάρξει η βέλτιστη τεχνογνωσία. Συνεπώς, μία λύση αποτελεί η προσθήκη διεργασιών επεξεργασίας των εκπομπών CO_2 στο τελικό στάδιο της διεργασίας των ήδη εγκατεστημένων μονάδων, καθώς κάτι τέτοιο δεν απαιτεί κοστοβόρες ή εκτενείς τροποποιήσεις [2].

Τέτοιες διεργασίες σχετίζονται αφενός με τη δέσμευση του εκπεμπόμενου CO_2 και αφετέρου μπορούν να οδηγήσουν δυνητικά στην παραγωγή χρήσιμων χημικών προϊόντων, στα πλαίσια μίας κυκλικής οικονομίας. Όσον αφορά στις εκπομπές CO_2 από τη βιομηχανία παραγωγής τσιμέντου, συγκεκριμένα, εκτιμάται ότι το ετήσιο ποσό που απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα σε παγκόσμιο επίπεδο ανέρχεται σε 1.5 Gt και αναμένεται να αυξάνεται και τα επόμενα έτη [3]. Έτσι, γίνεται αντιληπτό ότι η χρήση τεχνολογιών για τη δέσμευση και αξιοποίηση του σχετιζόμενου με τις βιομηχανίες τσιμέντου CO_2 (Carbon Capture and Utilization, CCU) είναι άκρως σημαντική. Οι κυριότερες τεχνολογίες που έχουν προταθεί για τη δέσμευση του CO_2 είναι η απορρόφηση με χρήση αμινών (amine scrubbing), η αντίδραση με ασβεστούχες ενώσεις (calcium looping), ο διαχωρισμός με χρήση μεμβρανών και η λειτουργία της διεργασίας σε συνθήκες περίσσειας οξυγόνου (oxy-fuel combustion). Από αυτές, με διαφορά η πιο ώριμη τεχνολογικά διεργασία είναι η χρήση της απορρόφησης με αμίνες και συγκεκριμένα με χρήση υδατικού διαλύματος μονοαιθανολαμίνης (monoethanolamine, MEA) [4]

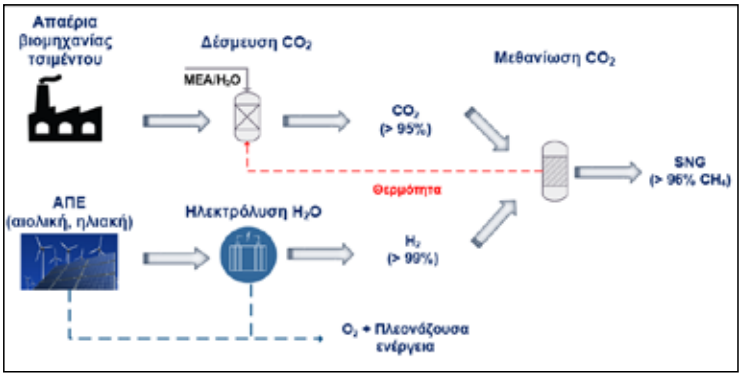
Ένας τρόπος για την περαιτέρω αξιοποίηση του δεσμευμένου CO_2 είναι η χημική μετατροπή του σε προϊόντα υψηλής προστιθέμενης αξίας, όπως μεθάνιο, μεθανόλη, υδρογονάνθρακες κ.ά. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η αντίδραση του CO_2 με H_2, καθώς η λεγόμενη υδρογόνωση του διοξειδίου του άνθρακα αποτελεί ουσιαστικά μία οικογένεια αντιδράσεων, με μία πληθώρα διαφορετικών προϊόντων, ανάλογα με τις συνθήκες αντίδρασης και το χρησιμοποιούμενο καταλύτη, η οποία αναφέρεται στη διεθνή βιβλιογραφία ως “Power-to-Gas, PtG”. Σημαντικό ρόλο ως προς τη βιωσιμότητα αυτής της διεργασίας ενέχει η πηγή του υδρογόνου. Κατά κύριο λόγο, το υδρογόνο παράγεται βιομηχανικά από την αναμόρφωση του μεθανίου, διεργασία που σχετίζεται με υψηλές εκπομπές CO_2. Εφόσον, όμως, το υδρογόνο παράγεται με περιβαλλοντικά φιλικές διεργασίες, όπως η ηλεκτρόλυση νερού με ενέργεια προερχόμενη από ΑΠΕ, ο συνδυασμός του με το δεσμευόμενο CO_2 αποτελεί μία πολλά υποσχόμενη διεργασία στα πλαίσια μίας κυκλικής οικονομίας φιλικής προς το περιβάλλον [5].

Όσον αφορά σε βιβλιογραφικές μελέτες για την εν λόγω διεργασία, οι Becker et. al [6] ανέλυσαν μία διεργασία PtG επί τη βάσει της αξιοποίησης του 2% των εκπομπών ενός εργοστασίου παραγωγής ενέργειας 500 MW και κατέδειξαν τη δυνατότητα παραγωγής ενέργειας απευθείας από την πλεονάζουσα θερμότητα της διεργασίας, ενώ το κόστος για παραγωγή 80 tn SNG/d ανήλθε στα $ 132/MWh, με το κόστος παραγωγής του H_2 από ΑΠΕ να είναι το κυρίαρχο. Εξάλλου, οι Buchholz et. al, [7] εξέτασαν την περίπτωση ενός αντιδραστήρα μεθανίωσης σε συνδυασμό με έναν αλκαλικό ηλεκτρολύτη δυναμικότητας 80 MW_{el} και ένα συμβατικό εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας. Το κόστος παραγωγής του SNG σε αυτή τη μελέτη βρέθηκε μεταξύ $ 720-1080/MWh για παραγωγή 60 tn SNG/d. Στις εργασίες των Giglio et al., [8,9] το κόστος παραγωγής του SNG υπολογίστηκε χαμηλότερο από $ 100/MWh, το οποίο όμως εξαρτάται ισχυρά από το κόστος δέσμευσης του CO_2 και της ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς εξετάστηκε ηλεκτρόλυση σε υψηλή θερμοκρασία, χωρίς τη χρήση ΑΠΕ. Σε όλες τις προαναφερθείσες μελέτες προέκυψε το συμπέρασμα ότι το περιθώριο κέρδους της διεργασίας αυξάνεται εφόσον πραγματοποιηθεί ορθή διαχείριση της εμπλεκόμενης ενέργειας. Προς τούτο, οι Davis και Martin [10], αναφέρουν ότι η μελέτη διάφορων πηγών H_2, ο χώρος κατασκευής και το κόστος δέσμευσης του CO_2 είναι επιτακτικά για την αποτίμηση της βιωσιμότητας της διεργασίας.

Πρόσφατα, οι Chauvy et. al, [11] εξέτασαν την περίπτωση μίας PtG διεργασίας μέσω προηγμένης τεχνολογίας δέσμευσης CO_2 από το 10% του ρεύματος των απαερίων μίας βιομηχανίας τσιμέντου (ήτοι 10 tn CO_2/h) προς παραγωγή SNG, αξιοποιώντας αιολική ενέργεια για παραγωγή H_2. Οι συγγραφείς

πρότειναν ένα βελτιστοποιημένο δίκτυο ανάκτησης και επαναχρησιμοποίησης ενέργειας, με συνεπακόλουθη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η οριακή τιμή κόστους παραγωγής SNG υπολογίστηκε ίση με $ 115/MWh για συνεχή παραγωγή 3.6 tn SNG/d, αλλά η προβλεπόμενη μείωση των διάφορων κοστών παραγωγής καθώς και η εμπορική αξιοποίηση τόσο του παραγόμενου από την ηλεκτρόλυση O_2 όσο και της εσωτερικά παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας αναμένεται να οδηγήσει σε ακόμα πιο μειωμένη οριακή τιμή παραγωγής SNG. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί η ολοκληρωμένη μελέτη των Bailera et. al, [12], στην οποία αναφέρονται συγκεντρωτικά διάφορα ολοκληρωμένα συστήματα με CO_2 και H_2 από ΑΠΕ, για εφαρμογές σε μία ευρεία κλίμακα.

Επί τη βάσει των ανωτέρω, στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται η μελέτη βιωσιμότητας μίας ολοκληρωμένης διεργασίας για την αξιοποίηση διαλείπουσας ενέργειας από ΑΠΕ, δέσμευσης εκπομπών CO_2 και τελική παραγωγή συνθετικού φυσικού αερίου, SNG. Πιο συγκεκριμένα, το απαιτούμενο CO_2 επιλέχθηκε να προέρχεται από μία μονάδα δέσμευσης του συνόλου των εκπομπών μίας βιομηχανίας τσιμέντου του ελλαδικού χώρου, ενώ οι απαιτήσεις σε υδρογόνο καλύπτονται πλήρως από μονάδα ηλεκτρόλυσης νερού με χρήση αιολικής και ηλιακής ενέργειας. Οι δύο αυτές διεργασίες συνδυάζονται, τέλος, για την καταλυτική μεθανίωση του CO_2, προς ένα τελικό ρεύμα καθαρότητας > 97% σε CH_4. Το τελικό προϊόν της διεργασίας δύναται να χρησιμοποιηθεί με διάφορους τρόπους, ανάλογα με τον τελικό χρήστη. Συγκεκριμένα, Η διεργασία που προτείνεται απεικονίζεται σχηματικά στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 1):



Εικόνα 1: Προτεινόμενη διεργασία για παραγωγή συνθετικού φυσικού αερίου (SNG) με χρήση CO_2 από δέσμευση εκπομπών τσιμεντοβιομηχανίας και H_2 παραγόμενο από ΑΠΕ.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η προτεινόμενη διεργασία αποτελείται από τρεις επιμέρους μονάδες:

i) Δέσμευση CO_2 από τα απαέρια μίας βιομηχανίας τσιμέντου του ελλαδικού χώρου. Η δέσμευση πραγματοποιείται με την εγνωσμένη μέθοδο της προσρόφησης σε υδατικό διάλυμα MEA και θεωρείται αξιοποίηση του συνόλου του ρεύματος των καυσαερίων.

ii) Παραγωγή του απαιτούμενου H_2 από μία μονάδα ηλεκτρόλυσης νερού, εξολοκλήρου με χρήση αιολικής και ηλιακής ενέργειας.

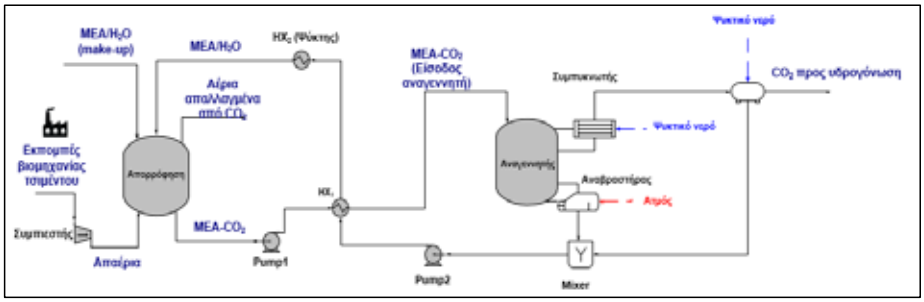
iii) Παραγωγή SNG μέσω της αντίδρασης μεθανίωσης του CO_2, με χρήση πειραματικών δεδομένων από προηγούμενη εργαστηριακή μελέτη της ερευνητικής ομάδας των συγγραφέων.

Η κάθε μονάδα εξετάστηκε ξεχωριστά, με επίλυση των ισοζυγίων μάζας κι ενέργειας και διαστασιολόγηση με τη χρήση των λογισμικών Aspen Plus και HOMER. Έπειτα ερευνήθηκε η συνδυασμένη χρήση των ενεργειακών απαιτήσεων της διεργασίας και πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός των οικονομικών δεικτών προς αποτίμηση της βιωσιμότητας της προτεινόμενης διεργασίας. Τέλος, πραγματοποιήθηκε μία προκαταρκτική παραμετρική ανάλυση για την εύρεση της των τιμών που καθιστούν οικονομικά βιώσιμη την προτεινόμενη διεργασία.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1. Μονάδα δέσμευσης CO_2

Η μονάδα δέσμευσης CO_2 σχεδιάστηκε ως προς τη δέσμευση ενός ρεύματος απαερίων από τη βιομηχανία τσιμέντου, παροχής 1124 tn/h και σύστασης (v/v %): O_2 12.8%, H_2O 8.9%, N_2 64.6% και CO_2 13.7%. Βάσει αυτού, η απαίτηση σε MEA για μία απόδοση διαχωρισμού CO_2 ίση με 90% είναι 2000 tn/h, με σύσταση MEA:H_2O = 66:34 w/w. Σχηματικά, το διάγραμμα ροής της διεργασίας δέσμευσης CO_2 φαίνεται στην Εικόνα 2, ενώ τα κυριότερα χαρακτηριστικά των ρευμάτων παρατίθενται στον Πίνακα 1. Η επίλυση των ισοζυγίων μάζας κι ενέργειας της μονάδας πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό Aspen Plus, με τη χρήση του πακέτου ELECNRTL για τον υπολογισμό των θερμοφυσικών ιδιοτήτων των ενώσεων. Το απαλλαγμένο από CO_2 (<1 %) ρεύμα αερίων απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα από το επάνω μέρος του απορροφητή, ενώ το υγρό ρεύμα στο κάτω μέρος θερμαίνεται στους 80 °C και οδηγείται στον αναγεννητή, στην εξόδο του οποίου λαμβάνεται το ρεύμα που περιέχει > 95 % CO_2 (35 °C, 1 bar) καθώς και το ρεύμα στο οποίο έχει γίνει η ανάκτηση του διαλύτη MEA/H_2O, ο οποίος οδηγείται εκ νέου στην είσοδο του απορροφητή, κλείνοντας τον κύκλο απορρόφησης/αναγέννησης. Μία μικρή ποσότητα διαλύτη (220-440 kg MEA) εισέρχεται συνεχόμενα στον απορροφητή, για να καλυφθούν οι ενδεχόμενες απώλειες και να διατηρείται η λειτουργία σε συνεχείς συνθήκες.



Εικόνα 2: Διάγραμμα ροής μονάδας δέσμευσης CO_2.

Πίνακας 1: Σύσταση και συνθήκες λειτουργίας των βασικών ρευμάτων της μονάδας δέσμευσης CO_2.

	Απαέρια βιομηχανίας τσιμέντου	Ρεύμα MEA/H_2O*	Αέρια απαλλαγμένα από CO_2	MEA-CO_2 (είσοδος αναγεννητή)	CO_2 προς υδρογόνωση
O_2, % v/v	12.8	-	11.9	-	-
N_2, % v/v	64.6	-	60.2	-	-
CO_2, % v/v	13.7	-	1.3	5.7	96.8
H_2O, % v/v	8.9	86.8	26.6	80.7	3.2
MEA, % v/v	-	13.2	-	13.6	-
T, °C / P, bar	97/1	37 / 1.1	71.8 / 1	80 / 1.8	25 / 1
Ροή, kmol/h	37,700	84,000	40,480	81,210	4,190

** συμπεριλαμβάνεται η ποσότητα make-up.*

3.2. Μονάδα παραγωγής H_2 με χρήση ΑΠΕ

Η διεργασία παραγωγής H_2 σχεδιάστηκε αναλυτικά με χρήση του λογισμικού HOMER, ενώ το διάγραμμα αυτής απεικονίζεται σχηματικά στην Εικόνα 3. Επιλέχθηκε η χρήση της τεχνολογίας αλκαλικής ηλεκτρόλυσης απεσταγμένου νερού, ως η πιο ώριμη τεχνολογική διεργασία. Εκτός από το

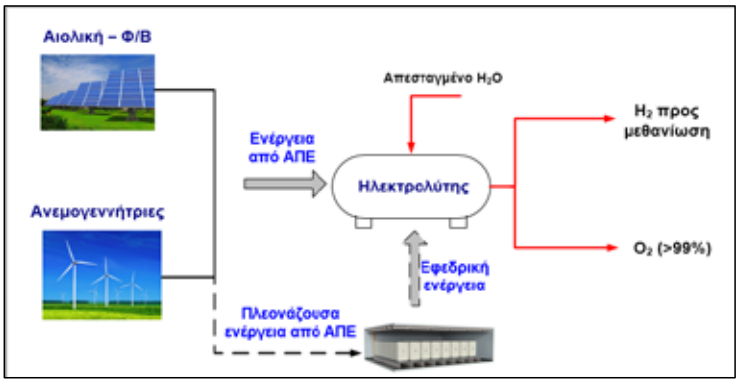
παραγόμενο υδρογόνο, στη διεργασία παράγεται σημαντική ποσότητα καθαρού O_2 καθώς κι ένα ποσό πλεονάζουσας ενέργειας, τα οποία δύνανται να αξιοποιηθούν εμπορικά. Ο σχεδιασμός πραγματοποιήθηκε βάσει των παρακάτω, ενώ τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης της μονάδας παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 2.

i) Απαίτηση συνεχούς ροής 16,200 kmol H_2/h, από τη στοιχειομετρικά απαιτούμενη ποσότητα για την αντίδραση μεθανίωσης ήτοι H_2:CO_2 =4 και λαμβάνοντας υπόψιν το ρεύμα εξόδου από τη μονάδα δέσμευσης CO_2.

ii) Επιλογή μεταξύ διάφορων τύπων εξοπλισμού αιολικής και ηλιακής ενέργειας, δεδομένης της εγγύτητας της μονάδας στη βιομηχανία τσιμέντου

iii) Επιλογή του κατάλληλου τύπου συσσωρευτών, για βραχυπρόθεσμη αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας, θεωρώντας τις πιο ώριμες τεχνολογίες

iv) Αποφυγή εφεδρικών μονάδων οι οποίες κάνουν χρήση ανθρακούχων πηγών ενέργειας



Εικόνα 3: Διάγραμμα ροής μονάδας παραγωγής H_2 από ηλεκτρόλυση H_2O.

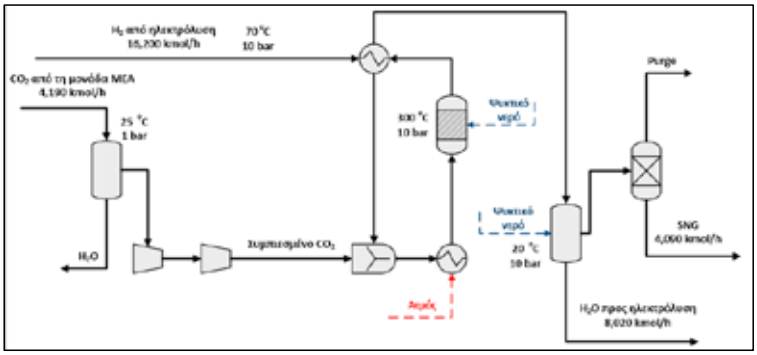
Πίνακας 2. Αποτελέσματα διαστασιολόγησης και κόστους για τη βελτιστοποιημένη μονάδα παραγωγής H_2 από ηλεκτρόλυση H_2O.

Μέγεθος	Τιμή	Κόστος (Μ€)
Φ/Β, MW_p	4,100	3,350
Ανεμογεννήτριες, MW_p	1,540	2,570
Αλκαλικός ηλεκτρολύτης, MW_p	2,200	1,870
Συσσωρευτές μολύβδου-οξέος, MWh	420	10.6
Πάγια επένδυση, Μ€		7,810
Ετήσιο κόστος παραγωγής, Μ€		35
Νερό διεργασίας, kmol/h	21,700	Πίνακας 5
Παραγωγή H_2 (70 ^oC/10 bar), kmol/h	16,210	Προς παραγωγή SNG
Παραγωγή O_2 (70 ^oC/10 bar), kmol/h	8,110	Πίνακας 5
Πλεονάζουσα ενέργεια, GWh/yr	303	Πίνακας 5

3.3. Μονάδα παραγωγής συνθετικού φυσικού αερίου (SNG)

Η μονάδα καταλυτικής υδρογόνωσης του CO_2 προς την τελική παραγωγή συνθετικού φυσικού αερίου απεικονίζεται στην Εικόνα 4, ενώ στον Πίνακα 3 φαίνονται οι συνθήκες και οι παροχές των κυριότερων ρευμάτων της διεργασίας. Για την επίλυση των ισοζυγίων μάζας κι ενέργειας της διεργασίας χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Aspen Plus. Η αντίδραση πραγματοποιείται σε πίεση 10 bar, ίση με την πίεση του ρεύματος εξόδου του ηλεκτρολύτη, ενώ η θερμοκρασία επιλέχθηκε ίση με 300 ºC, επί τη βάσει καταλυτικών αποτελεσμάτων της ερευνητικής ομάδας των συγγραφέων με επίτευξη θερμοδυναμικής μετατροπής του CO_2 σε υλικά Ni/CeO_2-NR [13]. Τα αντιδρώντα εισέρχονται στη στοιχειομετρική αναλογία της αντίδρασης μεθανίωσης, ήτοι CO_2:H_2 = 1:4 (Εξίσωση 1). Το παραγόμενο νερό απομακρύνεται με χρήση συμπυκνωτή και το παραγόμενο SNG υφίσταται κατάλληλο διαχωρισμό, ανάλογα με την τελική χρήση του.

$$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O,\ \Delta H_{298K} = -164.7\ kJ/mol \qquad (1)$$



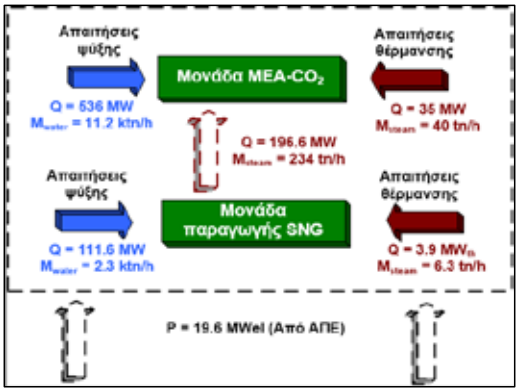
Εικόνα 4: Διάγραμμα ροής μονάδας παραγωγής SNG.

Πίνακας 3: Σύσταση και συνθήκες λειτουργίας των βασικών ρευμάτων της μονάδας παραγωγής SNG.

	Είσοδος αντιδραστήρα	Έξοδος αντιδραστήρα	Απομάκρυνση νερού	Τελικό ρεύμα SNG
CH_4, % v/v	-	31.9	-	97.1
CO_2, % v/v	19.9	0.7	-	2.1
H_2O, % v/v	0.4	64.8	> 99.9	-
H_2, % v/v	79.7	2.6	-	0.8
T, ºC / P, bar	300 / 10	300 / 10	20 / 10	20 / 10
Ροή, kmol/h	20,347	12,412	8,023	4,085

3.4. Διαχείριση ενέργειας

Η εκπλήρωση των θερμικών καθηκόντων της διεργασίας γίνεται εν μέρει με την παραγωγή ατμού από το στάδιο της εξώθερμης αντίδρασης μεθανίωσης, στο οποίο απελευθερώνεται συνολική θερμική ενέργεια 197 MW. Αυτή η θερμότητα καλύπτει το 85% των θερμικών απαιτήσεων του αναβραστήρα στον αναγεννητή της μονάδας δέσμευσης CO_2, ενώ το υπόλοιπο 15% θεωρείται ότι παρέχεται από έναν καυστήρα ή αεριοποιητή βιομάζας. Οι ηλεκτρικές απαιτήσεις καλύπτονται κατά 50% από το ποσό πλεονάζουσας ενέργειας της μονάδας ΑΠΕ. Ο συνδυασμός των ενεργειακών απαιτήσεων της συνολικής διεργασίας συνοψίζεται στην Εικόνα 5.



Εικόνα 5: Σχηματική απεικόνιση των θερμικών/ενεργειακών απαιτήσεων της προτεινόμενης διεργασίας.

3.5. Οικονομική ανάλυση

Η οικονομική αποτίμηση της διεργασίας πραγματοποιήθηκε με τη χρήση γνωστών εμπειρικών σχέσεων κοστολόγησης της βιβλιογραφίας [14,15], εκτός από το σύστημα ηλεκτρόλυσης και παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ, το οποίο σχεδιάστηκε εξ ολοκλήρου στο λογισμικό HOMER. Τα συνοπτικά αποτελέσματα για το κόστος του βασικού εξοπλισμού καθώς και τα κόστη των βοηθητικών παροχών και οι τιμές μονάδας προϊόντων φαίνονται στους Πίνακες 4 και 5, αντίστοιχα. Στον Πίνακα 6 φαίνεται η ανάλυση της πάγιας επένδυσης και των λειτουργικών εξόδων της προτεινόμενης διεργασίας. Η μονάδα ΑΠΕ-παραγωγής H_2 ενέχει εμφανώς το υψηλότερο κόστος (περίπου 9 δις €), λόγω του πολύ υψηλού κόστους κατασκευής του ψυκτικού πύργου. Εξάλλου, οι διεργασίες δέσμευσης CO_2 και η μονάδα μεθανίωσης χαρακτηρίζονται από παρεμφερή ποσά συνολικής πάγιας επένδυσης, ενώ οι τιμές για τα ετήσια λειτουργικά κόστη είναι παρόμοιες και στις τρεις υπο-μονάδες, με τη μονάδα ΑΠΕ να εμφανίζει τη χαμηλότερη τιμή, όπως είναι αναμενόμενο από την υψηλή αυτονομία της διεργασίας και τις μειωμένες απαιτήσεις σε εργατικό προσωπικό και βοηθητικές παροχές.

Πίνακας 4: Κόστος βασικού εξοπλισμού (σε €) της συνολικής διεργασίας.

Είδος εξοπλισμού	Δέσμευση CO_2	Μεθανίωση CO_2	Σύστημα βοηθητικών παροχών
Απορροφητής	5,235,500	---	---
Συμπιεστές	8,080,686	18,610,900	---
Αντλίες	480,600	---	---
Εναλλάκτες θερμότητας	2,992,700	1,959,900	---
Αναγεννητής	9,747,100	---	---
Δεξαμενές	209,500	591,200	---
Αντιδραστήρας	---	5,300,000	---
Διαχωρισμός SNG	---	500,000	---
Ψυκτικός πύργος	---	---	236,000,000
Παραγωγή ατμού	---	---	2,350,000
Σύνολο	26,746,086	26,962,000	238,350,000

Πίνακας 5: Κόστος βοηθητικών παροχών και τιμή πώλησης των προϊόντων, συμπεριλαμβανομένης της ηλεκτρικής ενέργειας, (σε €) βάσει επικαιροποιημένων τιμών.

Βοηθητική παροχή/προϊόν	Δέσμευση CO_2	Μονάδα ΑΠΕ - Παραγωγή H_2	Μεθανίωση CO_2
Κόστος βοηθητικών παροχών			
Ηλεκτρική ενέργεια	Παρέχεται από τη μονάδα ΑΠΕ	---	Παρέχεται από τη μονάδα ΑΠΕ
Νερό ψύξης	2,533,129	---	462,397
Make-up MEA (1450 €/tn)	3,736,041	---	---
Ατμός (14 €/tn)	5,404,009	---	656,737
Καταλύτης (5000 €/tn)	---	---	5,000,000
Απεσταγμένο νερό για ηλεκτρόλυση (5.5 €/tn)	---	15,590,807	---
Συνολικό κόστος βοηθητικών παροχών (ανά διεργασία)	11,673,179	15,590,807	6,119,134
ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ			
O_2 από την ηλεκτρόλυση (80 €/tn)	---	154,590,874	---
SNG >95 % (0.5 €/kg)	---	---	278,852,700
Πλεονάζουσα ενέργεια (0.08 €/kWh)	---	12,400,000	---
Συνολικό κόστος αγοράς προϊόντων (ανά διεργασία)	---	166,990,874	278,852,700

Τέλος, για την εύρεση της οριακής τιμής της οικονομικής βιωσιμότητας της προτεινόμενης διεργασίας, εξετάστηκαν τέσσερα διαφορετικά σενάρια. Ως περίπτωση αναφοράς (σενάριο Α) αναφέρεται το σενάριο στο οποίο γίνεται χρήση τωρινών τιμών SNG, O_2 και ηλεκτρικής ενέργειας. Τα υπόλοιπα τρία σενάρια (Β-Δ) αφορούν την περίπτωση οριακής τιμής και υπολογίζεται η εκάστοτε τιμή πώλησης του ενός προϊόντος. Στον Πίνακα 7 παρουσιάζονται οι διάφοροι υπολογισμένοι οικονομικοί δείκτες της ολοκληρωμένης διεργασίας για όλα τα σενάρια. Όπως φαίνεται από τις τιμές του Πίνακα 7, η περίπτωση αναφοράς είναι σαφώς μη βιώσιμη ακόμα και στο 25ο έτος λειτουργίας της. Ως προς τα υπόλοιπα σενάρια, οι αντίστοιχες οριακές τιμές πώλησης για απόσβεση της επένδυσης σε 25 έτη (Απόδοση επένδυσης = 6.4%) υπολογίζονται ίσες με:

Β) 1420€/tn για το SNG, τιμή ~2.8 υψηλότερη από τις τωρινές τιμές

Γ) 345.6€/tn για το O_2, τιμή ~4.3 υψηλότερη από τις τωρινές τιμές

Δ) 3.48€/kWh για την ηλεκτρική ενέργεια, τιμή ~43.5 υψηλότερη από τις τωρινές τιμές

Πίνακας 6: Συνολική πάγια επένδυση και λειτουργικά κόστη (σε €) για τη συνολική διεργασία.

Είδος κόστους	Δέσμευση CO_2	Μονάδα ΑΠΕ - Παραγωγή H_2	Μεθανίωση CO_2	Σύστημα βοηθητικών παροχών
Άμεσα κόστη	100,030,362		100,837,880	
Έμμεσα κόστη	19,792,104		19,951,880	
Λοιπά κόστη	18,722,260		18,873,400	
Πάγια επένδυση	138,544,726	7,808,173,221	139,663,160	286,020,000
Κεφάλαιο κίνησης	20,781,709	1,171,225,983	20,949,474	42,903,000
Συνολική πάγια επένδυση	159,326,435	8,979,399,204	160,612,634	328,923,000
Άμεσα κόστη παραγωγής	24,528,798	34,264,201	19,126,360	13,705,680
Ετήσια κόστη	23,346,543	5,229,242	23,592,022	1,743,081
Γενικά κόστη	2,337,507	160,000	2,262,001	64,000
Συνολικό ετήσιο κόστος παραγωγής	50,212,848	39,653,443	44,980,383	15,512,761

Πίνακας 7. Δείκτες οικονομικής αξιολόγησης της ολοκληρωμένης διεργασίας για τα διάφορα εξεταζόμενα σενάρια.

	Σενάριο Α	Σενάριο Β	Σενάριο Γ	Σενάριο Δ
Ακαθάριστο κέρδος, M€/yr	319.67	832.87	832.87	832.87
Καθαρό κέρδος, M€/yr	236.56	616.32	616.32	616.32
Απόδοση επένδυσης, %	2.46	6.40	6.40	6.40
Καθαρή τρέχουσα αξία, M€	-5,932.76	0.00	0.00	0.00
Τιμή πώλησης SNG, €/tn	500	**1420**	500	500
Τιμή πώλησης O_2, €/tn	80	80	**345.6**	80
Τιμή πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας, €/kWh	0.08	0.08	0.08	**3.48**

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε τεχνικο-οικονομική ανάλυση μίας ολοκληρωμένης διεργασίας μεγάλης κλίμακας για τη μετατροπή του CO_2 σε συνθετικό φυσικό αέριο, SNG. Βάσει της ακολουθούμενης μεθοδολογίας, βρέθηκε ότι μπορεί να επιτευχθεί ετήσια παραγωγή SNG ίση με 550 ktn, με δεδομένη την ετήσια δέσμευση 1,350 ktn CO_2 από τα απαέρια μίας βιομηχανίας τσιμέντου στην Ελλάδα καθώς και την ετήσια παραγωγή 32 tn H_2 με χρήση ΑΠΕ για την ηλεκτρόλυση νερού. Συνολικά, το σύστημα σχεδιάστηκε με σκοπό την αυτόνομη λειτουργία και με ελαχιστοποιημένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Προς τούτο, υπολογίστηκε πως η εξώθερμη διεργασία της μεθανίωσης του CO_2 δύναται να καλύψει έως και το 85% των θερμικών απαιτήσεων της μονάδας δέσμευσης του CO_2, ενώ το

πλεόνασμα ενέργειας από τη μονάδα ΑΠΕ καλύπτει επίσης ένα μεγάλο μέρος των ενεργειακών απαιτήσεων.

Από την προκαταρκτική οικονομική ανάλυση προέκυψε ότι η κερδοφορία του εγχειρήματος προκύπτει με μία τιμή πώλησης του παραγόμενου SNG μεγαλύτερη ή ίση από 1,420 €/tn, με ταυτόχρονη εκμετάλλευση του παραγόμενου O_2 από τη μονάδα ηλεκτρόλυσης και την αξιοποίηση του πλεονάσματος ενέργειας από τη μονάδα ΑΠΕ. Παρόλο που αυτή η τιμή πώλησης είναι σχεδόν τριπλάσια από την τωρινή τιμή αγοράς φυσικού αερίου, η προβλεπόμενη μείωση του κόστους για την παραγωγή υδρογόνου από ΑΠΕ καθώς και η αναμενόμενη αυξημένη αναγκαιότητα για παραγωγή SNG μηδενικού ανθρακικού αποτυπώματος ενδέχεται να καταστήσουν την προτεινόμενη τεχνολογία ανταγωνιστική σε σχέση με τις συμβατικές διεργασίες.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία υλοποιήθηκε στο πλαίσιο της Δράσης ΕΡΕΥΝΩ – ΔΗΜΙΟΥΡΓΩ – ΚΑΙΝΟΤΟΜΩ και συγχρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση και εθνικούς πόρους μέσω του Ε.Π. Ανταγωνιστικότητα, Επιχειρηματικότητα & Καινοτομία (ΕΠΑνΕΚ) (κωδικός έργου: Τ1ΕΔΚ-00094).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] European Commission, 2011, “A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050,” COM (2011) 112 Final.

[2] Cuéllar-Franca, R.M. and Azapagic, A., 2015, “Carbon capture, storage and utilization technologies: A critical analysis and comparison of their life cycle environmental impacts,” J. of CO_2 Util., 9, pp. 82-102.

[3] Andrew, R.M., 2018, “Global CO_2 emissions from cement production,” Earth Syst. Sci. Data., 10(1), pp. 195-217.

[4] Sifat, N.S. and Haseli, Y., 2019, “A critical review of CO_2 capture technologies and prospects for clean power generation,” Energies, 12(21), pp. 4143.

[5] Adlen E., et. al, 2019, “The technological and economic prospects for CO_2 utilization and removal”, Nature, 575, pp. 87–97.

[6] Becker, W.L., et al., 2019, “Production of synthetic natural gas from carbon dioxide and renewably generated hydrogen: A techno-economic analysis of a power-to-gas strategy,” J. Energy Resour. Technol. Trans. 141(2) pp. 21901.

[7] Buchholz, O.S., et al., 2014, “Power-to-Gas: Storing surplus electrical energy a design study”, Energy Procedia, 63, pp. 7993-8009.

[8] Giglio, E., et. al, 2015, “Synthetic natural gas via integrated high-temperature electrolysis and methanation: Part I-Energy performance,” J. Energy Storage, 1, pp. 22-37.

[9] Giglio, E., et. al, 2015, “Synthetic natural gas via integrated high-temperature electrolysis and methanation: Part II-Economic analysis,” J. Energy Storage, 2, pp. 64-79.

[10] Davis, W. and Martin, M., 2014, “Optimal year-round operation for methane production from CO_2 and water using wind and/or solar energy,” J. Clean. Prod., 80, pp. 252-261.

[11] Chauvy, R., et. al., 2020, “Production of synthetic natural gas from industrial carbon dioxide”, Appl. Energy, 260, pp. 114249.

[12] Bailera M, et. al, 2017, “Power to Gas projects review: Lab, pilot and demo plants for storing renewable energy and CO_2”, Renew. Sust. Energ. Rev., 69, pp. 292-312.

[13] Varvoutis, G. et. al, 2020, “Remarkable efficiency of Ni supported on hydrothermally synthesized CeO_2 nanorods for low-temperature CO_2 hydrogenation to methane”, Catal. Comm., 142, pp. 106036.

[14] Towler, G., and Sinnott, R. K., 2013, “Chemical Engineering Design - Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design (2nd Edition)”.

[15] Sinnott, R. K., 2005, “Coulson & Richardson’s Chemical Engineering Design”.

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΠΡΟΣΘΗΚΗΣ ΚΑΤΑΛΥΤΗ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΛΙΓΝΙΤΗ ΚΑΙ ΕΛΑΙΟΠΥΡΗΝΑ ΥΠΟ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ CO_2

Αθανάσιος Λαμπρόπουλος[1,*], Χρυσοβαλάντης Χρυσικός[1], Παναγιώτα Πασχάλη[2], Μιχάλης Κονσολάκης[3], Γεώργιος Ε. Μαρνέλλος[1,4]

[1*] Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, Κοζάνη,
[2] Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, Κοζάνη
[3] Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Τεχνικό Πανεπιστήμιο Κρήτης, Χανιά
[4] Ινστιτούτο Διεργασιών και Ενεργειακών Πόρων, ΕΚΕΤΑ, Θεσσαλονίκη
*e-mail: alabropoulos@uowm.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Πρόσφατα εντατικοποιούνται οι προσπάθειες για ένα μελλοντικό ενεργειακό μίγμα απαλλαγμένο από εκπομπές άνθρακα με σκοπό την αποτροπή της κλιματικής αλλαγής. Προς την συγκεκριμένη κατεύθυνση, εγκαταλείπονται σταδιακά οι συμβατικές τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα και προτείνονται νέες διατάξεις ενεργειακής μετατροπής και η χρήση εναλλακτικών καυσίμων. Η αεριοποίηση ορυκτών στερεών καυσίμων και βιοκαυσίμων με χρήση δεσμευμένων εκπομπών CO_2 ως μέσο αεριοποίησης, συνιστά μία ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα και ελπιδοφόρα προοπτική αφενός ως μία εναλλακτική οδό αξιοποίησης των εκπομπών CO_2, αφετέρου διότι το παραγόμενο αέριο σύνθεσης δύναται να χρησιμοποιηθεί είτε άμεσα ως καύσιμο σε ΜΕΚ, αεριοστρόβιλους και SOFCs, είτε ως πρώτη ύλη για την παραγωγή χημικών προϊόντων και συνθετικών υγρών καυσίμων.

Ο στόχος της παρούσας εργασίας είναι να διερευνήσει την επίδραση της θερμικής επεξεργασίας Ελληνικού λιγνίτη και ελαιοπυρήνα, ενός στερεού ορυκτού καυσίμου και μίας τυπικής βιομάζας, αντίστοιχα, ως προς την απόδοση αεριοποίησης των πρωτογενών καυσίμων και εξανθρακωμάτων τους με χρήση καθαρού CO_2 ως μέσο αεριοποίησης, απουσία και παρουσία ανθρακικών αλάτων σε πειράματα μεταβαλλόμενης (300 – 900 ^oC) και σταθερής (700 και 800 ^oC) θερμοκρασίας. Το παραγόμενο αέριο σύνθεσης αποτελούνταν κυρίως από CO, ακολουθούμενο από μικρές ποσότητες H_2 και CH_4 κυρίως λόγω των διεργασιών απελευθέρωσης της πτητικής ύλης των καυσίμων. Η βελτιωμένη απόδοση των εξανθρακωμάτων των υπό εξέταση καυσίμων αποδόθηκε στις βελτιωμένες ιδιότητες υφής τους (υψηλότερο πορώδες και επιφάνεια BET), την υψηλότερη περιεκτικότητα σε σταθερό άνθρακα και χαμηλότερη περιεκτικότητα σε πτητική ύλη σε σύγκριση με τα πρωτογενή δείγματα. Η προσθήκη καταλύτη οδήγησε σε αύξηση της παραγωγής του αερίου σύνθεσης.

Λέξεις Κλειδιά: *Λιγνίτης, Ελαιοπυρήνας, Θερμική επεξεργασία, Αεριοποίηση με CO_2, Αέριο σύνθεσης*

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο άνθρακας αποτελεί το φθηνότερο και πιο άφθονο ορυκτό καύσιμο, καλύπτοντας ~30% της παγκόσμιας πρωτογενούς κατανάλωσης ενέργειας [1]. Παρόλο που ο λιγνίτης αποτελεί το 45% των παγκόσμιων αποθεμάτων άνθρακα (5 δις. τόνοι στην Ελλάδα), η ευρεία χρήση του περιορίζεται εξαιτίας της μεγάλης του περιεκτικότητας σε υγρασία και της χαμηλής θερμιδικής του αξίας. Ως εκ τούτου, η χρήση του λιγνίτη ως καύσιμο συνδέεται με διάφορα ζητήματα, όπως η χαμηλή θερμική απόδοση και οι υψηλές εκπομπές ρύπων ανά παραγόμενη Mwh. Όταν υπεγράφη η συμφωνία του Παρισιού για την κλιματική αλλαγή το 2015, η χρήση άνθρακα στο παγκόσμιο ενεργειακό μίγμα βρισκόταν στο μέσο μίας τριετούς μείωσης της [1]. Διάφορα θέματα, όπως ο ανταγωνισμός από το φυσικό αέριο και τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) σε συνδυασμό με τις διακυβερνητικές πολιτικές για μια μετάβαση σε πιο ήπιες και καθαρές μορφές ενέργειας, συνεχίζουν να περιορίζουν το ρόλο του άνθρακα. Επί του παρόντος, ο άνθρακας ανέρχεται περίπου στο 28% της παγκόσμιας κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας και σχεδόν στο 40% της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Μελλοντικές προβλέψεις, ωστόσο, επισημαίνουν τη σημασία του άνθρακα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στις αναπτυσσόμενες χώρες και στο σενάριο για ζήτηση "περισσότερης ενέργειας" [2]. Πρόσφατα, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή ανακοίνωσε τη φιλόδοξη στρατηγική της Πράσινης Συμφωνίας για να καταστήσει την Ευρώπη την πρώτη κλιματικά ουδέτερη ήπειρο το 2050. Προς αυτή την κατεύθυνση, 42 περιφέρειες της ΕΕ, συμπεριλαμβανομένης της περιφέρειας Δυτικής Μακεδονίας με πλούσια αποθέματα λιγνίτη, πρέπει να εγκαταλείψουν σταδιακά τις δραστηριότητες άνθρακα. Ο λιγνίτης, αποτελεί το κυρίαρχο εγχώριο ορυκτό καύσιμο εδώ και περισσότερες από έξι δεκαετίες [3]. Ακόμη και σήμερα, ο λιγνίτης εξακολουθεί να κατέχει πολύ υψηλό μερίδιο στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα αντιπροσωπεύοντας το 45% το 2019 [3,4]. Ωστόσο, η απότομη απολιγνιτοποίηση δίχως εναλλακτικές στρατηγικές για την αποτελεσματική διαφοροποίηση της περιφερειακής οικονομίας θα έχει σοβαρές κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις, όπως αποκάλυψε η πρόσφατη μελέτη του ΔΠΘ [5].

Από την άλλη, η βιομάζα είναι μια φθηνή και ευρέως χρησιμοποιούμενη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας με μηδενικό ανθρακικό αποτύπωμα. Η παραγωγή ενέργειας από βιοκαύσιμα στην ΕΕ, συνέβαλε με 140 Mtoe στην Τελική Ακαθάριστη Κατανάλωση Ενέργειας (GFEC), για το έτος 2020. Για το έτος 2030, η παραγωγή ενέργειας από βιοκαύσιμα εκτιμάται ότι θα μπορούσε να φθάσει σε τιμές μεταξύ 160 και 180 Mtoe, αντιστοιχώντας στο περίπου 15% της GFEC [6]. Το δυναμικό της βιομάζας των χωρών της ΕΕ, για το έτος 2020, αντιστοιχούσε σε 235 Mtoe από τη δασική υλοτομία, 96 Mtoe από τον γεωργικό τομέα και 100 Mtoe από απόβλητα [7]. Ειδικότερα, η Ελλάδα διαθέτει υψηλό δυναμικό βιομάζας (3.5-5 Mtoe), με τα γεωργικά υπολείμματα (π.χ. κλαδέματα ελιάς/αμπέλου, πυρήνας ελιάς) να είναι αυτά που καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο μερίδιο (70%) [8]. Σε ότι αφορά τις εκμεταλλεύσιμες εκτάσεις και συγκεκριμένα τους ελαιώνες, η Κρήτη και η Πελοπόννησος, είναι οι περιφέρειες με τις μεγαλύτερες εκτάσεις. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα της Κρήτης όπου, οι ελαιώνες κατέχουν το 65% του συνόλου της γεωργικής γης (περίπου ίσο με 3.6 km^2). Η καλλιέργεια της ελιάς είναι μία από τις πιο βασικές καλλιέργειες στην Ελλάδα. Επιπλέον, η Ελλάδα κατέχει την τρίτη θέση στην παραγωγή ελιάς/ελαιολάδου ανάμεσα στις Ευρωπαϊκές χώρες (EU-28). Ο ελαιοπυρήνας μαζί με τα κλαδέματα ελιάς καταλαμβάνουν περίπου το 20% του τεχνικά απολήψιμου δυναμικού αγροτικών υπολειμμάτων. Ο ελαιοπυρήνας (πυρηνόξυλο), μετά από κατάλληλη προεργασία και επεξεργασία, μπορεί να αποτελέσει ένα σημαντικό στερεό βιο-καύσιμο για παραγωγή ενέργειας με ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τον Ελλαδικό χώρο. Παράγεται στα ελαιοτριβεία μετά από την επεξεργασία των καρπών της ελιάς για την παραγωγή ελαιόλαδου. Αφού γίνει η παραλαβή του ελαιόλαδου (φυγοκέντριση σε φυγόκεντρους διαχωριστήρες), μεταφέρεται στα πυρηνελαιουργεία για να γίνει η παραλαβή του εναπομείναντος ελαιόλαδου. Στην συνέχεια ο ελαιοπυρήνας μεταφέρεται σε ξηραντήρες ώστε η υγρασία του να μειωθεί σε 8 – 10% (από 48 – 68% αρχική τιμή). Τέλος, κατά την εκχύλιση του ξηρού ελαιοπυρήνα για την παραλαβή του πυρηνέλαιου, προκύπτει ο ξηρός και εκχυλισμένος ελαιοπυρήνας.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως η παραδοσιακή χρήση του λιγνίτη για παραγωγή ενέργειας μέσω θερμικών κύκλων Rankine στους ατμοηλεκτρικούς σταθμούς συνδέεται με διάφορα ζητήματα όπως η χαμηλή θερμική απόδοση και οι υψηλές εκπομπές ρύπων ανά παραγόμενη MWh. Επιπλέον η αξιοποίηση της βιομάζας, ως καύσιμο για παραγωγή ενέργειας, πραγματοποιείται μέσω της καύσης της σε λέβητες, διεργασία η οποία και αυτή με τη σειρά της διέπετε από τους θερμοδυναμικούς περιορισμούς του ιδανικού κύκλου Carnot. Ως εκ τούτου, εναλλακτικές τεχνολογίες αξιοποίησης του λιγνίτη και της βιομάζας, όπως η πυρόλυση και η αεριοποίηση, θεωρούνται μείζονος σημασίας προς την κατεύθυνση μετάβασης σε ένα πιο αποδοτικό και οικονομικά ανταγωνιστικό ενεργειακό μέλλον. Το εξανθράκωμα είναι το στερεό προϊόν της διεργασίας πυρόλυσης, κατά την οποία παράγονται επιπλέον συμπυκνώσιμοι ατμοί (υγρό κλάσμα) και μη συμπυκνώσιμα αέρια [9]. Η πυρόλυση χαμηλής αξίας ανθράκων, παράγει εξανθρακώματα με καλύτερα ποιοτικά χαρακτηριστικά καυσίμου σε σχέση

με τα πρωτογενή καύσιμα. Η αεριοποίηση των στερεών ανθρακικών καυσίμων τυπικά λαμβάνει χώρα στους 700 – 1200 ^{o}C, παράγοντας ένα αέριο μίγμα από H_2, CO, CO_2, CH_4 και ελαφριούς υδρογονάνθρακες, με τη σύσταση του να εξαρτάται από τις συνθήκες λειτουργίας (π.χ. θερμοκρασία, μέσο αεριοποίησης, χρόνος παραμονής, κ.α.) και τις φυσικοχημικές ιδιότητες των καυσίμων τροφοδοσίας.

Βάσει των ανωτέρω, στην παρούσα εργασία εξετάζεται η επίδραση των συνθηκών πυρόλυσης του λιγνίτη και του ελαιοπυρήνα στις φυσικοχημικές ιδιότητες και στην ενεργότητα αεριοποίησης (με χρήση CO_2 ως μέσο αεριοποίησης) των παραγόμενων εξανθρακωμάτων. Τέλος, εξετάστηκε η επίδραση της προσθήκης ενός εύτηκτου μίγματος ανθρακικών αλάτων και στα δύο πρωτογενή καύσιμα για την βελτίωση της απόδοσης αεριοποίησης.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1 Παραγωγή εξανθρακωμάτων

Για την παραγωγή των εξανθρακωμάτων χρησιμοποιήθηκε λιγνίτης (LG) από την περιοχή της Δυτικής Μακεδονίας και ελαιοπυρήνας (OK) από την περιοχή της Κρήτης (Μύλοι Κρήτης). Αρχικά, τα πρωτογενή καύσιμα συνθλίφτηκαν σε σπαστήρα τύπου σιαγόνας σε σωματίδια μεγέθους 1 – 3 mm. Στην συνέχεια μέρος του δείγματος φορτώθηκε σε σωλήνα από ανοξείδωτο χάλυβα (Inconel® με ID = 8.5 cm και L = 68 cm), ο οποίος τοποθετήθηκε σε φούρνο υψηλών θερμοκρασιών (Carbolite GVA 12/300) για τη θερμική επεξεργασία των καυσίμων. Οι θερμοκρασίες κατεργασίας που επιλέχθηκαν ήταν 300 ^{o}C (φρύξη), 500 ^{o}C (ήπια εξανθράκωση) και 800 ^{o}C (εξανθράκωση), ενώ τα αντίστοιχα δείγματα εξανθρακωμάτων για τον λιγνίτη συμβολίζονται ως LG300, LG500 και LG800 και για τον ελαιοπυρήνα ως OK300, OK500 και OK800. Σε κάθε περίπτωση, η θερμική επεξεργασία έλαβε χώρα υπό ροή N_2 (500 cm^3/min) και ρυθμό θέρμανσης 20 ^{o}C/min, ως την τελική θερμοκρασία εξανθράκωσης, η οποία διατηρούνταν σταθερή για 1 h. Στην συνέχεια τα δείγματα ψύχθηκαν με φυσικό τρόπο υπό ροή N_2 (250 cm^3/min). Για τον υπολογισμό της απόδοσης εξανθράκωσης, ζυγιζόταν το στερεό υπόλειμμα καθώς και τα υγρά προϊόντα που προκύπταν από τους συμπυκνώσιμους ατμούς, ενώ η απόδοση προς αέρια προϊόντα υπολογιζόταν από τη διαφορά του αρχικού βάρους του πρωτογενούς καυσίμου και του βάρους των στερεών και υγρών κλασμάτων της εξανθράκωσης.

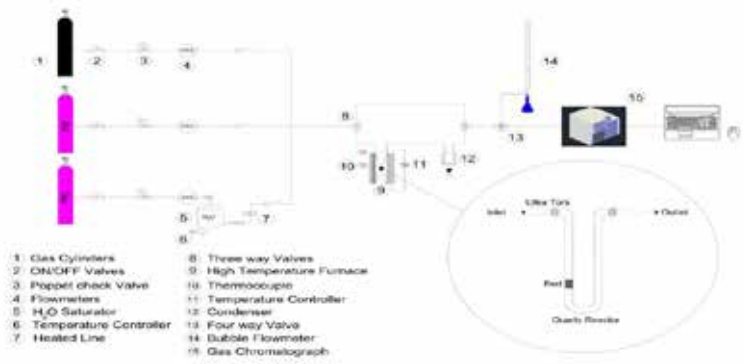
2.2 Φυσικοχημικοί χαρακτηρισμοί

Τόσο τα πρωτογενή καύσιμα όσο και τα παραγόμενα εξανθρακώματα χαρακτηρίστηκαν ως προς τη χημική σύσταση τους (στοιχειακή και προσεγγιστική ανάλυση, XRF) καθώς και τα χαρακτηριστικά υφής και δομής (BET). Πριν από τους χαρακτηρισμούς όλα τα καύσιμα υπέστησαν άλεση για μείωση του μεγέθους των σωματιδίων και κοσκινίστηκαν σε κοκκομετρία 100-200 μm.

2.3 Μελέτη ενεργότητας μιγμάτων καυσίμων τροφοδοσίας

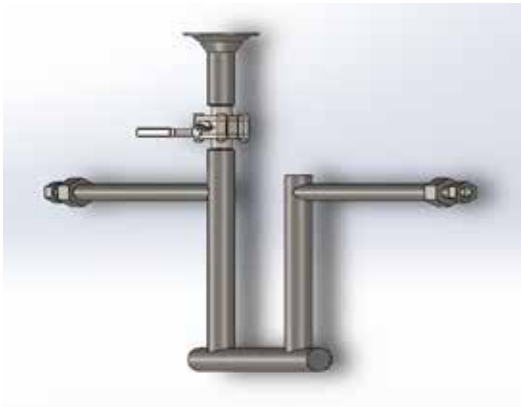
Οι πειραματικές μετρήσεις για την αεριοποίηση των καυσίμων διεξήχθησαν στην διάταξη που απεικονίζεται στην Εικόνα 1. Η απόδοση αεριοποίησης των καυσίμων μελετήθηκε σε πειράματα μεταβαλλόμενης (300 – 900 ^{o}C) και σταθερής (700 και 800 ^{o}C) θερμοκρασίας, χρησιμοποιώντας καθαρό CO_2 (Air Liquide) ως μέσο αεριοποίησης (30 ml/min). Τα πειράματα μεταβαλλόμενης θερμοκρασίας πραγματοποιήθηκαν σε συνθήκες ασυνεχούς λειτουργίας χρησιμοποιώντας ένα αντιδραστήρα σταθερής κλίνης σχήματος U (ID = 0.8 cm) από χαλαζία, ο οποίος φορτωνόταν με 100 mg καυσίμου. Οι μετρήσεις διεξήχθησαν στο θερμοκρασιακό εύρος από 300 – 950 ^{o}C με σταθερό ρυθμό θέρμανσης 2 ^{o}C/min.

Στα πειράματα σταθερής θερμοκρασίας (700 και 800 ^{o}C) ως αντιδραστήρας αεριοποίησης χρησιμοποιήθηκε ένας σωλήνας ανοξείδωτου χάλυβα (INOX) σχήματος U (Εικόνα 2) ίδιων διαστάσεων με τον αντιδραστήρα, ο οποίος ήταν κατασκευασμένος από χαλαζία. Η ποσότητα του καυσίμου που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα αεριοποίησης ήταν 500 mg. Με την επίτευξη της επιθυμητής θερμοκρασίας, το καύσιμο που βρισκόταν στην προσαρμοσμένη στον αντιδραστήρα χοάνη, τροφοδοτούνταν στο αντιδραστήρα και ακαριαία ο σωλήνας τροφοδοτούνταν με την επιθυμητή ροή CO_2. Η συλλογή του παραγόμενου αερίου σύνθεσης γινόταν σε ειδικούς δειγματοληπτικούς σάκους σε διαφορετικούς χρόνους από την έναρξη της αεριοποίησης μέχρι την πλήρη κατανάλωση του καυσίμου. Η ανάλυση των αερίων προϊόντων πραγματοποιήθηκε με χρήση αερίου χρωματογράφου (SHIMADZU 14B).



Εικόνα 1: Σχηματική απεικόνιση πειραματικής διάταξης

Ως καταλύτης χρησιμοποιήθηκε ένα εύτηκτο μίγμα ανθρακικών αλάτων (68 % Li_2CO_3/ 32% K_2CO_3), το οποίο προέκυψε από την ανάμιξη εμπορικών κόνεων Li_2CO_3/K_2CO_3 (Sigma Aldrich) Η επίδραση του καταλύτη στην απόδοση αεριοποίησης των πρωτογενών καυσίμων εξετάστηκε με ανάμειξη 100 mg πρωτογενούς καυσίμου με 20 mg καταλύτη για τα μη-ισοθερμοκρασιακά πειράματα και με ανάμειξη 500 mg πρωτογενούς καυσίμου με 100 mg καταλύτη για τα ισοθερμοκρασιακά πειράματα, αντίστοιχα. Για την προετοιμασία του μίγματος τροφοδοσίας, τα καύσιμα διαλύθηκαν αρχικά σε 250 cm^3 εξανίου (Sigma Aldrich), με χρήση υπερήχων για 20 λεπτά. Στη συνέχεια, προστέθηκε το μίγμα των ανθρακικών αλάτων και το διάλυμα που προέκυψε αναδεύτηκε σε πλάκα θέρμανσης στους 65 °C επί 3 ώρες έως ότου εξατμιστεί το εξάνιο.



Εικόνα 2: Εδικά σχεδιασμένος INOX αντιδραστήρας για τα ισοθερμοκρασιακά πειράματα αεριοποίησης

Ο προσδιορισμός της παραγωγής του CO (mol) και της μετατροπής του στερεού άνθρακα σε CO υπολογίστηκε με βάση τις παρακάτω εξισώσεις:

$$Y_{CO}(mol) = \int_0^{t_f} \frac{F_t \cdot y_{CO}}{V_M \cdot 100} \cdot dt \qquad (1)$$

$$X_c = \frac{\sum_0^t Y_{CO} \cdot 12}{2 \cdot m \cdot w_c} \qquad (2)$$

όπου y_{co} είναι το μοριακό κλάσμα του CO (%), V_M είναι ο γραμμομοριακός όγκος (lt/mol) στους 25 ^oC και 1 ατμόσφαιρα, 12 είναι το μοριακό βάρος του άνθρακα (g/mol), m είναι η μάζα του καυσίμου και Wc το ποσοστό του άνθρακα από την στοιχειακή ανάλυση.

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

3.1 Φυσικοχημικοί χαρακτηρισμοί καυσίμων

3.1.1 Λιγνίτης

Η στοιχειακή και προσεγγιστική ανάλυση τόσο του πρωτογενής λιγνίτη όσο και των παραγόμενων εξανθρακωμάτων απεικονίζεται στον Πίνακα 1. Παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η θερμοκρασία επεξεργασίας, το οξυγόνο και το περιεχόμενο σε πτητική ύλη μειώνονται ενώ ο σταθερός άνθρακας και το περιεχόμενο σε τέφρα αυξάνονται.

Πίνακας 1: Στοιχειακή και προσεγγιστική ανάλυση λιγνίτη και παραγόμενων εξανθρακωμάτων

	Στοιχειακή ανάλυση (κ.β.%)					**Προσεγγιστική ανάλυση (κ.β.%)**			
	C	**H**	**N**	**O**	**S**	**Υγρασία**	**Τέφρα (ξ.β)**	**Πτητική ύλη (ξ.β)**	**Σταθερός άνθρακας (ξ.β)**
LG	36.22	2.94	1.05	18.63	0.97	7.67	40.18	41.85	17.96
LG300	36.32	2.75	1.05	16.93	0.92	3.36	42.03	38.84	19.12
LG500	35.26	1.75	0.99	12.53	0.68	2.82	48.79	29.31	21.89
LG800	34.01	1.01	0.73	0.37	0.90	0.91	62.97	11.79	25.23

Στον πίνακα 2, συνοψίζεται η κατά βάρος συγκέντρωση των κυριότερων οξειδίων της τέφρας. Σε όλες τις περιπτώσεις, τα κύρια συστατικά της τέφρας είναι SiO_2, CaO και Al_2O_3, ακολουθούμενα από μικρότερες ποσότητες Fe_2O_3, SO_3, MgO και Na_2O, ενώ παρατηρήθηκαν επίσης πολύ μικρές ποσότητες K_2O, TiO_2, P_2O_5 και Cl. Η υψηλή περιεκτικότητα σε ασβέστιο είναι σύμφωνη με τα ασβεστολιθικά εδάφη που επικρατούν στην περιοχή της Δυτικής Μακεδονίας.

Πίνακας 2: Σύσταση τέφρας λιγνίτη και παραγόμενων εξανθρακωμάτων

	Na_2O	**MgO**	**Al_2O_3**	**SiO_2**	**P_2O_5**	**Cl**	**SO_3**	**K_2O**	**CaO**	**Fe_2O_3**	**TiO_2**
LG	2.16	5.11	14.79	34.19	0.38	0.02	5.86	0.96	30.21	5.19	0.8
LG300	2.18	5.15	14.76	34.33	0.39	0.02	5.68	0.97	30.23	5.15	0.82
LG500	1.61	5.04	14.96	34.84	0.41	0.02	3.7	0.99	31.77	5.48	0.83
LG800	1.58	5.33	14.51	33.74	0.4	0.02	5.09	1	31.73	5.45	0.83

Ο Πίνακας 3 απεικονίζει τις κύριες ιδιότητες υφής και δομής τόσο του πρωτογενούς λιγνίτη όσο και των θερμικά επεξεργασμένων δειγμάτων, όσον αφορά την ειδική επιφάνεια BET, τον όγκο πόρων (V_p) και τη μέση διάμετρο πόρων (d_{av}). Η ειδική επιφάνεια αυξάνεται κατά την αύξηση της θερμοκρασίας θερμικής επεξεργασίας. Πιο συγκεκριμένα, ο LG παρουσιάζει επιφάνεια BET ίση με 7.1 m^2/gr, ενώ οι οι LG500 και LG800 παρουσίασαν τιμές ίσες με 19.5 και 190.6 m^2/gr, αντίστοιχα. Παρόμοια συμπεριφορά εμφανίζει και ο όγκος των πόρων, σε αντίθεση με την μέση διάμετρο των πόρων που παρουσιάζει μονότονη πτώση με την αύξηση της θερμικής επεξεργασίας.

Πίνακας 3: Χαρακτηριστηκά μορφολογίας και δομής λιγνίτη και παραγόμενων εξανθρακωμάτων

	BET(m^2/g)	Όγκος Πόρων (cm^3/g)	Διάμετρος Πόρων (nm)
LG	7.17	0.034	11.3
LG300	4.5	0.036	17.5
LG500	19.5	0.055	8.4
LG800	190.6	0.12	3.4

3.1.2 Ελαιοπυρήνας

Η στοιχειακή και προσεγγιστική ανάλυση του πρωτογενούς ελαιοπυρήνα και των παραγόμενων εξανθρακωμάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 4. Με την άυξηση της θερμοκρασίας της θερμικής επεξεργασίας στους 800 ºC, ο άνθρακας και ο σταθερός άνθρακας αυξήθηκαν από 50.2 σε 86.5 %κ.β. και από 13.9 σε 79.7 %κ.β., αντίστοιχα, ενώ το Η και Ο μειώθηκε από 5.9 σε 0.8 %κ.β. και από 40.2 σε 4.1 %κ.β., αντίστοιχα. Το περιεχόμενο της πτητικής ύλης μειώνεται σημαντικά με την αύξηση της θερμοκρασίας πυρόλυσης, οδηγώντας σε εξανθρακώματα, τα οποία αποτελούνται κυρώς από σταθερό άνθρακα.

Πίνακας 4: Στοιχειακή και προσεγγιστική ανάλυση ελαιοπυρήνα και παραγόμενων βιο-εξανθρακωμάτων

	Στοιχειακή ανάλυση (κ.β.%)					**Προσεγγιστική ανάλυση (κ.β.%)**			
	C	**H**	**N**	**O**	**S**	**Υγρασία**	**Τέφρα**	**Πτητική ύλη**	**Σταθερός άνθρακας**
OK	50.2	5.9	0.7	40.2	0.02	7.4	2.9	75.8	13.9
OK300	63.4	5.2	1.0	26.5	0.1	4.0	3.9	54.3	37.8
OK500	81.9	2.9	0.8	8.0	0.0	4.5	6.4	15.0	74.1
OK800	86.5	0.8	0.8	4.1	0.1	6.4	7.8	6.1	79.7

Στον πίνακα 5 παρουσιάζεται η κατά βάρος συγκέντρωση των κυριότερων οξειδίων της τέφρας. Όλα τα δείγματα αποτελούνται κυρίως από K_2O, CaO και Na_2O, ενώ σημαντικά χαμηλότερες είναι οι ποσότητες των SO_3, P_2O_5, SiO_2, MgO, Fe_2O_3 και TiO_2.

Πίνακας 5: Σύσταση τέφρας ελαιοπυρήνα και παραγόμενων βιο-εξανθρακωμάτων

	Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	Cl	SO_3	K_2O	CaO	Fe_2O_3	TiO_2
OK	16.79	0.64	0.09	1.42	3.88	7.27	4.51	46.91	17.58	0.394	0.02
OK300	14.41	2	0.09	1.26	4.46	6.52	2.74	52.48	14.84	0.283	0.02
OK500	12.53	2.24	0.06	1.49	4.3	3.26	1.31	57.92	16.36	0.43	0.04
OK800	13.25	2.37	0.04	1.38	4.35	3.71	1.45	53.61	18.46	0.897	0.07

Στον Πίνακα 6 παρουσιάζονται οι κύριες ιδιότητες υφής και δομής τόσο του πρωτογενούς λιγνίτη και των θερμικά επεξεργασμένων δειγμάτων, όσον αφορά την ειδική επιφάνεια BET, τον όγκο πόρων (V_p) και το πορώδες (%). Καθώς η θερμοκρασία της θερμικής επεξεργασίας αυξάνεται, το πορώδες και ο όγκο των πόρων (V_p) σταδιακά αυξάνονται. Η χαμηλή ειδική επιφάνεια (BET) που παρατηρείται σε όλα τα καύσιμα μπορεί να αποδοθεί σε φαινόμενα όπως η διάχυση, η τήξη και η ανθρακοποίηση που μπλοκάρουν τους μικροπόρους (π.χ. πόρους <2 nm), οι οποίοι συμβάλλουν στην διαμόρφωση της επιφάνειας BET.

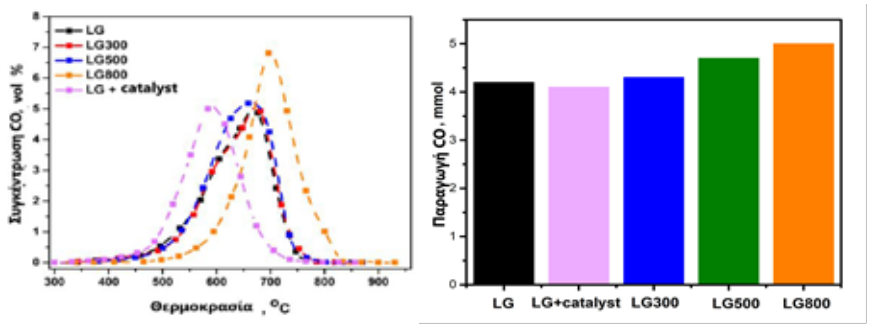
Πίνακας 6: Χαρακτηριστηκά μορφολογίας και δομής ελαιοπυρήνα και παραγόμενων βιο-εξανθρακωμάτων

	BET(m^2/g)	Όγκος Πόρων (cm^3/g)	Πορώδες (%)
OK	<3	0.09	11
OK300	<3	0.14	14
OK500	<3	0.70	52
OK800	<3	1.00	56

3.2 Αποτελέσμα πειραμάτων αεριοποίησης

3.2.1 Μη-ισοθερμοκρασιακά πειράματα αεριοποίησης

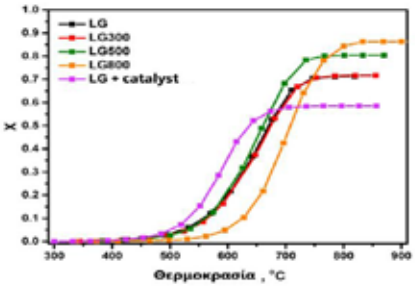
Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τα μη ισοθερμοκρασιακά πειράματα αεριοποίησης για τα δύο καύσιμα και τα παραγόμενα εξανθρακώματα τους. Στην περίπτωση του λιγνίτη, στην Εικόνα 3 παρουσιάζεται η μετατροπή του CO_2 και η ποσοστιαία % συγκέντρωση του κύριου παραγόμενου αέριου προϊόντος, CO, ως προς την θερμοκρασία κατά την διεργασία αεριοποίησης των δειγμάτων με CO_2. Σε όλες τις περιπτώσεις, το CO ήταν το κυριότερο παραγόμενο προϊόν, με την παραγωγή του να ξεκινάει μετά τους 500 ^oC λόγω της αντίστροφης αντίδρασης Boudouard ($C + CO_2 \rightarrow 2CO$). Η απόδοση της αεριοποίησης αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας της θερμικής επεξεργασίας με αποτέλεσμα την εξής σειρά δραστικότητας: LG800 > LG500 > LG300 > LG. Έκτος από το CO, παρατηρήθηκε σε χαμηλές θερμοκρασίες μικρή παραγωγή H_2 και CH_4, η οποία αποδίδεται στην έκλυση της υφιστάμενης πτητικής ύλης και στις αντιδράσεις της αέριας φάσης. Το μεθάνιο μειώνεται με την θερμική επεξεργασία των δειγμάτων γεγονός που συμφωνεί και με τη μείωση του περιεχομένου της πτητικής ύλης, όπως απεικονίζεται στον Πίνακα 1.



Εικόνα 3: Παραγωγή CO κατά την αεριοποίηση λιγνίτη και παραγόμενων εξανθρακωμάτων με καθαρό CO_2, 30 ml/min

Στην Εικόνα 4 απεικονίζεται η μετατροπή του άνθρακα ως προς την θερμοκρασία. Η μετατροπή του σταθερού άνθρακα ακολουθεί ένα σιγμοειδές προφίλ. Σε θερμοκρασίες χαμηλότερες των 650 ^oC, η μετατροπή του άνθρακα αντιστοιχεί στις αντιδράσεις αποδέσμευσης της πτητικής ύλης και της θερμικής διάσπασης ελαφριών και βαρέων υδρογονανθράκων, με τη σειρά δραστικότητας να είναι, η LG ≥ LG300 > LG500 > LG800. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες, όπου ευνοούνται οι αντιδράσεις αεριοποίησης, προκύπτουν σημαντικές διαφοροποιήσεις. Ειδικότερα, η μετατροπή του άνθρακα για τον LG και τον LG300 επιβραδύνεται από τους 650 έως τους 850 ^oC, φτάνοντας στη μέγιστη μετατροπή στους 850 ^oC (70%). Ο LG500 ακολουθεί μια παράλληλη τάση, παρουσιάζοντας ωστόσο ελαφρώς υψηλότερες τιμές μετατροπής άνθρακα στην περιοχή θερμοκρασίας 650 – 850 ^oC (80 %). Ο LG800 παρουσιάζει μια πιο έντονη αύξηση της μετατροπής του άνθρακα, υπερβαίνοντας εκείνη των άλλων εξανθρακωμάτων σε θερμοκρασίες υψηλότερες από περίπου 800 ^oC, φθάνοντας σε συνολική μετατροπή του άνθρακα ίση με 90% στους 900 ^oC, υποδηλώνοντας την ευεργετική επίδραση της θερμικής επεξεργασίας στη μετατροπή άνθρακα. Η συνολική παραγωγή CO (Εικόνα 3) ευνοήθηκε και

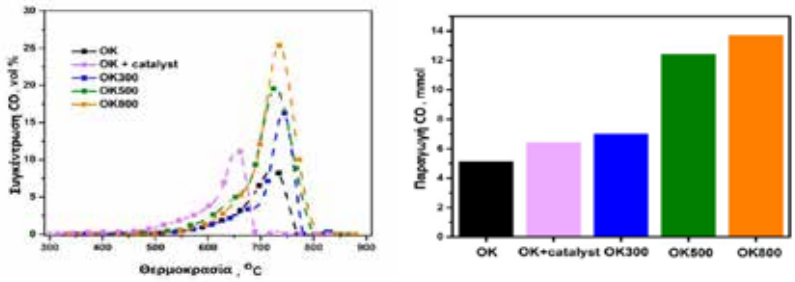
αυτή με την σειρά της παρουσιάζοντας μία αύξηση της τάξης του 25% από το πρωτογενές (4.2 mmol) στο παραγόμενο εξανθράκωμα στους 800 ºC(5 mmol).



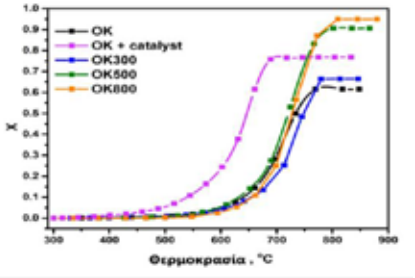
Εικόνα 4: Μετατροπή στερεού άνθρακα προς παραγόμενο CO

Η θετική επίδραση της θερμικής επεξεργασίας αποδίδεται στις βελτιωμένες ιδιότητες υφής τους (υψηλότερο πορώδες και επιφάνεια BET), την υψηλότερη περιεκτικότητα σε σταθερό άνθρακα και χαμηλότερη περιεκτικότητα σε πτητική ύλη σε σύγκριση με τα πρωτογενή δείγματα. Η προσθήκη καταλύτη στον πρωτογενή λιγνίτη οδήγησε στην μεγιστοποίηση της συγκέντρωσης του παραγόμενου CO σε χαμηλές θερμοκρασίες (550 ºC) ευνοώντας παράλληλα και την μετατροπή του άνθρακα. Η συμπεριφορά αυτή αποδίδεται στο γεγονός ότι η προσθήκη ανθρακικών αλάτων μπορεί να προωθήσει περαιτέρω την αντίστροφη αντίδραση Boudouard, μέσω του πλεονάσματος CO_2 που προκύπτει από τη θερμική διάσπαση των ανθρακικών αλάτων, που στη συνέχεια αντιδρά με τον άνθρακα [10].

Τα αντίστοιχα διαγράμματα για τον ελαιοπυρήνα και τα παραγόμενα βιο-εξανθρακώματα παρουσιάζονται στις εικόνες 5 και 6. Το CO ήταν και πάλι το κυριότερο παραγόμενο προϊόν ακολουθούμενο από μικρότερες ποσότητες H_2 και CH_4, με την απόδοση της αντίδρασης της αεριοποίησης να αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας της θερμικής επεξεργασίας και να έχει την ίδια σειρά δραστικότητας με τον λιγνίτη: OK800 > OK500 > OK300 > OK.



Εικόνα 5: Παραγωγή CO κατά την αεριοποίηση ελαιοπυρήνα και παραγόμενων βιο-εξανθρακωμάτων με καθαρό CO_2, 30 ml/min



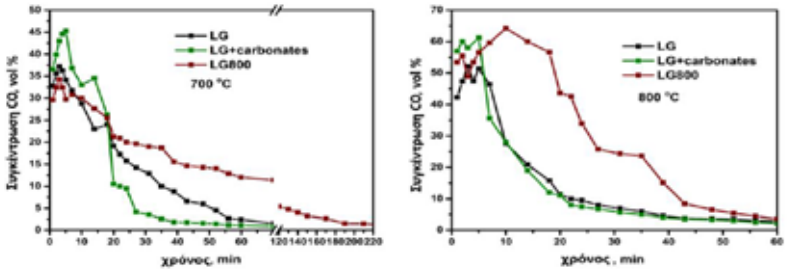
Εικόνα 6: Μετατροπή στερεού άνθρακα προς παραγόμενο CO

Η μετατροπή του άνθρακα σε CO είχε και σε αυτή την περίπτωση σιγμοειδή μορφή με τη διαφορά όμως ότι τα εξανθρακώματα παρουσίασαν σχεδόν ίδια μετατροπή μέχρι τους 700 ºC, ενώ στις θερμοκρασίες όπου ευνοούνται οι αντιδράσεις αεριοποίησης, τα εξανθρακώματα OK500 και OK800 παρουσίασαν αισθητή αύξηση της μετατροπής. Η μετατροπή του στερεού άνθρακα ήταν 60, 65, 90 και 95% για OK, OK300, OK500, OK800, αντίστοιχα. Η συνολική παραγωγή CO ευνοήθηκε με την αύξηση της θερμοκρασίας της θερμικής επεξεργασίας από 5.2 mmol στον OK σε 13.8 mmol στον OK800, παρουσιάζοντας μία αύξηση της τάξης του 160%.

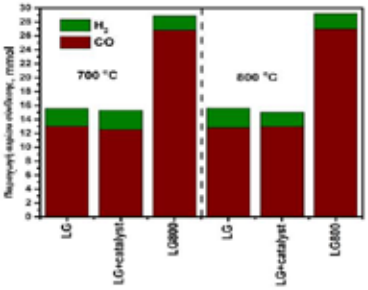
Η προσθήκη καταλύτη στον πρωτογενή ελαιοπυρήνα οδήγησε στη μεγιστοποίηση της συγκέντρωσης του CO σε χαμηλότερη θερμοκρασία, στην αύξηση της μετατροπής του άνθρακα σε όλο το θερμοκρασιακό εύρος και στην αύξηση της παραγωγής του CO κατά 20%.

3.2.2 Ισοθερμοκρασιακά πειράματα αεριοποίησης

Τα καύσιμα τα οποία επιλέχθηκαν για την μελέτη της ενεργότητας αεριοποίησης τους σε ισοθερμοκρασιακή λειτουργία απουσία και παρουσία μίγματος ανθρακικών αλάτων ως καταλύτη ήταν τα πρωτογενή καύσιμα (LG και OK) καθώς και τα βέλτιστα παραγόμενα εξανθρακώματα τους (LG800 και OK500). Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται η συγκέντρωση του CO στους 700 και 800 ºC και η συνολική παραγωγή αερίου σύνθεσης τόσο για τον καύσιμα του λιγνίτη (Εικόνες 7, 8) όσο και για τα δείγματα του ελαιοπυρήνα (Εικόνες 9, 10) .

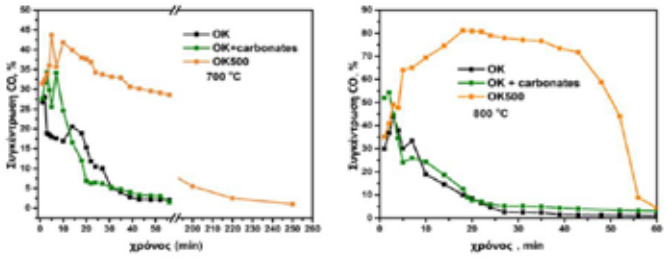


Εικόνα 7: Συγκέντρωση CO κατά την αεριοποίηση λιγνίτη και των εξανθρακωμάτων με καθαρό CO_2 στους 700 και 800 ºC

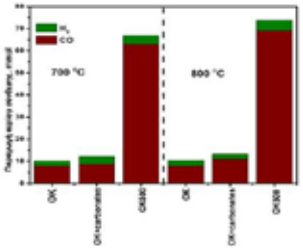


Εικόνα 8: Συνολική παραγωγή αερίου σύνθεσης κατά την αεριοποίηση λιγνίτη και εξανθρακώματος LG800 με καθαρό CO_2 στους 700 και 800 ºC

Τα ισοθερμοκρασιακά πειράματα και των δύο καυσίμων έδειξαν ότι, και σε αυτή την περίπτωση, τόσο η θερμική επεξεργασία όσο και η προσθήκη καταλύτη υπήρξαν ευεργετικές για την συνολική απόδοση της αντίδρασης της αεριοποίησης. Στα πρώτα λεπτά της διεργασίας η παραγωγή του αερίου σύνθεσης (CO και H_2) αποδίδεται στην απελευθέρωση της πτητικής ύλης αλλά και την θερμική διάσπαση της πίσσας. Ο αρχικός χρόνος αποπτηκοποίησης και διάσπασης των πισσών έδειξε να εξαρτάται τόσο από τη θερμοκρασία της θερμικής επεξεργασίας όσο και από τη θερμοκρασία της αεριοποίησης. Η συνολική παραγωγή του αερίου σύνθεσης, ήταν 14 mmol για τον LG και 29 mmol για τον LG800 (αύξηση 100%). Στην περίπτωση του OK η παραγωγή αυξήθηκε από τα 10 mmol (OK) στα περίπου 65 mmol τόσο στους 700 ºC όσο και στους 800 ºC (αύξηση 650%). Η προσθήκη καταλύτη ευνόησε την παραγωγή του CO και στα δύο στάδια της διεργασίας, γεγονός που αποδίδεται στην ευεργετική επίδραση της περίσσειας CO_2 που προέρχεται από τη διάσπαση του ανθρακικού άλατος, τόσο στην θερμική διάσπαση της πίσσας όσο και στην αντίστροφη αντίδραση Boudouard [10].



Εικόνα 9: Συγκέντρωση CO κατά την αεριοποίηση ελαιοπυρήνα και εξανθρακώματος OK500 με καθαρό CO_2 στους 700 και 800 °C



Εικόνα 10: Συνολική παραγωγή αερίου σύνθεσης κατά την αεριοποίηση ελαιοπυρήνα και εξανθρακώματος OK500 με καθαρό CO_2 στους 700 και 800 °C

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία εξετάστηκε η επίδραση της θερμικής επεξεργασίας λιγνίτη και ελαιοπυρήνα στις φυσικοχημικές ιδιότητες και στην κατανομή των προϊόντων της διεργασίας αεριοποίησης των παραγόμενων εξανθρακωμάτων με χρήση CO_2 ως μέσο αεριοποίησης. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν τόσο σε συνθήκες σταθερής όσο και μεταβαλλόμενης θερμοκρασίας. Σε όλες τις περιπτώσεις το κύριο προϊόν ήταν το CO, του οποίου η παραγωγή, στην περίπτωση των μη ισοθερμοκρασιακών πειραμάτων, ξεκινάει στους ~500 °C και αυξάνεται σημαντικά μετά τους 700 °C. Ως δευτερεύοντα προϊόντα παρατηρήθηκαν H_2 και CH_4 σε πολύ μικρότερες ποσότητες, τα οποία εκλύονται σε χαμηλές θερμοκρασίες λόγω κυρίως της έκλυσης της υφιστάμενης πτητικής ύλης και των αντιδράσεων στην αέρια φάση. Η σειρά δραστικότητας και για τα δύο καύσιμα αυξανόταν ως προς την παραγωγή CO, ήταν: LG,OK800 > LG,OK500 > LG,OK300 > LG,OK. Στα ισοθερμοκρασιακά πειράματα αεριοποίησης, το παραγόμενο αέριο μίγμα αποτελείται κυρίως από από CO και μικρότερες ποσότητες H_2, η παραγωγή του οποίου παρατηρήθηκε στα πρώτα λεπτά της διεργασιίας όπου λαμβάνει χώρα η θερμική αποδόμηση της πτητικής ύλης σε συνδυασμό με αντιδράσεις θερμικής διάσπασης της πίσσας. Και σε αυτή την περίπτωση τα εξανθρακώματα έδειξαν ενισχυμένη απόδοση ως προς την παραγωγή αερίου σύνθεσης. Η βελτιωμένη απόδοση των εξανθρακωμάτων και των δύο καυσίμων οφείλεται στο γεγονός ότι η θερμική επεξεργασία, τόσο σε ενδιάμεσες όσο και υψηλότερες θερμοκρασίες, οδηγεί σε εξανθρακώματα με βελτιωμένες ιδιότητες υφής και δομής (υψηλότερο πορώδες και επιφάνεια BET), υψηλότερη περιεκτικότητα σε σταθερό άνθρακα και χαμηλότερη περιεκτικότητα σε πτητική ύλη σε σύγκριση με τα πρωτογενή δείγματα. Τέλος, η προθήκη ενός εύτηκτου μίγματος ανθρακικών αλάτων οδήγησε τόσο στην αύξηση της μετατροπής του σταθερού άνθρακα σε χαμηλότερες θερμοκρασίες όσο και στην αύξηση της παραγωγής του αερίου σύνθεσης.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία υλοποιήθηκε στο πλαίσιο της Δράσης ΕΡΕΥΝΩ – ΔΗΜΙΟΥΡΓΩ – ΚΑΙΝΟΤΟΜΩ και συγχρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση και εθνικούς πόρους μέσω του Ε.Π. Ανταγωνιστικότητα, Επιχειρηματικότητα & Καινοτομία (ΕΠΑνΕΚ) (κωδικός έργου: Τ1ΕΔΚ-01894).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Prime J. IEA, Coal information overview and statistical report 2019.

[2] Looney B. Statistical Review of World Energy, 2020 | 69th Edition. Bp 2020;69:66..

[3] International Energy Agency. Greece 2017 Review. Energy Policies IEA Ctries 2017.

[4] Avagianos I, Violidakis I, Karampinis E, Rakopoulos D, Nanos E, Polonidis N, et al., 2019, “Thermal Simulation and Economic Study of Predried Lignite Production Retrofit of a Greek Power Plant for Enhanced Flexibility”, J Energy Eng,145:04019001.

[5] Karasmanaki E, Ioannou K, Katsaounis K, Tsantopoulos G., 2020, “The attitude of the local community towards investments in lignite before transitioning to the post-lignite era: The case of Western Macedonia, Greece,” Resour Policy, 68:101781.

[6] Schöpe M. Renewable energy directive. Eur Wind Energy Conf Exhib 2008 2008, 1:32–8.

[7] Scarlat N, Fahl F, Lugato E, Monforti-Ferrario F, Dallemand JF., 2019, “Integrated and spatially explicit assessment of sustainable crop residues potential in Europe.”, Biomass and Bioenergy, 122:257–69

[8] Alatzas S, Moustakas K, Malamis D, Vakalis S., 2019 “Biomass potential from agricultural waste for energetic utilization in Greece.”, Energies, 12.

[9] Lampropoulos A, Kaklidis N, Athanasiou C, Montes-Morán MA, Arenillas A, Menéndez JA, et al., 2020, “Effect of Olive Kernel thermal treatment (torrefaction vs. slow pyrolysis) on the physicochemical characteristics and the CO_2 or H_2O gasification performance of as-prepared biochars. ”, Int J Hydrogen Energy.

[10] N. Kaklidis, R. Strandbakke, A. Arenillas, J.A. Menendez , M. Konsolakis, G.E. Marnellos, 2019, “The synergistic catalyst-carbonates effect on the direct bituminous coal fuel cell performance.”, Int J Hydrogen Energy., 44, 10033-10042

ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΗ ΑΝΑΓΩΓΗ ΤΗΣ ΓΛΥΚΕΡΟΛΗΣ ΣΕ ΠΡΟΪΟΝΤΑ ΥΨΗΛΗΣ ΠΡΟΣΤΙΘΕΜΕΝΗΣ ΑΞΙΑΣ

Αγορίτσα Σχιζοδήμου*, Γιώργος Κυριάκου

Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, ΑΠΘ
e-mail: aschizod@cheng.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Μέχρι σήμερα οι ηλεκτροχημικές διεργασίες χρησιμοποιούνταν για προϊόντα υψηλής αξίας (συνήθως πάνω από 1 €/Kg) εξαιτίας του γεγονότος ότι χρειάζονταν μετασχηματιστές και ανορθωτές για την παραγωγή του συνεχούς ρεύματος. Τα φωτοβολταϊκά παράγουν απευθείας συνεχές ρεύμα που μπορεί να τροφοδοτήσει άμεσα την εγκατάσταση με αποτέλεσμα τη σημαντική ελάττωση του κόστους.

Το βιοντίζελ, ένα από τα κύρια βιοκαύσιμα, παράγεται με μετεστεροποίηση φυτικών ελαίων (όπως ελαιοκράμβης, ηλίανθου, φοίνικα και σόγιας) με μεθανόλη σε όξινο περιβάλλον. Κατά τη διαδικασία αυτή παράγεται ως παραπροϊόν 1 kg γλυκερόλης ανά 10 kg βιοντίζελ. Η ποσότητα της γλυκερόλης που εισέρχεται στην αγορά ετησίως ξεπερνά τα δύο εκατομμύρια τόνους με αποτέλεσμα τη μείωση της εμπορικής τιμής της. Για το λόγο αυτό η μετατροπή της προς υψηλότερης προστιθέμενης αξίας προϊόντα, όπως για παράδειγμα η 1,2 προπανοδιόλη και η 1,3 προπανοδιόλη, έχει μεγάλο οικονομικό ενδιαφέρον.

Μέχρι σήμερα έγιναν προσπάθειες αναγωγής της γλυκερίνης κυρίως με καταλυτικές μεθόδους. Οι καταλυτικές διεργασίες απαιτούν υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες (μεταξύ 200 και 250 °C) με αποτέλεσμα την αύξηση του λειτουργικού κόστους των μονάδων. Για την αντιμετώπιση αυτών των μειονεκτημάτων έχει προταθεί η ηλεκτροχημική μέθοδος ως εναλλακτική προσέγγιση. Το κύριο πλεονέκτημα της ηλεκτρόλυσης είναι ότι μπορεί να πραγματοποιηθεί σε συνθήκες περιβάλλοντος και καταναλώνει λιγότερη ενέργεια σε σύγκριση με τις χημικές μεθόδους.

Στην παρούσα εργασία έγιναν ηλεκτρολυτικά πειράματα αναγωγής της γλυκερόλης σε μεταλλικά ηλεκτρόδια χαμηλής (Pt, Ru), μέσης (Au, Cu) και υψηλής υπέρτασης (Sn) ως προς την έκλυση του υδρογόνου. Μελετήθηκε η επίδραση του δυναμικού, η φύση του ηλεκτροδίου εργασίας και η συγκέντρωση της γλυκερόλης. Τα κύρια προϊόντα της αναγωγής ήταν η 1,3-προπανοδιόλη, η 1,2-προπανοδιόλη και η υδροξυακετόνη ενώ ανιχνεύτηκαν και μικρότερες ποσότητες αιθυλενογλυκόλης, προπανόλης-1, προπανόλης-2 και προπανίου. Η μέγιστη % εκλεκτικότητα σε 1,3-προπανοδιόλη (90%) βρέθηκε στο ηλεκτρόδιο του λευκόχρυσου (Pt) με αντίστοιχα υψηλή % μετατροπή της γλυκερόλης (81,5%) και η ελάχιστη σε Sn. Η υψηλότερη εκλεκτικότητα προς 1,2-προπανοδιόλη ήταν 21% σε ηλεκτρόδιο Au και της υδροξυακετόνης 5,6% σε κάθοδο Pt.

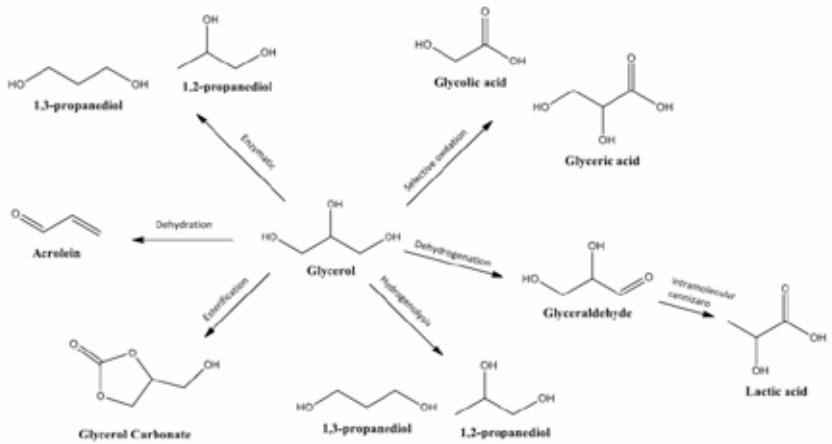
Λέξεις Κλειδιά: βιο-γλυκερόλη, ηλεκτροχημική μετατροπή, προπανοδιόλες

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια έχει αυξηθεί σημαντικά η χρήση βιομάζας για την παραγωγή βιοκαυσίμων. Ένα από τα κύρια βιοκαύσιμα είναι το βιοντίζελ. Η παραγωγή βιοντίζελ έχει σημειώσει ιδιαίτερη ανάπτυξη στην Ευρωπαϊκή Ένωση, που είναι και ο μεγαλύτερος παραγωγός παγκοσμίως. Το βιοντίζελ παράγεται με μετεστεροποίηση φυτικών ελαίων (όπως ελαιοκράμβης, ηλίανθου, φοίνικα και σόγιας) με μεθανόλη σε όξινο περιβάλλον. Κατά τη διαδικασία αυτή παράγεται ως παραπροϊόν 1 kg γλυκερόλης ανά 10 kg βιοντίζελ. Βιομηχανικά η γλυκερόλη παρασκευάζεται ως ακατέργαστο υποπροϊόν της σαπωνοποίησης (υδρόλυσης εστέρων ανώτερων λιπαρών οξέων σε βασικό περιβάλλον).

Η γλυκερόλη χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία φαρμάκων, καλλυντικών και τροφίμων. Ωστόσο, η παραγόμενη γλυκερόλη υπερβαίνει τις ποσότητες που χρειάζονται οι βιομηχανίες αυτές, εφόσον η ποσότητα της που εισέρχεται στην αγορά ετησίως ξεπερνά τα δύο εκατομμύρια τόνους [1]. Η υπερπροσφορά της γλυκερόλης έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της εμπορικής τιμής της. Σήμερα, η τιμή της καθαρής γλυκερόλης (καθαρότητας >98,0% w/w) είναι της τάξης των 0,50-0,70 $/kg, ενώ η τιμή της ακάθαρτης γλυκερόλης (65-80% w/w) είναι κατά πολύ μικρότερη [2].

Επομένως, είναι απαραίτητο να βρεθούν εναλλακτικές χρήσεις για τη γλυκερόλη. Για το λόγο αυτό γίνονται προσπάθειες με διάφορες μεθόδους για τη χρήση της γλυκερόλης ως πρώτης ύλης για την παρασκευή χημικών ενώσεων υψηλής προστιθέμενης αξίας όπως προπανοδιόλες (1,2-προπανοδιόλη και 1,3-προπανοδιόλη, κιτρικό οξύ, γαλακτικό οξύ, υδρογόνο, αιθανόλη κλπ. [3], όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.



Εικόνα 1: Προϊόντα που προέρχονται από την γλυκερόλη [3]

Οι προπανοδιόλες (1,2-προπανοδιόλη και 1,3-προπανοδιόλη) έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, λόγω των υψηλών εμπορικών τους τιμών. Η 1,2-προπανοδιόλη (1,2-PD) ή προπυλενογλυκόλη χρησιμοποιείται ευρέως για την παραγωγή ακόρεστων πολυεστερικών ρητινών, πολυμερών, αντιψυκτικών, καλλυντικών και τροφίμων [4]. Επίσης, είναι το κύριο συστατικό στο υγρό που χρησιμοποιείται στα ηλεκτρονικά τσιγάρα. Οι κορυφαίοι καταναλωτές της 1,2-προπανοδιόλης είναι η Βόρεια Αμερική, η Κίνα και η Γερμανία, λόγω της αυξανόμενης ζήτησης για ακόρεστες πολυεστερικές ρητίνες στις χώρες αυτές. Η τιμή της 1,2-προπανοδιόλης σήμερα φτάνει τα 1350-1450 US $/t [5]. Η 1,2-προπανοδιόλη παράγεται βιομηχανικά από προπυλενοξείδιο και από τη γλυκερόλη μέσω καταλυτικής υδρογονόλυσης ή μέσω της ενζυματικής οδού [6]. Η 1,3-προπανοδιόλη (1,3-PD) είναι ένα σημαντικό χημικό ενδιάμεσο στην παρασκευή πολυαιθέρων, πολυουρεθανών, πολυεστέρων και ετεροκυκλικών ενώσεων. Χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία τροφίμων, καλλυντικών και φαρμακευτικών ουσιών [7]. Η κυριότερη χρήση της 1,3-προπανοδιόλης είναι η παραγωγή τερεφθαλικούπολυτριμεθυλενίου (PTT) το οποίο χρησιμοποιείται για την κατασκευή ινών για χαλιά [8]. Η ταχεία αύξηση της παραγωγής 1,3-προπανοδιόλης παγκοσμίως σχετίζεται με την αυξανόμενη ζήτηση της PTT στην αγορά. Η τιμή

της σήμερα κυμαίνεται στα 900-1100 US $/t [9]. Η 1,3-προπανοδιόλη παράγεται εμπορικά με ενυδάτωση ακρολεΐνης, με υδροφορμυλίωση του αιθυλενοξειδίου ή με ενζυματική μετατροπή της γλυκερόλης. Μπορεί να παραχθεί επίσης από τη γλυκερόλη καταλυτικά με επιλεκτική αποξυγόνωση ή υδρογονόλυση [10].

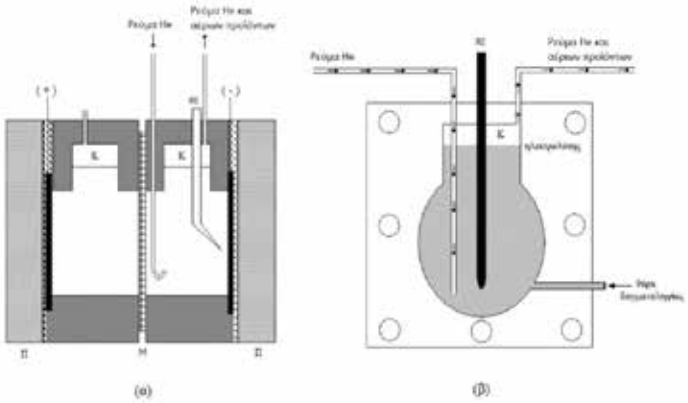
Μέχρι σήμερα έγιναν προσπάθειες αναγωγής της γλυκερίνης, προς προπανοδιόλες και άλλα υψηλότερης προστιθέμενης αξίας προϊόντα, κυρίως με καταλυτικές μεθόδους. Οι καταλυτικές διεργασίες απαιτούν υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες (μεταξύ 200 και 250 °C) με αποτέλεσμα την αύξηση του λειτουργικού κόστους των μονάδων. Εκτός της καταλυτικής αναγωγής, έγιναν προσπάθειες για την αναγωγή της γλυκερίνης με βιολογικές μεθόδους. Η διαδικασία αυτή όμως είναι αργή και έχει μικρή εκλεκτικότητα προς τα επιθυμητά προϊόντα.

Τα τελευταία χρόνια έχουν προταθεί ηλεκτροχημικές τεχνικές για την αντικατάσταση των χημικών και βιολογικών μεθόδων. Το κύριο πλεονέκτημα της ηλεκτρόλυσης είναι ότι μπορεί να πραγματοποιηθεί σε συνθήκες περιβάλλοντος και καταναλώνει λιγότερη ενέργεια σε σύγκριση με τις χημικές μεθόδους. Επιπλέον, η ηλεκτρόλυση απαιτεί συνεχές ρεύμα το οποίο μπορεί να προέλθει από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως τα φωτοβολταϊκά. Τα φωτοβολταϊκά παράγουν απευθείας συνεχές ρεύμα που μπορεί να τροφοδοτήσει άμεσα την εγκατάσταση, χωρίς την απαίτηση ανορθωτών, με αποτέλεσμα τη σημαντική ελάττωση του κόστους.

Η άμεση ηλεκτροχημική αναγωγή των αλκοολών είναι γενικά μια εξαιρετικά δύσκολη αντίδραση και για το λόγο αυτό η βιβλιογραφία είναι φτωχή στο θέμα αυτό. Σε μια σχετικά πρόσφατη δημοσίευση [11], η γλυκερίνη υφίσταται αρχικά μερική αφυδάτωση με χρήση της ισχυρά όξινης ρητίνης Amberlyst-15 στους 80 °C και δίνει υδροξυακετόνη, η οποία στη συνέχεια ανάγεται ηλεκτροχημικά προς 1,2-προπανοδιόλη. Οι συγγραφείς αναφέρουν 86% εκλεκτικότητα σε 1,2-προπανοδιόλη με βαθμό μετατροπής της γλυκερίνης 74% σε κάθοδο ανθρακούχων υλικών και Pt. Το δυναμικό που εφαρμόσθηκε μεταξύ ανόδου και καθόδου ήταν της τάξης των 20 V, μια τιμή που είναι εξαιρετικά ασύμφορη για βιομηχανική εφαρμογή. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η άμεση αναγωγή της γλυκερίνης, χωρίς να προηγηθεί το στάδιο της αφυδάτωσης, σε ηλεκτρόδια μετάλλων υψηλής, μέσης και μικρής υπέρτασης για την έκλυση του υδρογόνου.

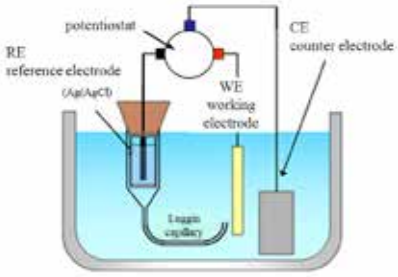
2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Για την ηλεκτρόλυση χρησιμοποιήθηκε ένα κελί δυο χώρων κατασκευασμένο από Teflon. Ο καθοδικός και ο ανοδικός χώρος έχουν τον ίδιο όγκο, 12 cm^3 έκαστος, και χωρίζονται με μεμβράνη Nafion (H^+ form). Το κελί γεμίζονταν με 10mL διαλύματος, έτσι ώστε στο πάνω μέρος του κελιού υπήρχε ένας μικρός κενός όγκος. Στη συνέχεια διοχετεύονταν αέριο ήλιο (He) υψηλής καθαρότητας υπό σταθερή ροή 10 ml/min, ώστε τα παραγόμενα αέρια από την αναγωγή της γλυκερόλης και το υδρογόνο(H_2) που προέρχονταν από την ηλεκτρόλυση του νερού να μπορούν να εξέρχονται με σκοπό την ανάλυσή τους.



Εικόνα 2: Το ηλεκτρολυτικό κελί, όπου Π: μεταλλικές πλάκες, Κ: νεκρός χώρος όγκου, Μ: μεμβράνη Nafion και RE: ηλεκτρόδιο αναφοράς

Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε ήταν αυτή των τριών ηλεκτροδίων, συνδεδεμένα με έναν ποτενσιοστάτη Wenking POS 73 (Bank Elektronik) προκειμένου να γίνεται η μέτρηση του δυναμικού του ηλεκτροδίου εργασίας (Workin gelectrode) ως προς το ηλεκτρόδιο αναφοράς (Reference electrode). Ως ηλεκτρόδιο αναφοράς χρησιμοποιήθηκε το ηλεκτρόδιο Ag/AgCl.



Εικόνα 3: Ηλεκτρολυτική διάταξη τριών ηλεκτροδίων

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε μεταλλικά ηλεκτρόδια χαμηλής (Pt, Ru), μέσης (Au, Cu) και υψηλής υπέρτασης (Sn) ως προς την έκλυση του υδρογόνου. Τα ηλεκτρόδια Au, Cu και Sn ήταν με την μορφή ελασμάτων. Στα ηλεκτρόδια Pt και Ru, τα μέταλλα ήταν με την μορφή νανοσωματιδίων πάνω σε υπόστρωμα άνθρακα. Ανάλογα με το ηλεκτρόδιο εργασίας που χρησιμοποιήθηκε σε κάθε περίπτωση γινόταν και η απαραίτητη προεργασία στο ηλεκτρόδιο εργασίας. Στα μεταλλικά ελάσματα γινόταν καθαρισμός της επιφάνειας με γυαλόχαρτο και απεσταγμένο νερό, ενώ στα ηλεκτρόδια Pt και Ru σε άνθρακα η διεργασία ήταν πιο σύνθετη. Συγκεκριμένα, ο καθαρισμός τους γίνονταν ηλεκτρολυτικά εφαρμόζοντας θετική τιμή πυκνότητας ρεύματος (5mA/cm^2) για 5-10 λεπτά. Ο λόγος για τη προεργασία αυτή είναι ότι οι ακαθαρσίες στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων μπορούν να προκαλέσουν ανεπιθύμητες μεταβολές στον τρόπο λειτουργίας τους. Η καθαρότητα τόσο της επιφάνειας του ηλεκτροδίου εργασίας, όσο και του ηλεκτρολυτικού διαλύματος, επηρεάζουν άμεσα την ηλεκτροχημική αναγωγή της γλυκερόλης.

Τα βήματα της πειραματικής διαδικασίας ήταν τα εξής:

1) Καθαρισμός της επιφάνειας ηλεκτροδίου και ετοιμασία κελιού.
2) Πλήρωση κελιού με διάλυμα 0,5 M H_2SO_4 με γλυκερόλη. Χρησιμοποιήθηκαν όξινα διαλύματα με τρεις διαφορετικές περιεκτικότητες γλυκερόλης: 5%, 10% και 15% v/v.
3) Σύνδεση κελιού με τον ποτενσιοστάτη.
4) Διοχέτευση αερίου ηλίου (He) με ταχύτητα ροής 10 mL/min.
5) Εφαρμογή σταθερής τιμής δυναμικού V.
6) Δειγματοληψία (αέρια και υγρή) ανά τακτά χρονικά διαστήματα για την ανάλυση των προϊόντων.

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε τρεις διαφορετικές τιμές καθοδικού δυναμικού: -0,7V, -0,8V και -1V vs Ag/AgCl.

Η ανάλυση των προϊόντων της ηλεκτρόλυσης πραγματοποιήθηκε με αέρια χρωματογραφία, HPLC και ιοντική χρωματογραφία. Για την ανίχνευση των αλκοολών, αλδεϋδών και υδρογονανθράκων χρησιμοποιήθηκε αέριος χρωματογράφος της εταιρίας Shimadzu, μοντέλο GC-14A με μια τριχοειδή στήλη DB-Wax UI, 30 m × 0.25 mm, 0.25 μm και ανιχνευτή FID. Για τον προσδιορισμό της γλυκερίνης χρησιμοποιήθηκε HPLC (Dionex 4500i) με τις ακόλουθες συνθήκες: στήλη Agilent Hi-Plex H, 7.7 × 300 mm, εκλουστικό 8 mM H_2SO_4, ταχύτητα ροής 0,4 mL/min, στους 60 °C και ανιχνευτή RI.

Το ποσοστό μετατροπής της γλυκερόλης υπολογίστηκε με την εξίσωση (1) όπου η μετατροπή ισούται με το λόγο της ποσότητας γλυκερόλης (σε mol) που καταναλώθηκε κατά τη διάρκεια της αντίδρασης, προς την αρχική ποσότητα γλυκερόλης.

$$\text{Μετατροπή Γλυκερόλης (\%)} = 100 \cdot \frac{\text{Ποσότητα γλυκερόλης που αντέδρασε (mol)}}{\text{Αρχική ποσότητα γλυκερόλης (mol)}} \quad (1)$$

Η εκλεκτικότητα των προϊόντων υπολογίστηκε με την εξίσωση (2) όπου η εκλεκτικότητα του προϊόντος i της αντίδρασης ισούται με την ποσότητα (σε mol) του παραγόμενου προϊόντος i, προς την ποσότητα γλυκερόλης που ανάχθηκε.

$$Εκλεκτικότητα\ προϊόντος,\ i\ (\%) = 100 \cdot \frac{Ποσότητα\ προϊόντος\ i\ (mol)}{Ποσότητα\ γλυκερόλης\ που\ ανάχθηκε\ (mol)} \quad (2)$$

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1. Επίδραση της φύσης του ηλεκτροδίου της καθόδου

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε όξινο διάλυμα 0,5 M H_2SO_4 που περιείχε 1% v/v γλυκερόλη. Τα κύρια προϊόντα της αναγωγής της ήταν η 1,3-προπανοδιόλη (1,3-PDO) και η 1,2-προπανοδιόλη (1,2-PDO). Σε όλα τα ηλεκτρόδια που μελετήθηκαν ο βαθμός μετατροπής της γλυκερόλης ήταν υψηλός, της τάξης του 78-95%. Η υψηλότερη εκλεκτικότητα προς 1,3-προπανοδιόλη ήταν 90% σε κάθοδο λευκόχρυσου (Pt), με αντίστοιχα υψηλή % μετατροπή της γλυκερόλης ίση με 81%. Στα υπόλοιπα ηλεκτρόδια η % εκλεκτικότητα σε 1,3-προπανοδιόλη ήταν της τάξης του 22-57%. Στον Πίνακα 1 φαίνονται πιο αναλυτικά τα δεδομένα, καθώς και τα πειραματικά αποτελέσματα για το κάθε ηλεκτρόδιο καθόδου.

Πίνακας 1: Ηλεκτρολυτικά πειράματα με εφαρμογή σταθερής πυκνότητας ρεύματος (-5 mA/cm^2) σε καθόδους διαφόρων μετάλλων και διάλυμα 0,5 M H_2SO_4 + 1% v/v γλυκερόλη

Κάθοδος	Μετατροπή γλυκερόλης	Εκλεκτικότητα σε 1,3-PDO	Εκλεκτικότητα σε 1,2-PDO	Πειραματική διάρκεια (h)
Sn	95%	22%	-	21
Au	78%	46%	21%	18
Cu	77%	57%	-	17
Pt	81%	90%	-	23
Ru	82%	50%	-	22

Δεδομένου ότι η εκλεκτικότητα της 1,3-προπανοδιόλης ήταν της τάξης του 22-90% υπάρχει ένα έλλειμμα μάζας της τάξης του 10-78% σε όλα τα πειράματα. Στα αέρια προϊόντα ανιχνεύθηκε προπάνιο που προέρχονταν από την ολική αναγωγή της γλυκερίνης. Οι αναλύσεις HPLC έδειξαν μικρές ποσότητες 1-προπανόλης και 2-προπανόλης, οι οποίες όμως δεν μπορούσαν να δικαιολογήσουν το έλλειμμα στο ισοζύγιο μάζας.

3.2. Επίδραση της συγκέντρωσης της γλυκερόλης

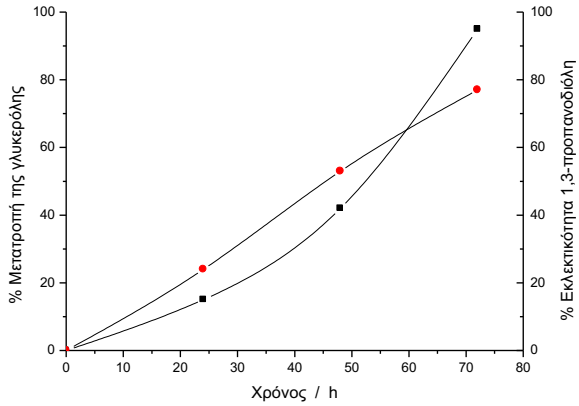
Τα πειράματα που παρουσιάζονται στην προηγούμενη παράγραφο έδειξαν ότι ταυτοποίηση των κύριων προϊόντων της αναγωγής ήταν δυνατή όταν η συγκέντρωση της γλυκερόλης ήταν 1%, όμως αυτή των παραπροϊόντων δεν ήταν εφικτή, επειδή η συγκέντρωση τους στο τελικό διάλυμα εξακολουθούσε να είναι μικρή. Προκειμένου να αυξηθεί η συγκέντρωσή τους πραγματοποιήθηκαν πειράματα με υψηλότερες συγκεντρώσεις γλυκερόλης. Συγκεκριμένα, έγιναν πειράματα σε διαλύματα 0,5 M H_2SO_4 με 5%, 10% και 15% v/v γλυκερόλη. Ως κάθοδος χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρόδιο Pt διότι έδωσε τα καλύτερα αποτελέσματα σε συγκέντρωση γλυκερόλης 1%. Τα κύρια προϊόντα της αναγωγής ήταν η 1,3-προπανοδιόλη, η 1,2-προπανοδιόλη και η υδροξυακετόνη ενώ ανιχνεύτηκαν και μικρότερες ποσότητες αιθυλενογλυκόλης (EG), προπανόλης-1, προπανόλης-2 και προπανίου. Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σε δυναμικό -1 V vs Ag/AgCl. Ο χρόνος ηλεκτρόλυσης ήταν 72 h.

Η μεταβολή του βαθμού μετατροπής της γλυκερίνης παρουσίαζε μια σχεδόν εκθετική αύξηση συναρτήσει του χρόνου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4, και αυτό δείχνει ότι η αναγωγή ακολουθεί κινητική πρώτης τάξης. η % εκλεκτικότητα της 1,3-προπανοδιόλης δεν παρουσίασε κάποια ελάττωση σε μεγάλο χρόνο ηλεκτρόλυσης. Μια τέτοια ελάττωση θα ήταν αναμενόμενη αν η 1,3-προπανοδιόλη

ανάγονταν περεταίρω προς προπανόλη-1 ή προπάνιο με ρυθμό μεγαλύτερο από αυτόν της παραγωγής της.

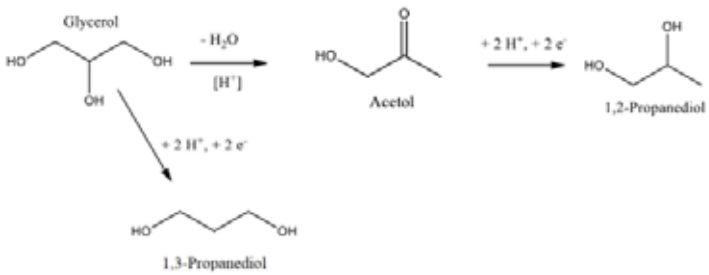
Πίνακας 2: % Βαθμός μετατροπής της γλυκερόλης και % εκλεκτικότητες των προϊόντων συναρτήσει της περιεκτικότητας του διαλύματος σε γλυκερόλη. Κάθοδος Pt και δυναμικό -1 V vs Ag/AgCl

Περιεκτικότητα γλυκερόλης (% v/v)	Μετατροπή γλυκερόλης	Εκλεκτικότητα σε 1,3-PDO	Εκλεκτικότητα σε 1,2-PDO	Εκλεκτικότητα σε υδροξυακετόνη
5	98%	81,5%	9,8%	3,7%
10	95%	77,1%	11,2%	5,6%
15	83%	74,9%	10,9%	5,4%



Εικόνα 4: % Βαθμός μετατροπής της γλυκερόλης (■) και εκλεκτικότητα της 1,3-προπανοδιόλης (●) συναρτήσει του χρόνου, σε κάθοδο λευκοχρύσου (Pt), διάλυμα 0,5 M H_2SO_4 + 10% v/v γλυκερόλη και δυναμικό -1 V vs Ag/AgCl

Ένας πιθανός μηχανισμός που μπορεί να περιγράψει τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.

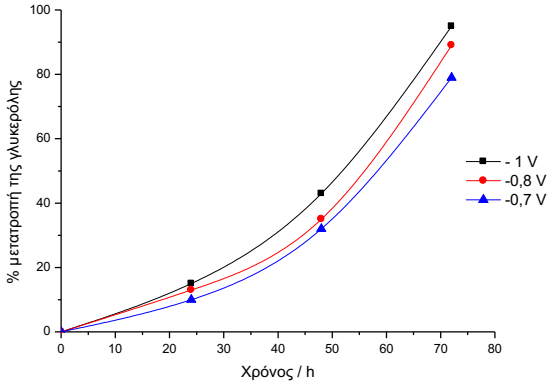


Εικόνα 5: Πιθανός μηχανισμός μετατροπής γλυκερόλης προς το σχηματισμό υδροξυακετόνης, 1,2-προπανοδιόλης και 1,3-προπανοδιόλης [11]

Σύμφωνα με το μηχανισμό αυτό, η υδροξυακετόνη προκύπτει από την αφυδάτωση της γλυκερόλης. Στη συνέχεια η υδρογόνωση της υδροξυακετόνης οδηγεί στον σχηματισμό της 1,2-προπανοδιόλης. Η 1,3-προπανοδιόλη σχηματίζεται άμεσα μέσω της υδρογόνωσης της γλυκερόλης.

3.3. Επίδραση του καθοδικού δυναμικού

Τέλος, μελετήθηκε η επίδραση δυναμικού στο βαθμό μετατροπής της γλυκερόλης. Έγιναν ηλεκτρολυτικά πειράματα σε κάθοδο λευκόχρυσου (Pt) και διάλυμα 0,5 M H_2SO_4 + 10% v/v γλυκερόλης, σε δυναμικά -0,7 V, -0,8 V και -1 V vs Ag/AgCl. Στην Εικόνα 6 παρουσιάζεται η εξάρτηση μεταξύ της % Μετατροπής της γλυκερόλης σε σχέση με το χρόνο. Η % μετατροπή της γλυκερόλης αυξάνονταν, αν και όχι σημαντικά, με την αύξηση του καθοδικού δυναμικού. Η διάρκεια των πειραμάτων αυτών ήταν 72 ώρες.



Εικόνα 6: % Μετατροπή γλυκερόλης συναρτήσει του χρόνου σε διάφορα καθοδικά δυναμικά

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η άμεση ηλεκτροχημική αναγωγή των αλκοολών είναι γενικά μια εξαιρετικά δύσκολη αντίδραση. Η παρούσα εργασία παρουσιάζει τα αποτελέσματα της των πειραμάτων της άμεσης αναγωγής της γλυκερίνης, χωρίς να προηγηθεί το στάδιο της αφυδάτωσης, σε ηλεκτρόδια μετάλλων υψηλής, μέσης και μικρής υπέρτασης για την έκλυση του υδρογόνου. Τα πειράματα έγιναν σε όξινα διαλύματα (0,5 M H_2SO_4).

Το ηλεκτρόδιο που έδωσε τον μεγαλύτερο βαθμό μετατροπής της γλυκερόλης και ταυτόχρονα τις υψηλότερες εκλεκτικότητες των προϊόντων είναι αυτό του λευκοχρύσου (Pt). Τα κύρια προϊόντα της αναγωγής ήταν η 1,3-προπανοδιόλη, η 1,2-προπανοδιόλη και η υδροξυακετόνη ενώ ανιχνεύτηκαν και μικρότερες ποσότητες αιθυλενογλυκόλης, προπανόλης-1, προπανόλης-2 και προπανίου. Η μέγιστη % εκλεκτικότητα σε 1,3-προπανοδιόλη (90%) βρέθηκε στο ηλεκτρόδιο Pt με αντίστοιχα υψηλή % μετατροπή της γλυκερόλης (81,5%) σε διάλυμα 0,5 M H_2SO_4 + 5% v/v και καθοδικό δυναμικό -1V vs Ag/AgCl. Η υψηλότερη εκλεκτικότητα προς 1,2-προπανοδιόλη ήταν 21% σε ηλεκτρόδιο Au και της υδροξυακετόνης 5,6% σε κάθοδο Pt σε διάλυμα που περιείχε 10% v/v γλυκερόλη.

Τα πειράματα σε διαφορετικές τιμές δυναμικού έδειξαν ότι η % μετατροπή της γλυκερόλης αυξάνονταν, αν και όχι σημαντικά, με την αύξηση του καθοδικού δυναμικού.

Τα αποτελέσματα αυτά έδειξαν ότι η αναγωγή της γλυκερίνης είναι αποτελεσματική διότι επιτυγχάνεται ταυτόχρονα υψηλός βαθμός μετατροπής και υψηλή εκλεκτικότητα προς ένα προϊόν (την 1,3-προπανοδιόλη). Αυτό καθιστά ευκολότερο το διαχωρισμό σε μια μελλοντική βιομηχανική εφαρμογή. Μειονέκτημα αποτελεί η μικρή ταχύτητα της μετατροπής (τα πειράματα έφταναν σε διάρκεια τις 72 ώρες).

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα έρευνα συγχρηματοδοτείται από την Ελλάδα και την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού, Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση», στο πλαίσιο της Πράξης «Ενίσχυση Μεταδιδακτόρων ερευνητών/ερευνητριών - Β΄ Κύκλος» (MIS-5033021), που υλοποιεί το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών (ΙΚΥ).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Ciriminna, R., Pina, C.D., Rossi, M., and Pagliaro, M. 2014, “Understanding the glycerol market,” Eur. J. Lipid Sci. Technol., 116, pp.1432-1439.

[2] Chozhavendhan, S., Praveen Kumar, R., Elavazhagan, S., Barathiraja, B., Jayakumar, M., and Varjani S.J., 2018, “Utilization of Crude Glycerol from Biodiesel Industry for the Production of Value-Added Bioproducts,” In: Singhania R., Agarwal R., Kumar R., Sukumaran R. (eds) Waste to Wealth. Energy, Environment, and Sustainability. Springer, Singapore.

[3] Zhou, C., Beltramini, J.N., Fan, Y.X., and Lu, G.Q., 2008, “Chemoselective catalytic conversion of glycerol as a biorenewable source to valuable commodity chemicals,” Chemical Society Reviews, 37(3), pp. 527-549.

[4] Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, 2011, John Wiley and Sons Inc, NY.

[5] Lee, C.S., Aroua, M.K., Daud, W.A.W., Cognet, P., Pérès, Y., and Ajeel, M.A. 2018, “Selective Electroreduction of Glycerol to 1,2-Propanediol on a Mixed Carbon-Black Activated Carbon Electrode and a Mixed Carbon Black-Diamond Electrode,” BioResources, 13(1), pp. 115-130.

[6] Yadav, G.D., Chandan, P.A., and Tekale, D.P., 2012, “Hydrogenolysis of Glycerol to 1,2-Propanediol over Nano-Fibrous Ag-OMS-2 Catalysts,” Industrial & Engineering Chemistry Research, 51(4), pp. 1549-1562.

[7] Lee, C.S., Aroua, M.K., Daud, W.M.A.W., Cognet, P., Pérès-Lucchese, Y., Fabre, P-L., Reynes, O., and Latapie, L., 2015, “A review: Conversion of bioglycerolin to 1,3-propanediol via biological and chemical method,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, 42, pp. 963–972.

[8] Zhang, G., Ma, B., Xu, X., Li, C., and Wang, L., 2007, “Fast conversion of glycerol to 1,3-propanediol by a new strain of Klebsiella pneumonia,” Biochemical Engineering Journal, 37(3), pp. 256-260.

[9] Yang, F., Hanna, M., and Sun, R., 2012, “Value – added uses for crude glycerol—a byproduct of biodiesel production,” Biotechnology for Biofuels, 5(13), pp. 1-10.

[10] Kraus, G.A., 2008, “Synthetic methods for the preparation of 1,3-propanediol,” Clean-Soil Air Water, 36(8), pp. 648-651.

[11] Lee, C.S., 2016, “Study of glycerol electrochemical conversion into added-value compounds,” Ph.D. thesis, University of Malaya, Kuala Lumpur, Malaysia.

ΑΝΑΕΡΟΒΙΑ ΧΩΝΕΥΣΗ ΚΑΙ ΟΙΚΟΤΟΞΙΚΟΤΗΤΑ ΠΡΩΤΟΒΑΘΜΙΑΣ ΙΛΥΟΣ ΑΠΟ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΑΣΤΙΚΩΝ ΛΥΜΑΤΩΝ

Φωτεινή Σακαβέλη[1], Μαρία Πεταλά[1], Βασίλειος Τσιρίδης[1], Ευθύμιος Νταρακάς[1]*

[1] Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

*Email: darakas@civil.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο στόχος της παρούσας εργασίας ήταν η μελέτη και η αξιολόγηση της αναερόβιας χώνευσης πρωτοβάθμιας ιλύος, ως προς την: α) ποσότητα του παραγόμενου βιοαερίου και β) καταλληλόλητά του στερεού υπολείμματος της διεργασίας για ανάκτηση πόρων μέσω εφαρμογής της του στη γη. Η διεργασία της αναερόβιας χώνευσης μελετήθηκε με τη δοκιμή προσδιορισμού του δυναμικού παραγωγής βιοαερίου (Biochemical Methane Potential, BMP), σε διάφορες αναλογίες πτητικών στερεών, VS πρωτοβάθμιας ιλύος/VS εμβολίου, και η μέγιστη παραγωγή μεθανίου καταγράφηκε για την αναλογία 2:1 g VS πρωτοβάθμιας ιλύος/g VS εμβολίου. Επιπλέον, μίγμα στερεού υπολείμματος της διεργασίας και πρότυπου εδάφους (20% w/w) υποβλήθηκε σε δοκιμή έκπλυσης (EN 14405). Παρατηρήθηκε πως η εφαρμογή του στερεού υπολείμματος στο έδαφος συνεισέφερε στη ρύθμιση του pH και στον εμπλουτισμό του με οργανικά και ανόργανα συστατικά, ενώ ταυτόχρονα στα αρχικά στάδια της έκπλυσης καταγράφηκε υψηλή τοξικότητα στο βακτήριο *Vibrio fischeri*, λόγω του υψηλού οργανικού φορτίου. Αντίθετα, τα κλάσματα έκπλυσης αναλογίας υγρού/στερεού μεγαλύτερης από 1 L/kg παρουσίασαν μικρή τοξική δράση (<35%) στους οργανισμούς *Vibrio fischeri* και *Daphnia magna*. Τέλος, δοκιμές κροκίδωσης πρωτοβάθμιας ιλύος με προσθήκη πολυηλεκτρολύτη έδειξαν πως η διεργασία της κροκίδωσης μπορεί να αυξήσει την περιεκτικότητα της ιλύος σε πτητικά στερεά και να εφαρμοστεί ως στάδιο προεπεξεργασίας της πρωτοβάθμιας ιλύος κατά την αναερόβια χώνευση.

Λέξεις Κλειδιά: *αναερόβια χώνευση, πρωτοβάθμια ιλύς, δοκιμές βιοχημικού δυναμικού μεθανίου (BioMethane Potential, BMP), οικοτοξικότητα*.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε μία Εγκατάσταση Επεξεργασίας αστικών Λυμάτων (ΕΕΛ), η παραγωγή βιοαερίου και η σταθεροποίηση της ιλύος, η οποία στα πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί ως δευτερεύον υλικό σε διάφορους τομείς της οικονομίας, συνήθως επιτυγχάνεται με αναερόβια χώνευση πρωτοβάθμιας και δευτεροβάθμιας ιλύος. Ωστόσο, καθώς η πρωτοβάθμια ιλύς περιέχει υψηλότερες ποσότητες βιοαποικοδομήσιμου οργανικού υλικού σε σύγκριση με τη δευτεροβάθμια ιλύ, η αναερόβια χώνευσή της θα μπορούσε να είναι πιο αποδοτική όσον αφορά τη συνολική παραγωγή μεθανίου. Πράγματι, η οργανική ουσία των στερεών της πρωτοβάθμιας καθίζησης αποτελείται κυρίως από λιπαρά οξέα, λιπίδια, ίνες, ενώ η ιλύς της δευτεροβάθμιας καθίζησης αποτελείται κυρίως από προϊόντα με μικρότερο ενεργειακό δυναμικό, όπως μικρόβια και εξωκυτταρικές πολυμερείς ουσίες (EPS) [1]–[3]. Αν και διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια μίας μικρής ποσότητας ενεργειακού δυναμικού, καθώς ορισμένοι υδατάνθρακες που μετατρέπονται σε μεθάνιο, περιέχουν θεωρητικά υψηλότερο ενεργειακό δυναμικό από το τελικό προϊόν, αναμένεται πως η αναερόβια χώνευση της πρωτοβάθμιας ιλύς μπορεί να αποδώσει υψηλότερη παραγωγή μεθανίου συγκριτικά με τη δευτεροβάθμια ιλύ.

Η πιο διαδεδομένη μεθοδολογία για την αξιολόγηση της παραγωγής μεθανίου κατά τη διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης είναι οι δοκιμές βιοχημικού δυναμικού μεθανίου (Biochemical Methane Potential test, BMP) [2], [4]. Κατά τις δοκιμές BMP, ένα υπόστρωμα (πχ. πρωτοβάθμια ιλύς) αναμιγνύεται με αναερόβια χωνεμένη ιλύς (εμβόλιο) και το μίγμα αποθηκεύεται σε αναερόβιους αντιδραστήρες (συνήθως γυάλινες φιάλες), οι οποίοι τοποθετούνται είτε σε λουτρό είτε σε θάλαμο ελεγχόμενης θερμοκρασίας υπό συνεχή ανάδευση για περίπου 30 ημέρες. Οι δοκιμές BMP είναι ιδανικές για τη μελέτη του δυναμικό παραγωγής βιομεθανίου από διάφορα υποστρώματα, ενώ ταυτόχρονα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προσέγγιση της κρίσιμης μεταβλητής για την αξιολόγηση της αναερόβιας βιοαποικοδομησιμότητας των στερεών αποβλήτων [5] που είναι η βέλτιστη αναλογία μεταξύ του υποστρώματος και του εμβολίου (substrate to inoculum ratio, SIR). Σύμφωνα με τους Angelidaki et al. [4], το SIR πρέπει να χαρακτηριστεί ως μία από τις πιο κύριες παραμέτρους που επηρεάζουν τα αποτελέσματα της αναερόβιας χώνευσης. Το βέλτιστο SIR εξαρτάται από τη δραστικότητα και τη συγκέντρωση βιομάζας του εμβολίου, καθώς και από την οργανική φόρτιση (αλλιώς συγκέντρωση πτητικών στερεών) και το δυναμικό βιοαποικοδομησιμότητας του υποστρώματος. Παρόλο που το SIR επηρεάζει τεχνικά μόνο την κινητική και όχι την τελική απόδοση της παραγωγής μεθανίου, αναφέρεται ότι πολύ χαμηλό SIR μπορεί να αναστέλλει την επαγωγή των ενζύμων που απαιτούνται για τη βιοαποικοδόμηση του υποστρώματος, με αποτέλεσμα τη σχετικά χαμηλή ικανότητα παραγωγής βιομεθανίου [2], [6], [7]. Οι συνήθεις αναλογίες, για την αναερόβια χώνευση ιλύος μπορεί να κυμαίνονται μεταξύ 0.5 και 2 g VS υποστρώματος/g VS εμβολίου [6], [7].

Παρά το γεγονός ότι υπάρχουν αρκετές εργασίες για την αναερόβια χώνευση της ιλύος και την αξιολόγηση του παραγόμενου βιοαερίου [2], λίγες είναι οι εργασίες που αναφέρονται στην αναερόβια χώνευση της πρωτοβάθμιας ιλύος [8]. Επιπλέον, οι περισσότερες εργασίες επικεντρώνονται στη μελέτη της αναερόβιας χώνευσης, χωρίς να εξετάζουν τα χαρακτηριστικά του στερεού υπολείμματος που προκύπτει και τους τρόπους αξιοποίησής του. Μελέτες έχουν δείξει ότι η εφαρμογή της ιλύος στο έδαφος, μπορεί να προκαλέσει την αποδέσμευση πολλών ανεπιθύμητων συστατικών για το έδαφος και τα φυτά, όπως βαρέα μέταλλα, πολυχλωριωμένα διφαινύλια (PCBs), πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAHs) και άλλους οργανικούς ρύπους [9], [10]. Συνήθως, για μια σχετικά εύκολη και αξιόπιστη αποτίμηση των επιδράσεων που μπορεί να έχει η εφαρμογή της ιλύος στο έδαφος, προτείνεται η εφαρμογή δοκιμών έκπλυσης και κυρίως της ανοδικής διήθησης βάσει της οποίας προσομοιώνονται οι συνθήκες εναπόθεσης της ιλύος στο έδαφος [10]. Ωστόσο, η εφαρμογή μόνο χημικών αναλύσεων στα υγρά έκπλυσης που προκύπτουν από τις δοκιμές, μπορεί να δώσει πληροφορίες για την παρουσία διαφόρων ρύπων αλλά δεν μπορεί να δώσει πληροφορίες σχετικά με την οικοτοξικότητα των υγρών έκπλυσης [11].

Στόχος της παρούσας εργασίας ήταν η μελέτη της αναερόβιας χώνευσης της πρωτοβάθμιας ιλύος, καθώς και η αξιολόγηση της εφαρμογής του παραγόμενου στερεού υπολείμματος της αναερόβιας χώνευσης στο έδαφος. Η διεργασία της αναερόβιας χώνευσης μελετήθηκε με την δοκιμή προσδιορισμού του δυναμικού παραγωγής βιοαερίου (Biochemical Methane Potential test, BMP). Η αξιολόγηση της εφαρμογής του παραγόμενου στερεού υπολείμματος στο έδαφος έγινε με την εφαρμογή της δοκιμής ανοδικής διήθησης EN 14405 σε μίγμα στερεού υπολείμματος/εδάφους. Στα υγρά κλάσματα έκπλυσης που προέκυψαν προσδιορίστηκαν τα φυσικοχημικά τους χαρακτηριστικά, καθώς και η οικοτοξικότητά τους, με το φωτοβακτήριο *Vibrio fischeri* και το καρκινοειδές *Dapnia magna*.

2. ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ

Δείγματα πρωτοβάθμιας ιλύος και αναερόβια χωνεμένης ιλύος συλλέχθηκαν αντίστοιχα, από την δεξαμενή της πρωτοβάθμιας καθίζησης και από την έξοδο της αναερόβιας χώνευσης, μιας εγκατάστασης επεξεργασίας αστικών υγρών αποβλήτων. Τα δείγματα συλλέχθηκαν σε πλαστικές φιάλες πολυπροπυλενίου (polypropylene, PP) και μεταφέρθηκαν άμεσα στο εργαστήριο όπου υποβλήθηκαν σε περαιτέρω επεξεργασία. Η ικανότητα παραγωγής μεθανίου μελετήθηκε με τη δοκιμή του βιοχημικού δυναμικού μεθανίου (BioMethane Potential test, BMP), ενώ η εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων κατά την εφαρμογή του στερεού υπολείμματος της αναερόβιας χώνευσης στο έδαφος έγινε με την εφαρμογή της δοκιμής ανοδικής διήθησης. Επιπλέον, μελετήθηκε η διεργασία της κροκίδωσης ως ένα στάδιο προεπεξεργασίας της πρωτοβάθμιας ιλύος με σκοπό την αύξηση της περιεκτικότητας των πτητικών στερεών (VS), πριν την αναερόβια χώνευση.

2.1. Δοκιμές βιοχημικού δυναμικού μεθανίου (BioMethane Potential, BMP)

Οι δοκιμές βιοχημικού δυναμικού μεθανίου (BioMethane Potential, BMP), έγιναν με τη χρήση γυάλινων αντιδραστήρων όγκου 1000 mL (Εικόνα 1). Οι αντιδραστήρες σφραγίστηκαν με σύστημα μηχανικής ανάδευσης, GL 45 (BPC Instruments AB, Lund, Sweden) και η ταχύτητα ανάδευσης καθορίστηκε στα 20 rpm. Για την απομάκρυνση του διοξειδίου του άνθρακα, το παραγόμενο βιοαέριο διέρχονταν από μπουκάλια πολυπροπυλενίου όγκου 250 mL, τα οποία περιείχαν διάλυμα 3 M NaOH. Στη συνέχεια, ο όγκος του μεθανίου καταγραφόταν σύμφωνα με το νόμο του Mariotte (όγκος υγρού που στάζει = όγκος αερίου που παράγεται), όπως φαίνεται στην Εικόνα 1. Οι δοκιμές BMP πραγματοποιήθηκαν υπό μεσόφιλες συνθήκες στους 37 ± 1 °C, σε υδατόλουτρο ρυθμιζόμενης θερμοκρασίας (wcb-11 Witeg Labortechnik GMBH, Germany). Η αναγωγή του όγκου του παραγόμενου αερίου στη θερμοκρασία των 37 °C, έγινε με βάση την καταστατική εξίσωση των ιδανικών αερίων, Εξίσωση 1.

$$P * V = n * R * T \quad (1)$$

Όπου P: ατμοσφαιρική πίεση (atm), V: όγκος αερίου (L), n: ποσότητα αερίου (mol), R: σταθερά αερίου (0,0821 L*atm/ mol *K)) και T: θερμοκρασία (K), θεωρώντας σταθερή πίεση και μέση θερμοκρασία μέτρησης του όγκου του αερίου 20 °C.

Για την απομάκρυνση του μεθανίου και της υπολειμματικής βιοαποικοδομήσιμης οργανικής ύλης της αναερόβια χωνεμένης ιλύος (εμβόλιο), το εμβόλιο αφέθηκε σε θάλαμο επώασης με σταθερή θερμοκρασία 37 ± 1 °C για τρεις ημέρες. Επίσης, η απόδοση του εμβολίου επιβεβαιώθηκε με την εφαρμογή δοκιμών BMP παρουσία γλυκόζης, όπου η παραγωγή μεθανίου ήταν κατά 70 % υψηλότερη από αυτήν που καταγράφηκε στον μάρτυρα (δοκιμή απουσία γλυκόζης)

Εικόνα 1. Πειραματική διάταξη δοκιμών βιοχημικού δυναμικού μεθανίου (BioMethane Potential, BMP).

Ο βέλτιστος λόγος πρωτοβάθμιας ιλύος (Primary Sludge) προς το εμβόλιο (Inoculum), (Primary Sludge to Inoculum Ratio, SIR) αξιολογήθηκε χρησιμοποιώντας τρεις αναλογίες SIR: 2:1, 1:1 και 1:2 g VS πρωτοβάθμιας ιλύος/g VS εμβολίου. Όλες οι δοκιμές περιλάμβαναν τρεις επαναλήψεις, ενώ ταυτόχρονα άλλοι τρείς αντιδραστήρες οι οποίοι περιείχαν μόνο το εμβόλιο χρησιμοποιήθηκαν ως μάρτυρες. Πριν την έναρξη των πειραμάτων στους αντιδραστήρες διοχετεύτηκε καθαρό άζωτο για 5 min, για την απομάκρυνση του οξυγόνου και τη διασφάλιση αναερόβιων συνθηκών. Ο όγκος του παραγόμενου μεθανίου καταγραφόταν καθημερινά και μέχρι ο ημερήσιος ρυθμός παραγωγής μεθανίου να ήταν μικρότερος από 1 % της αθροιστικής παραγωγής μεθανίου.

2.2. Κινητικά μοντέλα

Για την μελέτη της κινητικής της αναερόβιας χώνευσης χρησιμοποιήθηκαν τα κινητικά μοντέλα μη γραμμικής παλινδρόμησης: i) το κινητικό μοντέλο πρώτης τάξης και ii) το τροποποιημένο μοντέλο Gompertz. Το κινητικό μοντέλο της πρώτης τάξης, το οποίο περιγράφεται από την Εξίσωση 2, εφαρμόστηκε για να εκτιμηθεί η σταθερά ρυθμού υδρόλυσης [4].

$$M = M_o * \left(1 - e^{(-k*t)}\right) \quad (2)$$

Όπου M: η αθροιστική παραγωγή μεθανίου (mL CH_4/ g VS), M_O: η πιθανή παραγωγή μεθανίου (mL CH_4/ g VS), k: ο ρυθμός υδρόλυσης (d^{-1}), t: ο χρόνος (d) [12]. Το τροποποιημένο μοντέλο Gompertz (Εξίσωση 3) χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της διάρκειας της λανθάνουσας φάσης και του ρυθμού παραγωγής μεθανίου.

$$M = P * exp * \left\{-\exp * \left(\frac{e * R_{max}(\lambda - t)}{P} + 1\right)\right\} \quad (3)$$

Όπου M: η αθροιστική παραγωγή μεθανίου (mL CH_4/ g VS) στο χρόνο t, P: το μέγιστο δυναμικό παραγωγής μεθανίου (mL CH_4/ g VS), R_{max}: ο μέγιστος ρυθμός παραγωγής μεθανίου (mL CH_4/ g VS/ d), e είναι ο αριθμός του Euler (e = 2.71828), λ: η διάρκεια της λανθάνουσας φάσης (d) και t: ο χρόνος (d). Τα P, R_{max} και λ προσδιορίστηκαν χρησιμοποιώντας το λογισμικό IBM SPSS Statistics 25 (IBM Corp, Armonk, NY, USA).

2.3. Δοκιμή ανοδικής διήθησης (EN 14405)

Στις δυναμικές δοκιμές έκπλυσης το υγρό μέσο έκπλυσης τροφοδοτείται σε μια στήλη στερεού δείγματος με συνεχόμενη ανοδική ροή, προσομοιώνοντας έτσι τη μακροχρόνια έκθεση του δείγματος στο περιβάλλον. Η δοκιμή εφαρμόστηκε για το στερεό υπόλειμμα της αναερόβιας χώνευσης που προέκυψε κατά τη χώνευση σε αναλογία SIR= 2:1 g VS πρωτοβάθμιας ιλύος /g VS εμβολίου, όπου παρατηρήθηκε η μέγιστη παραγωγή μεθανίου. Το στερεό υπόλειμμα μετά από ήπια ξήρανση (σε θερμοκρασία περιβάλλοντος) και ομογενοποίηση με τεμαχισμό των σχετικά μεγάλων σωματιδίων διαμέτρου >2 mm, αναμίχθηκε με πρότυπου εδάφους κατά OECD [13] σε αναλογία 20% w/w. Το πρότυπο έδαφος, με βάση το δελτίο δεδομένων ποιότητας του προμηθευτή (Microbiotest Inc, Βελγίου) περιείχε 85% άμμο, 10% άργιλο και 5% τύρφη. Η δοκιμές ανοδικής διήθησης πραγματοποιήθηκαν σε στήλες πλεξιγκλάς, εσωτερικής διαμέτρου 2.5 cm και ύψους 10 cm, όπου μία στήλη περιείχε μίγμα στερεού υπολείμματος (της δοκιμής BMP σε SIR= 2:1 g VS πρωτοβάθμιας ιλύος /g VS εμβολίου) και πρότυπου εδάφους και μία στήλη μόνο πρότυπο έδαφος η οποία χρησιμοποιήθηκε ως μάρτυρας (control). Οι στήλες τροφοδοτούνταν με ανοδική ροή με απεσταγμένο νερό παροχής περίπου 2.5 mL/h, μέσω περισταλτικής αντλίας πολλαπλών κεφαλών (205S/CA, Watson-Marlow Inc., Wilmington, USA). Τα υγρά έκπλυσης λαμβάνονταν από το επάνω μέρος της κάθε στήλης σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα, τα οποία αντιστοιχούσαν σε αθροιστικές αναλογίες υγρού/στερεού L/S= 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5 και 10 L/kg. Για την αξιολόγηση της οικοτοξικότητας των υγρών έκπλυσης πραγματοποιήθηκε εφαρμογή βιοδοκιμών σε δύο υδρόβιους οργανισμούς, το φωτοβακτήριο *Vibrio fischeri* (δοκιμή Microtox) και το καρκινοειδές *Daphnia magna*. Η δοκιμή Microtox βασίστηκε στη μέτρηση της βιοφωταύγειας του *V. fischeri* στα υγρά έκπλυσης, για χρόνους έκθεσης 5, 15 και 30 min. Για τη δοκιμή Microtox εφαρμόσθηκε το πρωτόκολλο μέτρησης 82 % Basic test [14], σύμφωνα με το οποίο η μέγιστη εξεταζόμενη συγκέντρωση του δείγματος είναι 82 %. Οι μετρήσεις έγιναν με τον εργαστηριακό αναλυτή Microtox M500 (Modernwater Inc., London, England) και για την επεξεργασία των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε λογισμικό MicrotoxOmni® Software version 4.1. Η δοκιμή για τη μέτρηση της οικοτοξικότητας των υγρών έκπλυσης με το καρκινοειδές *D. magna* βασίστηκε στη μέτρηση της ακινητοποίησης που προκαλείται από τη δράση των υγρών έκπλυσης, μετά από έκθεση των οργανισμών στα δείγματα για 24 h [15]. Στη δοκιμή χρησιμοποιήθηκε το σετ μέτρησης οικοτοξικότητας Daphtoxkit F magna (Microbiotest Inc., Belgium). Η οικοτοξικότητα των υγρών έκπλυσης μετρήθηκε σε συγκέντρωση δείγματος 100 % (χωρίς αραίωση του δείγματος).

2.4. Δοκιμές κροκίδωσης

Οι δοκιμές κροκίδωσης της πρωτοβάθμιας ιλύος έγιναν με τη χρήση του κατιονικού πολυηλεκτρολύτη, Flopam EM 640 HIB (Chemifloc, Shannon, Ireland), ο οποίος χαρακτηρίζεται από υψηλή πυκνότητα, ειδικό βάρος 1.00-1.10, ιξώδες διαλύματος πολυηλεκτρολύτη 5g/L ίσο με 1900 cPs, και συγκέντρωση μη πτητικών στερεών ίση με 49-56 %. Ο κατιονικός πολυηλεκτρολύτης χρησιμοποιήθηκε ως υδατικό διάλυμα πολυμερούς 0.5 %, το οποίο παρασκευάστηκε μία ώρα πριν από κάθε δοκιμή. Η αποτελεσματικότητα του ηλεκτρολύτη μελετήθηκε με την εφαρμογή των δοκιμών Jar test και για δόσεις

1.5, 4.5, 5.0, 6.0, 6.5, 8, 12 g πολυηλεκτρολύτη/ kg TS πρωτοβάθμιας ιλύος. Κάθε δόση μελετήθηκε σε ποσότητα πρωτοβάθμιας ιλύος 500 mL, από την οποία μετά από το στάδιο της ανάμιξης, της καθίζησης για περίπου 30 min και της απομάκρυνσης μιας ποσότητας υπερκείμενου υγρού περίπου 300 mL, λαμβανόταν η κροκιδωμένη πρωτοβάθμια ιλύς. Στη συνέχεια προσδιορίζονταν η περιεκτικότητα των πτητικών στερεών (VS) και η αφυδατωσιμότητα της κροκιδωμένης ιλύος, με βάση τη μέτρηση του χρόνου τριχοειδούς αναρρόφησης (Capillary Suction Time meter, CST).

2.5. Αναλυτικές μέθοδοι

Στα δείγματα ιλύος και στα παραπροϊόντα τους από τις διάφορες δοκιμές προσδιορίστηκαν τα παρακάτω φυσικοχημικά χαρακτηρίστηκα: ολικά στερεά (Total Solids, TS), πτητικά στερεά (Volatile Solids, VS), pH, ηλεκτρική αγωγιμότητα, αλκαλικότητα, πτητικά λιπαρά οξέα (VFA), άζωτο ως ιόντα αμμωνίου (NH_4^+-N), ολικός φώσφορος και χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD), σύμφωνα με πρότυπες μεθόδους [16]. Επιπλέον προσδιορίστηκαν η οργανική ουσία και ο οργανικός άνθρακας σύμφωνα τη μέθοδο Walkley Black [17], ενώ η περιεκτικότητα στοιχειακού άνθρακα (C) και αζώτου (N) μετρήθηκαν χρησιμοποιώντας τον στοιχειακό αναλυτή Flash 2000 (Thermo Scientific™, Waltham, USA). Η ικανότητα αφυδάτωσης των υποστρωμάτων πριν και μετά τη διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης προσδιορίστηκε με τη χρήση ενός μετρητή χρόνου τριχώδους αναρρόφησης (Capillary Suction Time meter,CST) 304M CST (Triton Electronics Ltd., Dunmow, England).

Επιπλέον στα υγρά έκπλυσης της δοκιμής ανοδικής διήθησης EN 14405 προσδιορίστηκαν: το διαλυμένο οξυγόνο (Dissolved Oxygen, DO), το δυναμικό οξειδοαναγωγής (Oxidation Reduction Potential, ORP) με τα όργανα Sension$^+$ PH3 και HQ30D (Hach Lange GmbH, Düsseldorf, Germany) αντίστοιχα, το pH και ο ολικός οργανικός άνθρακας (Total Organic Carbon, TOC) με τον αναλυτή ολικού οργανικού άνθρακα TOC 5000A (Shimadzu Scientific Instruments Inc., Maryland, USA).

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1. Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των δειγμάτων ιλύος

Από τον προσδιορισμό των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών των δειγμάτων πρωτοβάθμιας ιλύος και αναερόβια χωνεμένης ιλύος, προκύπτει ότι η πρωτοβάθμια ιλύς παρουσιάζει σχετικά υψηλή περιεκτικότητα σε πτητικά στερεά (VS) ίση με 3.22±0.38 % (Πίνακας 1), γεγονός που υποδηλώνει ότι κατά την αναερόβια χώνευση μπορεί να προκύψουν σχετικά υψηλοί ρυθμοί παραγωγής μεθανίου. Το υψηλό δυναμικό παραγωγής μεθανίου αποδεικνύεται επίσης από τα αποτελέσματα της ανάλυσης των VFA, εκφραζόμενα σε mg/L οξικού οξέος, όπου η πρωτοβάθμια ιλύς που μελετήθηκε σε αυτήν την εργασία εμφανίζει κατά 61 % υψηλότερη συγκέντρωση VFA έναντι δειγμάτων μίγματος πρωτοβάθμιας-δευτεροβάθμιας ιλύος που αναφέρονται σε άλλες εργασίες [18].

Πίνακας 1. Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά πρωτοβάθμιας και αναερόβια χωνεμένης ιλύος

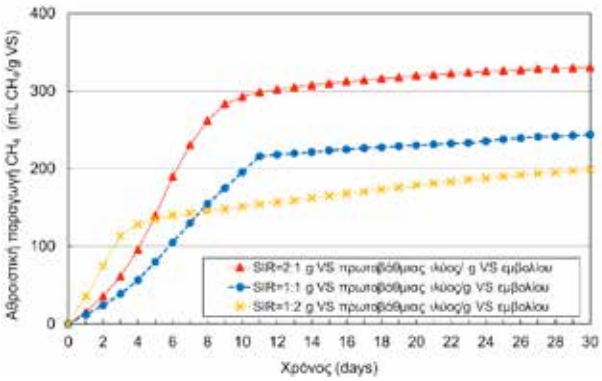
Παράμετροι	Αναερόβια χωνεμένη ιλύς	Πρωτοβάθμια ιλύς
Ολικά στερεά, TS (%)	2.15±0.19	4.34±0.53
Πτητικά στερεά, VS (%)	1.36±0.16	3.22±0.38
pH	7.78±0.18	6.47±0.04
Αγωγιμότητα (mS/cm)	9.09±1.45	5.83±1.14
Αλκαλικότητα (mg/L $CaCO_3$)	2240 ±254	1000±42.43
Πτητικά λιπαρά οξέα, VFA (mg/L οξικού οξέος)	336±33.94	696±33.94
NH_4-N (mg/L)	565.50±106.77	110.25±31.32
Ολικός Φώσφορος, TP (mg/L)	227.05±34.42	194.00±16.7
Οργανικός άνθρακας (%)	23.89±6.43	35.45±6.38
Οργανική ουσία (%)	41.19±11.09	61.11±11.01
Χημικά απαιτούμενο οξυγόνο, COD (mg/L)	18120±2828	45600±4186

Παράμετροι	Αναερόβια χωνεμένη ιλύς	Πρωτοβάθμια ιλύς
N (%)	3.55±1.06	3.15±0.07
C (%)	29.00±1.84	43.00±0.28
C/N (%)	8.52±2.09	13.70±0.15
Capillary Suction Time, CST (s)	32.20±8.49	52.30±13.44

Το pH και η αλκαλικότητα της πρωτοβάθμιας ιλύος παρουσιάζουν κατάλληλες τιμές για αναερόβια χώνευση, ενώ παράλληλα οι συγκεντρώσεις ιόντων αμμωνίου είναι χαμηλές για να προκαλέσουν τοξικότητα. Επιπλέον η πρωτοβάθμια ιλύς παρουσιάζει σχετικά υψηλή συγκέντρωση άνθρακα ίση με 43.00±0.28 % και σχετικά χαμηλή περιεκτικότητα σε άζωτο περίπου 3.15±0.07 %, τέλος ο λόγος άνθρακα προς άζωτο βρέθηκε να είναι υψηλότερος (C/N= 13.7±0.15 %) σε σχέση με άλλες εργασίες [19], [20]. Η μέτρηση CST εφαρμόστηκε για τον υπολογισμό της ικανότητας αφυδάτωσης πριν και μετά την αναερόβια χώνευση. Το δείγμα αναερόβια χωνεμένης ιλύος έδειξε χαμηλότερη τιμή (32.2±8.49 s) σε σύγκριση με την πρωτοβάθμια ιλύ (52.3±13.44 s). Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 1 έρχονται σε συμφωνία με αποτελέσματα άλλων εργασιών [18].

3.2. Δοκιμές βιοχημικού δυναμικού μεθανίου (BioMethane Potential, BMP)

Η χρήση τριών διαφορετικών λόγων πρωτοβάθμιας ιλύος προς εμβόλιο ίσων με 2:1, 1:1 και 1:2 g VS πρωτοβάθμιας ιλύος /g VS εμβολίου, εξετάστηκαν προκειμένου να εκτιμηθεί η δυνατότητα παραγωγής μεθανίου από κλάσματα πρωτοβάθμιας ιλύος. Τα αποτελέσματα που αντιστοιχούν στην αθροιστική παραγωγή μεθανίου για τους τρείς διαφορετικούς λόγους παρουσιάζονται στο Σχήμα 1. Αρχικά, η αθροιστική παραγωγή μεθανίου για τον λόγο SIR= 1:2 g VS πρωτοβάθμιας ιλύος /g VS εμβολίου ήταν υψηλότερη σε σύγκριση με τους άλλους δύο λόγους και αυτή η συμπεριφορά παρέμεινε σταθερή για τις πρώτες τέσσερεις ημέρες της διαδικασίας, ενώ μετά την περίοδο αυτή, η παραγωγή μεθανίου επιβραδύνθηκε. Από την άλλη πλευρά, ενώ η αθροιστική παραγωγή μεθανίου για τα SIR = 1:1, 1:2 g VS πρωτοβάθμιας ιλύος /g VS εμβολίου κατά τις πρώτες ημέρες ήταν χαμηλή, διήρκεσε περισσότερο και παρατηρήθηκε σημαντική μείωση της παραγωγής από τη δωδέκατη ημέρα. Ο μέγιστος ρυθμός παραγωγής μεθανίου για το SIR=2:1 g VS πρωτοβάθμιας ιλύος /g VS εμβολίου καταγράφηκε την 6η μέρα (50.3±0.9 mL CH_4/g VS/d), για το SIR= 1:1 g VS πρωτοβάθμιας ιλύος /g VS εμβολίου από την 6η έως την 8η ημέρα από την έναρξη της ανάλυσης BMP, όπου η παραγωγή μεθανίου και για τις τρεις αυτές ημέρες ήταν ίση με 24.8±2.3 mL CH_4/g VS/d, και για το SIR=1:2 g VS πρωτοβάθμιας ιλύος /g VS εμβολίου την 3η ημέρα (39.3±0.5 mL CH_4/g VS/d).



Σχήμα 1. Αθροιστική παραγωγή CH4 για τους διάφορους λόγους πρωτοβάθμιας ιλύος προς εμβόλιο (SIR).

Τα πειράματα τερματίστηκαν την 30η ημέρα των δοκιμών, όταν πλέον ο ημερήσιος ρυθμός παραγωγής μεθανίου και για τους τρεις λόγους ήταν μικρότερος από 1% της αθροιστικής παραγωγής

μεθανίου. Στο τέλος των δοκιμών BMP, η αθροιστική παραγωγή μεθανίου για τις δοκιμές SIR= 2:1, 1:1 και 1:2 g VS πρωτοβάθμιας ιλύος /g VS εμβολίου αντιστοιχούσε σε 330.3±7.3, 243.5±26.0 και 198.8±0.8 mL CH_4/g VS.

Η κινητική της αναερόβιας επεξεργασίας για το σύνολο των δοκιμών προσομοιώθηκε με τη χρήση δύο θεωρητικών μοντέλων, το κινητικό μοντέλο πρώτης τάξης (Εξίσωση 2) και το τροποποιημένο μοντέλο Gompertz (Εξίσωση 3). Οι εκτιμώμενες παράμετροι όπως ο ρυθμός υδρόλυσης k (d^{-1}), η λανθάνουσα φάση λ (d), ο μέγιστος ρυθμός παραγωγής μεθανίου R_{max} (mL CH_4/ g VS/ d) και το μέγιστο δυναμικό παραγωγής μεθανίου P (mL CH_4/ g VS) παρουσιάζονται στον Πίνακα 2. Για το σύνολο των δοκιμών, η διάρκεια της λανθάνουσας φάσης υπολογίστηκε με ανάλυση μη γραμμικής παλινδρόμησης, σύμφωνα με το τροποποιημένο μοντέλο Gompertz (Εξίσωση 3). Ωστόσο στον Πίνακα 2 φαίνεται ότι για τη δοκιμή SIR=1:2 g VS πρωτοβάθμιας ιλύος /g VS εμβολίου η διάρκεια της λανθάνουσας φάσης παίρνει αρνητική τιμή. Οι αρνητικές τιμές που μπορεί να καταγραφούν κατά την προσομοίωση με τη χρήση του τροποποιημένου μοντέλου Gompertz οφείλονται στον τρόπο προσδιορισμού των δεδομένων της εξίσωσης και έχουν παρατηρηθεί σε πολλές μελέτες [21], [22]. Αυτές οι αρνητικές τιμές δεν έχουν καμία φυσική σημασία και εμφανίζονται όταν τα βιολογικά προϊόντα των μικροοργανισμών παράγονται σχεδόν αμέσως [21], γεγονός που υποδηλώνει ότι τα μεθανογόνα βακτήρια ήταν ενεργά, το υπόστρωμα εύκολα βιοαποικοδομήσιμο και ότι η λανθάνουσα φάση της ανάπτυξης των μεθανογόνων εμφανίστηκε ταχύτερα από ότι προέβλεψε το μοντέλο Gompertz [21], [22]. Το γεγονός ότι οι μικροοργανισμοί άρχισαν να λειτουργούν πλήρως σε σύντομο χρονικό διάστημα, πιθανώς οφείλεται στο γεγονός ότι το εμβόλιο προερχόταν από αναερόβιους αντιδραστήρες οι οποίοι λειτουργούσαν σε ικανοποιητικό επίπεδο.

Πίνακας 2. Αποτελέσματα εφαρμογής κινητικών μοντέλων για τους διαφορετικούς λόγους πρωτοβάθμιας ιλύος, προς εμβόλιο (SIR).

Παράμετροι	**SIR=2:1 g VS πρωτοβάθμιας ιλύος /g VS εμβολίου**	**SIR=1:1 g VS πρωτοβάθμιας ιλύος /g VS εμβολίου**	**SIR=1:2 g VS πρωτοβάθμιας ιλύος /g VS εμβολίου**
Πειραματικά προσδιοριζόμενη αθροιστική παραγωγή CH_4 (mL CH_4/g VS)	330.3±7.3	243.5±26.0	198.8±0.8
Πειραματικά προσδιοριζόμενο μέγιστο ποσοστό παραγωγής CH_4 (mL CH_4/g VS /d)	50.9±0.9	24.8±2.3	39.3±0.5
M_O (mL CH_4/g VS)	344.4±9.1	260.9±8.9	182.1±2.9
k (d^{-1})	0.140±0.01	0.110±0.01	0.232±0.02
R^2	0.952	0.954	0.944
P (mL CH_4/g VS)	322.9±1.5	237.4±1.5	180.3±3.5
R_{max} (mL CH_4/g VS)	46.0±1.4	26.9±0.9	20.2±2.6
λ (d)	1.8±0.1	1.9±0.2	-1.4±0.6
R^2	0.997	0.996	0.914

Ο ρυθμός υδρόλυσης (k) για το σύνολο των δοκιμών κυμάνθηκε μεταξύ 0.110-0.232 (d^{-1}), με τη δοκιμή SIR=1:2 g VS πρωτοβάθμιας ιλύος /g VS εμβολίου να παρουσιάζει την υψηλότερη τιμή. Το μέγιστο δυναμικό παραγωγής μεθανίου (P, mL CH_4/ g VS) καθώς και ο μέγιστος ρυθμός παραγωγής μεθανίου (R_{max}, mL CH_4/ g VS/ d) καταγράφηκαν για τη δοκιμή SIR=2:1 g VS πρωτοβάθμιας ιλύος /g VS εμβολίου, και αντιστοιχούσαν σε 322.9±1.5 mL CH_4/ g VS και 46.0 ±1.4 mL CH_4/ g VS /d. Η διάρκεια της λανθάνουσα φάσης (λ) για τις δοκιμές SIR=2:1 και 1:1 g VS πρωτοβάθμιας ιλύος /g VS εμβολίου ήταν πολύ χαμηλή, και αντιστοιχούσε σε 1.8±0.1 και 1.9±0.2 d, ενώ για η δοκιμή SIR=1:2 g VS πρωτοβάθμιας ιλύος /g VS εμβολίου η διάρκεια της λανθάνουσας φάσης ήταν ίση με -1,4±0.6 d.

Στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των στερεών υπολειμμάτων της δοκιμής BMP για τον λόγο SIR=2:1 g VS πρωτοβάθμιας ιλύος /g VS εμβολίου, για την οποία παρατηρήθηκε και η μέγιστη παραγωγή μεθανίου. Η συγκέντρωση των πτητικών στερεών μετά την

αναερόβια χώνευση ήταν ίση με 1.26±0.01 %, ποσοστό που αντιστοιχεί σε 47.33 % μείωση των VS. Επιπλέον σύμφωνα με τον Πίνακα 3 φαίνεται πως το υπόλειμμα της αναερόβιας χώνευσης παρουσιάζει σημαντική ποσότητα υπολειμματικών οργανικών οσίων που δεν αποσυντέθηκαν κατά τη διάρκεια της αναερόβιας χώνευσης, καθώς και σημαντικές συγκεντρώσεις αμμωνιακού αζώτου και φωσφόρου. Αυτό υποδηλώνει ότι τα παραγόμενα προϊόντα χώνευσης είναι κατάλληλα για περαιτέρω χρήση κυρίως σε γεωργικούς ή ενεργειακούς τομείς [18]. Τόσο το άζωτό όσο και ο φώσφορος αποτελούν απαραίτητα θρεπτικά στοιχεία για τα φυτά, με το αμμωνιακό άζωτο να αποτελεί μία μορφή αζώτου που μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα από αυτά. Ταυτόχρονα η οργανική ουσία της ιλύος μπορεί να ενισχύσει τα ελληνικά εδάφη στα οποία η συγκέντρωσή της είναι χαμηλή (περίπου ίση με 1%), να βελτιώσει την ικανότητα συγκράτησης νερού καθώς και να συνεισφέρει στην πλαστικότητα του εδάφους.

Πίνακας 3. Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των στερεών υπολειμμάτων της δοκιμής BMP για SIR=2:1 g VS πρωτοβάθμιας ιλύος/g VS εμβολίου.

SIR=2:1 g VS πρωτοβάθμιας ιλύος /g VS εμβολίου			
Παράμετρος	**Τιμή**	**Παράμετροι**	**Τιμή**
Ολικά στερεά, TS (%)	2.21±0.01	NH_4-N (mg/L)	982±78.1
Πτητικά στερεά, VS (%)	1.26±0.01	Ολικός Φώσφορος, TP (mg/L)	146±8.47
pH	7.50±0.03	Οργανικός άνθρακας (%)	25.19±1.3
Αγωγιμότητα (mS/cm)	10.70±0.05	Οργανική ουσία (%)	43.42±2.1
Αλκαλικότητα (mg/L $CaCO_3$)	3400±23		

3.3. Αποτελέσματα δοκιμών ανοδικής διήθησης EN 14405

Η δοκιμή ανοδικής διήθησης εφαρμόσθηκε για το στερεό υπόλειμμα της αναερόβιας χώνευσης σε SIR= 2:1 g VS πρωτοβάθμιας ιλύος/g VS εμβολίου, όπου παρατηρήθηκε η μέγιστη παραγωγή μεθανίου. Σκοπός της δοκιμής ήταν να μελετηθούν τα φυσικοχημικά και τα οικοτοξικολογικά χαρακτηριστικά των υγρών έκπλυσης του υλικού που μπορεί να προκύψουν κατά τη διάθεσή του στο έδαφος. Οι δοκιμές έγιναν σε αναλογία στερεού υπολείμματος/πρότυπου εδάφους ίση με 20% w/w. Στον Πίνακα 4 παρουσιάζονται η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου (DO), το δυναμικό οξειδοαναγωγής (ORP) και η αγωγιμότητα των υγρών έκπλυσης του μίγματος στερεού υπολείμματος/εδάφους και του εδάφους. Η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου κυμάνθηκε σε ιδιαίτερα χαμηλά επίπεδα, κάτω από 1 mg/L σε όλα τα κλάσματα έκπλυσης υποδηλώνοντας την ύπαρξη αναερόβιων συνθηκών στα υγρά έκπλυσης. Οι αναερόβιες συνθήκες στα υγρά έκπλυσης του μίγματος στερεού υπολείμματος εδάφους επιβεβαιώνονται και από το δυναμικό οξειδοαναγωγής το οποίο παρουσίασε αρνητικές τιμές, -229 έως -72 mV για τα κλάσματα αναλογίας 0.1 έως 5 L/kg, ενώ για το τελευταίο κλάσμα αναλογίας L/S= 10 L/kg ήταν 85 mV.

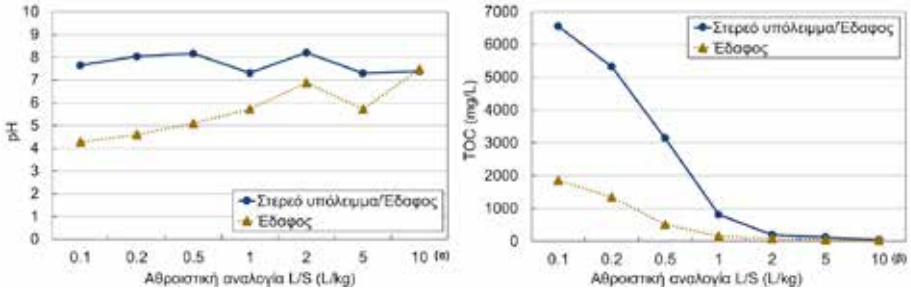
Πίνακας 4. Μεταβολή της συγκέντρωσης του DO του ORP και της αγωγιμότητας στα υγρά έκπλυσης του μίγματος στερεού υπολείμματος αναερόβιας χώνευσης/εδάφους και του εδάφους.

		Αναλογία L/S, L/kg						
		0.1	**0.2**	**0.5**	**1**	**2**	**5**	**10**
DO (mg/L)	Μίγμα στερεού υπολείμματος/εδάφους	0.20	0.19	0.18	0.16	0.14	0.16	0.72
	Έδαφος	1.07	4.71	1.26	1.16	6.97	7.06	7.02
ORP (mV)	Μίγμα στερεού υπολείμματος/εδάφους	-229	-215	-205	-123	-145	-72	85
	Έδαφος	220	195	192	180	168	170	211
Αγωγιμότητα (mS/cm)	Μίγμα στερεού υπολείμματος/εδάφους	104.2	62.3	30.1	3.13	1.08	0.56	0.35
	Έδαφος	1.24	0.85	039	0.11	0.05	0.03	0.06

Επίσης, οι ιδιαίτερα υψηλές τιμές αγωγιμότητας που παρατηρήθηκαν στα πρώτα κλάσματα έκπλυσης του μίγματος στερεού υπολείμματος/εδάφους οδηγούν στο συμπέρασμα ότι το στερεό υπόλειμμα της αναερόβιας χώνευσης περιέχει διάφορα υδατοδιαλυτά συστατικά τα οποία μπορεί να διαφύγουν από

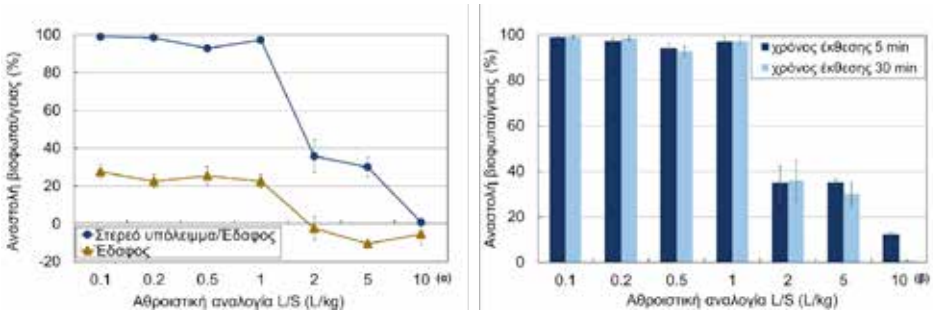
τη στερεή στην υγρή φάση, κατά το αρχικό στάδιο εφαρμογής του στερεού υπολείμματος στο έδαφος. Τέτοια συστατικά μπορεί να είναι θρεπτικά άλατα αζώτου και φωσφόρου, καθώς τα συγκεκριμένα συστατικά περιέχονται στο στερεό υπόλειμμα της αναερόβιας χώνευσης σε σχετικά υψηλές συγκεντρώσεις (Πίνακας 3).

Στο Σχήμα 2 παρουσιάζονται η μεταβολή του pH και της συγκέντρωσης του ολικού οργανικού άνθρακα (TOC) των υγρών έκπλυσης του μίγματος στερεού υπολείμματος/εδάφους και του εδάφους. Από τη μεταβολή του pH στα διάφορα κλάσματα έκπλυσης, παρατηρείται ότι η εφαρμογή του στερεού υπολείμματος της αναερόβιας χώνευσης στο έδαφος μπορεί να ρυθμίσει το pH του εδάφους, καθώς το pH των υγρών έκπλυσης του μίγματος παρουσίασε μικρή διακύμανση σε σχέση με το pH του εδάφους. Το pH του μίγματος στα διάφορα κλάσματα έκπλυσης ήταν μεταξύ 7.30 και 8.20, ενώ το pH του εδάφους παρουσίασε σχετικά υψηλή διακύμανση, από 4.27 για το πρώτο κλάσμα αναλογίας 0.1 L/kg έως 7.47 για το κλάσμα αναλογίας 10 L/kg. Επιπλέον, στα υγρά έκπλυσης του μίγματος στερεού υπολείμματος/εδάφους, παρατηρήθηκαν σχετικά υψηλές συγκεντρώσεις TOC, ιδιαίτερα στα πρώτα τρία κλάσματα έκπλυσης αναλογίας 0.1, 0.2 και 0.5 L/kg, όπου η συγκέντρωση του TOC ήταν υψηλότερη από 3000 mg/L. Σε παρόμοια μελέτη εφαρμογής δευτεροβάθμιας ιλύος στο έδαφος [23] οι τιμές του TOC που ανιχνεύτηκαν ήταν χαμηλότερες (2860 mg/L για το πρώτο κλάσμα έκπλυσης, αναλογίας L/S= 0.1 L/kg).



Σχήμα 2. Μεταβολή του pH (α) και της συγκέντρωση ολικού οργανικού άνθρακα (β) στα υγρά έκπλυσης του μίγματος στερεού υπολείμματος της αναερόβιας χώνευσης/εδάφους και του εδάφους (μάρτυρας)

Για τη μελέτη της οικοτοξικότητας των υγρών έκπλυσης που προέκυψαν από την εφαρμογή της ανοδικής διήθησης χρησιμοποιήθηκαν το φωτοβακτήριο *V. fischeri* και το καρκινοειδές *D. magna*. Η δοκιμή με το φωτοβακτήριο *V. fischeri* εφαρμόστηκε για όλα τα κλάσματα έκπλυσης, ενώ η δοκιμή με το καρκινοειδές *D. magna* για τα κλάσματα αναλογίας L/S= 2, 5 και 10 L/kg, καθώς στις μικρότερες αναλογίες η ποσότητα του υγρού (<50 mL) δεν επαρκούσε για την εφαρμογή της δοκιμής. Το υγρό κλάσμα έκπλυσης του μίγματος στερεού υπολείμματος/εδάφους αναλογίας L/S=2 L/kg, παρουσίασε 35 % τοξικότητα στο καρκινοειδές *D. magna*, ενώ στις μεγαλύτερες αναλογίες δεν παρατηρήθηκε σημαντική τοξική δράση. Επίσης, τα υγρά έκπλυσης του εδάφους (μάρτυρας) δεν παρουσίασαν καμία τοξική δράση στο καρκινοειδές *D. magna*. Τα υγρά κλάσματα έκπλυσης του μίγματος στερεού υπολείμματος/εδάφους αναλογίας 0.1 έως 1 L/kg παρουσίασαν σημαντική τοξική δράση (αναστολή της βιοφωταύγειας >97 %) στο φωτοβακτήριο *V. fischeri* (Σχήμα 3α). Ωστόσο, στις αναλογίες L/S= 2 και 5 L/kg η τοξικότητα των υγρών έκπλυσης ήταν 30-35 %, ενώ στο τελευταίο κλάσμα αναλογίας 10 L/kg δεν παρατηρήθηκε σημαντική αναστολή της βιοφωταύγειας των βακτηρίων. Τα υγρά κλάσματα έκπλυσης του εδάφους προκάλεσαν μικρή αναστολή της βιοφωταύγειας των βακτηρίων (<25 %) σε αναλογίες L/S μικρότερες από 1 L/kg, ενώ σε μεγαλύτερες αναλογίες παρατηρήθηκε έως 10 % διέγερση της βιοφωταύγειας. Στη μελέτη των Σακαβέλη κ.ά. [23], αν και οι συγκεντρώσεις του TOC που ανιχνεύτηκαν στα υγρά έκπλυσης ήταν συγκριτικά χαμηλότερες από τις αντίστοιχες συγκεντρώσεις της παρούσας μελέτης, η τοξικότητα που παρατηρήθηκε στους οργανισμούς *V. fischeri* και *D. magna* ήταν υψηλότερη [23].

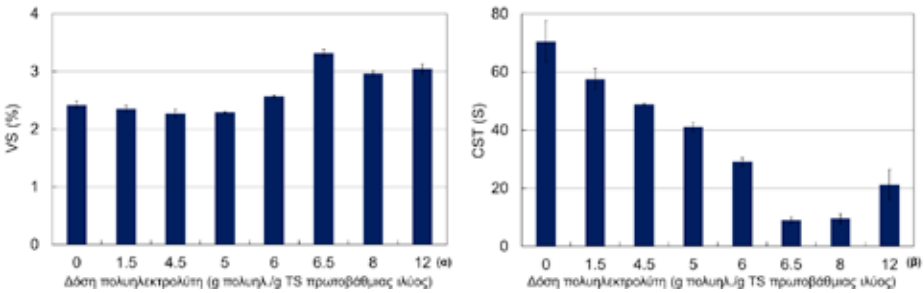


Σχήμα 3. Τοξικότητα των υγρών έκπλυσης του μίγματος στερεού υπολείμματος/εδάφους στο φωτοβακτήριο V. fischeri για χρόνο έκθεσης των φωτοβακτηρίων 30 min (α) και επίδραση του χρόνου έκθεσης στην τοξικότητα των υγρών έκπλυσης (β)

Ο χρόνος έκθεσης των φωτοβακτηρίων στα υγρά κλάσματα έκπλυσης δεν φαίνεται να επηρεάζει σημαντικά την τοξικότητά τους (Σχήμα 3β), υποδηλώνοντας ότι η τοξικότητα προέρχεται από τη δράση οργανικών ουσιών [11], [24]. Η εμφάνιση τοξικότητας λόγω της παρουσίας οργανικών ουσιών επιβεβαιώνεται κι από τις υψηλές συγκεντρώσεις TOC που ανιχνεύτηκαν στα περισσότερα υγρά κλάσματα έκπλυσης. Επίσης, η μικρή επίδραση των υγρών έκπλυσης στο καρκινοειδές *D. magna*, επιβεβαιώνει την απουσία βαρέων μετάλλων σε συγκεντρώσεις που μπορεί να είναι τοξικές στους δύο οργανισμούς, καθώς το καρκινοειδές παρουσιάζει μεγαλύτερη ευαισθησία στα βαρέα μέταλλα σε σχέση με το φωτοβακτήριο [11]. Επίσης, η παρουσία οργανικών ουσιών στα υγρά έκπλυσης (π.χ. χουμικές ενώσεις), όπως επιβεβαιώνεται και από τις σχετικά υψηλές τιμές TOC που ανιχνεύτηκαν (Σχήμα 2β), μπορεί μέσω του σχηματισμού σύμπλοκων ενώσεων να μειώσει τη βιοδιαθεσιμότητα των βαρέων μετάλλων και κατά συνέπεια την τοξικότητά τους [25]. Ωστόσο, στο τελευταίο κλάσμα έκπλυσης αναλογίας L/S= 10 L/kg, όπου η συγκέντρωση του οργανικού άνθρακα ήταν η χαμηλότερη (45 mg/L TOC), ο χρόνος έκθεσης φαίνεται να επηρεάζει σημαντικά τη φωταύγεια των βακτηρίων, υποδηλώνοντας τη δράση ανόργανων συστατικών [11].

3.4. Επίδραση της κροκίδωσης στα χαρακτηριστικά της πρωτοβάθμιας ιλύος

Στόχος της διεργασίας της κροκίδωσης ήταν ο προσδιορισμό του βαθμού στον οποίο θα μπορούσε να εφαρμοστεί η διεργασία για την αύξηση της συγκέντρωσης των πτητικών στερεών (VS) της πρωτοβάθμιας ιλύος, πριν την αναερόβια χώνευση. Η προσθήκη πολυηλεκτρολύτη σε συγκέντρωση 6.5 g πολυηλεκτρολύτη/kg TS πρωτοβάθμιας ιλύος οδήγησε σε 37.3 % αύξηση των πτητικών στερεών (Σχήμα 4α), γεγονός που υποδεικνύει ότι μέρος των οργανικών ουσιών περνάει από την υγρή στην στερεή φάση της ιλύος. Για δόσεις πολυηλεκτρολύτη μεγαλύτερες από 6.5 g πολυηλεκτρολύτη/kg TS πρωτοβάθμιας ιλύος παρατηρείται μείωση της συγκέντρωσης των VS. Επιπλέον, η προσθήκη του πολυηλεκτρολύτη φαίνεται να βελτιώνει σημαντικά την αφυδατοσιμότητα της ιλύος (Σχήμα 4β), καθώς η τιμή του CST μειώθηκε από 70.5 s για την ανεπεξέργαστη ιλύ σε 9 s για τη δόση 6.5 g πολυηλεκτρολύτη/kg TS πρωτοβάθμιας ιλύος. Ωστόσο, για υψηλότερες δόσεις κροκιδωτικού ο χρόνος CST φαίνεται να αυξάνεται. Το φαινόμενο αυτό έχει παρατηρηθεί και σε άλλες αντίστοιχες μελέτες [26], [27] στις οποίες, όπως αναφέρεται, η υπερδοσολογία του πολυμερούς μπορεί οδηγήσει σε σημαντική επιδείνωση τις διεργασίας πάχυνσης και αφυδάτωσης της ιλύος. Συγκέντρωση πολυηλεκτρολύτη περίπου 0.2 g πολυηλεκτρολύτη/L πρωτοβάθμιας ιλύος (περίπου 5.5 g/kg TS) έχει χρησιμοποιηθεί και από τους Sakaveli et al. [18] για τη μελέτη της αναερόβιας χώνευσης της πρωτοβάθμιας ιλύος σε αναλογίες υποστρώματος προς εμβόλιο SIR=1:1 και 1:2 g VS πρωτοβάθμιας ιλύος/g VS εμβολίου. Στη συγκεκριμένη μελέτη, η μέγιστη παραγωγή μεθανίου παρατηρήθηκε στην αναλογία SIR=1:1, ενώ η προσθήκη πολυηλεκτρολύτη είχε ως αποτέλεσμα τη σημαντική αύξηση της παραγωγής μεθανίου.



Σχήμα 4. Επίδραση της δόσης πολυηλεκτρολύτη στην περιεκτικότητα των πτητικών στερών VS (α) και στον χρόνο τριχοειδούς αναρρόφησης CST (β).

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στόχος της παρούσας εργασίας ήταν η μελέτη της αναερόβιας χώνευσης της πρωτοβάθμιας ιλύος, καθώς και η αξιολόγηση της εφαρμογής του παραγόμενου στερεού υπολείμματος της αναερόβιας χώνευσης στο έδαφος. Η μελέτη της αναερόβιας χώνευσης σε διάφορες αναλογίες VS πρωτοβάθμιας ιλύος/VS εμβολίου, έδειξε ότι η μέγιστη παραγωγή μεθανίου επιτυγχάνεται για αναλογία 2:1 g VS πρωτοβάθμιας ιλύος/g VS εμβολίου. Για τη συγκεκριμένη αναλογία, η εφαρμογή του στερεού υπολείμματος της αναερόβιας χώνευσης στο έδαφος μπορεί να συνεισφέρει στη βελτίωση των ιδιοτήτων του εδάφους. Πιο συγκεκριμένα η δοκιμή της ανοδικής διήθησης εδάφους που περιείχε στερεό υπόλειμμα της αναερόβιας χώνευσης (20% w/w) έδειξε ότι το στερεό υπόλειμμα μπορεί να ρυθμίσει το pH του εδάφους και να προσδώσει διάφορα οργανικά και θρεπτικά συστατικά. Τα υγρά έκπλυσης που προέκυψαν από την εφαρμογή της ανοδικής διήθησης παρουσίασαν υψηλή τοξικότητα στο φωτοβακτήριο *V. fischeri* κατά τα αρχικά στάδια της έκπλυσης, λόγω του υψηλού οργανικού φορτίου που περιείχαν. Ωστόσο, η τοξικότητα των κλασμάτων έκπλυσης αναλογίας υγρού/στερεού μεγαλύτερης από 1 L/kg παρουσίασαν μικρή τοξική δράση στο φωτοβακτήριο *V. fischeri* και στο καρκινοειδές *D. magna*. Η εφαρμογή του στερεού υπολείμματος της αναερόβιας χώνευσης στο έδαφος σε περιεκτικότητα μικρότερη από αυτήν που εφαρμόστηκε στην παρούσα μελέτη, θα μπορούσε να οδηγήσει σε χαμηλότερη τοξικότητα των υγρών έκπλυσης ακόμη και στα αρχικά στάδια της έκπλυσης, διατηρώντας ταυτόχρονα και τις θετικές επιδράσεις στις ιδιότητες του εδάφους. Επιπλέον, η διεργασία της κροκίδωσης θα μπορούσε να εφαρμοστεί ως ένα στάδιο προεπεξεργασίας της πρωτοβάθμιας ιλύος, καθώς αυξάνει την περιεκτικότητα σε πτητικά στερεά καθιστώντας τη διεργασία της αναερόβιας χώνευσης της πρωτοβάθμιας ιλύος πιο ευέλικτη στην εφαρμογή της στις υφιστάμενες εγκαταστάσεις αναερόβιας επεξεργασίας και πιο αποδοτική.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Turovskiy, I. S., and Mathai, P. K., 2005, Wastewater Sludge Processing, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

[2] Filer, J., Ding, H. H., and Chang, S., 2019, “Biochemical Methane Potential (BMP) Assay Method for Anaerobic Digestion Research,” Water, 11(5), pp. 921.

[3] Wei, W., Guo, W., Ngo, H.H., Mannina, G., Wang, D., Chen, X., Liu, Y., Peng, L., and Ni, B.J., 2020, “Enhanced high-quality biomethane production from anaerobic digestion of primary sludge by corn stover biochar,” Bioresour. Technol.,306, pp. 123159.

[4] Angelidaki, I., Alves, M., Bolzonella, D., Borzacconi, L., Campos, J.L., Guwy, A.J., Kalyuzhnyi, S., Jenicek, P., and Van Lier, J.B., 2009, “Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: A proposed protocol for batch assays,” Water Sci. Technol., 59(5), pp. 927–934.

[5] Holliger, C., Alves, M., Andrade, D., Angelidaki, I., Astals, S., Baier, U., Bougrier, C., Buffière, P., Carballa, M., De Wilde, V., et al., 2016, “Towards a standardization of biomethane potential tests,” Water Sci. Technol., vol. 74, no. 11, pp. 2515–2522.

[6] Koch, K., Hafner, S. D., Weinrich, S., and Astals, S., 2019, “Identification of Critical Problems in Biochemical Methane Potential (BMP) Tests from Methane Production Curves,” Front. Environ. Sci., 7, pp. 1–8.

[7] Elbeshbishy, E., Nakhla, G., and Hafez, H., 2012, “Biochemical methane potential (BMP) of food waste and primary sludge: Influence of inoculum pre-incubation and inoculum source,” Bioresour. Technol., 110, pp. 18–25.

[8] Mininni, G, Braguglia, C. M., Ramadori, R., and Tomei, M. C., 2004, “An innovative sludge management system based on separation of primary and secondary sludge treatment,” Water Sci. Technol., 50(9), pp. 145–153.

[9] Skowrońska, M., Bielińska, E. J., Szymański, K., Futa, B, Antonkiewicz, J., and Kołodziej, B., 2020, “An integrated assessment of the long-term impact of municipal sewage sludge on the chemical and biological properties of soil,” CATENA, 189, pp. 104484.

[10] Fang, W., Delapp, R. C., Kosson, D. S., van der Sloot, H. A., and Liu, J., 2017, “Release of heavy metals during long-term land application of sewage sludge compost: Percolation leaching tests with repeated additions of compost,” Chemosphere,169, pp. 271–280.

[11] Tsiridis, V., Petala, M., Samaras, P., Kungolos, A., and Sakellaropoulos, G. P., 2012, “Environmental hazard assessment of coal fly ashes using leaching and ecotoxicity tests,” Ecotoxicol. Environ. Saf., vol. 84, pp. 212–220.

[12] Liang, Y., Xu, L., Bao, J., Firmin, K. A., and Zong, W., 2020, “Attapulgite enhances methane production from anaerobic digestion of pig slurry by changing enzyme activities and microbial community,” Renew. Energy, vol. 145, pp. 222–232.

[13] OECD, 1984, Guidelines for the Testing of Chemicals: Test No. 207: Earthworm, Acute Toxicity Tests., Paris, France, pp. 1–9.

[14] Microbics, 1992, Microtox Manual – A Toxicity Handbook. Carlsbad, USA: Microbics Corporation Inc.

[15] ISO 6341:1996, 1996, Water quality — Determination of the inhibition of the mobility of Daphnia magna Straus (Cladocera, Crustacea) — Acute toxicity test. International Organization for Standardization.

[16] Rice, E. W., Baird, R. B., Eaton, A. D., and Clesceri, L. S., 2012, Standard Methods for examination of water and wastewater., 22nd ed. Washington, DC.: American Public Health Association (APHA).

[17] Walkley, A. and Black, I. A., 1934, “An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method,” Soil Sci., 37(1), pp. 29–38.

[18] Sakaveli, F., Petala, M., Tsiridis, V., and Darakas, E., 2021, “Enhanced Mesophilic Anaerobic Digestion of Primary Sewage Sludge,” pp. 348.

[19] Martínez, E. J., Sotres, A., Arenas, C. B., Blanco, D., Martínez, O., and Gómez, X., 2019, “Improving anaerobic digestion of sewage sludge by hydrogen addition: Analysis of microbial populations and process performance,” Energies, 12(7), pp. 1228.

[20] Elsayed, M., Andres, Y., Blel, W., Gad, A., and Ahmed, A., 2016, “Effect of VS organic loads and buckwheat husk on methane production by anaerobic co-digestion of primary sludge and wheat straw,” 117, pp. 538–547.

[21] Shen, J. and Jun, Z., 2017, “Development of General Gompertz Models and Their Simplified Two-Parameter Forms Based on Specific Microbial Growth Rate for Microbial Growth, Bio-Products and Substrate Consumption,” Adv. Biotechnol. Microbiol., 4(3).

[22] Jijai, S., Srisuwan, G., O-thong, S., Norli, I., and Siripatana, C., 2016, “Iranica Journal of Energy & Environment Effect of Substrate and Granules / Inocula Sizes on Biochemical Methane Potential and Methane Kinetics,” Iran. J. Energy Environ. J., 7(2), pp. 94–101.

[23] Σακαβέλη, Φ., Τσιρίδης, Β., Πεταλά, Μ., και Νταρακάς, Ε., 2018, “Δοκιμές έκπλυσης και οικοτοξικότητα δειγμάτων ιλύος από εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων,” Υδροτεχνικά, 27, pp. 29–40.

[24] Petala, M., Tsiridis, V., Kyriazis, S., Samaras, P., Kungolos, A., and Sakellaropoulos, G. P., 2005, “Evaluation of Toxic Response of Heavy Metals and Organic Pollutants Using Microtox Acute Toxicity Test,” in Process Engineering, pp. 1–3.

[25] Tsiridis, V., Petala, M., Samaras, P., Hadjispyrou, S., Sakellaropoulos, G., and Kungolos, A., 2006, “Interactive toxic effects of heavy metals and humic acids on Vibrio fischeri,” Ecotoxicol. Environ. Saf., 63(1), pp. 158–167.

[26] Chang, G. R., Liu, J. C., and Lee, D. J., 2001, “CO-conditioning and dewatering of chemical sludge and waste activated sludge,” Water Res., 35(3), pp. 786–794.

[27] Lee, C. H. and Liu, J. C., 2000, “Enhanced sludge dewatering by dual polyelectrolytes conditioning,” Water Res., 34(18), pp. 4430–4436.

ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΕΝΑΝΤΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΛΙΠΑΣΜΑΤΟΣ ΛΥΜΑΤΟΛΑΣΠΗΣ

Φ.Ζ. Μορσίνκ-Γεωργαλή[1], Α. Κυλίλη[1], Π. Α. Φωκαΐδης[1]

[1]Σχολή Μηχανικής και Εφαρμοσμένων Επιστημών, Πανεπιστήμιο Frederick
Φρειδερίκου 7, 1036, Λευκωσία, Κύπρος

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η θέσπιση της οδηγίας για την επεξεργασία των αστικών λυμάτων οδήγησε σε μια τεράστια αυξανόμενη ποσότητα ιλύς λυμάτων που παράγεται από εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων. Διάφορες νομοθεσίες και στρατηγικές, με πιο πρόσφατη την «Εκ των υστέρων αξιολόγηση ορισμένων οδηγιών για τη ροή αποβλήτων», ελήφθησαν προκειμένου να εκπληρωθούν κατάλληλα οι απαιτήσεις που απορρέουν από αυτή την οδηγία, με οικονομικά και περιβαλλοντικά αποδεκτό τρόπο.

Η εργασία αυτή εστιάζει στην εκτίμηση και τη σύγκριση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της εκμετάλλευσης της ιλύος λυμάτων, η οποία παράγεται κατά την επεξεργασία μονάδας αστικών λυμάτων, για την παραγωγή λιπάσματος - κομπόστ και τη χρήση αναερόβιου χωνευτήρα για την παραγωγή βιοαερίου. Η υποστήριξη της δημόσιας χρηματοδότησης για διεργασίες αποβλήτων σε ενέργεια (συμπεριλαμβανομένων προτάσεων για τη μείωση της υγειονομικής ταφής και υψηλότερων στόχων ανακύκλωσης αστικών και συσκευασίας απορριμμάτων) πρέπει να είναι σύμφωνη με τη μετατόπιση προς τα άνω στην εφαρμογή της ιεραρχίας αποβλήτων της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Αυτές οι διαδικασίες, είτε σε εθνικό είτε σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης, θα μπορούσαν να επικεντρωθούν στη μέγιστη συμβολή της κυκλικής οικονομίας, τόσο περιβαλλοντικά όσο και οικονομικά. Σύμφωνα με αυτό, η πρόληψη, η επαναχρησιμοποίηση και η ανακύκλωση των αποβλήτων είναι οι κύριες προτεραιότητες. Αποτελούν επίσης βασικούς στόχους τόσο του σχεδίου δράσης όσο και της νομοθετικής δέσμης για τα απόβλητα, σύμφωνα με τη στρατηγική της Ενεργειακής Ένωσης και τη συμφωνία του Παρισιού. (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, ανακοίνωση 2017/34). Η περιβαλλοντική εκτίμηση των δύο εναλλακτικών οδών, ακολούθως της επεξεργασίας, θα πραγματοποιηθεί με τη χρήση της μεθοδολογίας ανάλυσης κύκλου ζωής (ΑΚΖ) και σύμφωνα με το Πρότυπο ISO 14040 (EN ISO, 2006). Στα πλαίσια της εργασίας αυτής, θα επιχειρηθεί μια στοχευμένη παρουσίαση της επεξεργασίας ιλύος λυμάτων των δύο διαδικασιών, σύμφωνα με το έγγραφο αναφοράς βέλτιστων διαθέσιμων τεχνικών (ΒΔΤ) για την επεξεργασία αποβλήτων.

Λέξεις κλειδιά: Ιλύς λυμάτων, Αστικά Λύματα, Εκτίμηση Κύκλου Ζωής, Βιοαέριο, Λίπασμα – Κομπόστ

1. Εισαγωγή

Παρά την υψηλή περιεκτικότητά της σε οργανικές ουσίες και θρεπτικά συστατικά, η ιλύς λυμάτων (ΙΛ) - το υποπροϊόν της διαδικασίας επεξεργασίας λυμάτων - περιέχει αρκετές μολυσματικές ουσίες που είναι επιζήμιες για το φυσικό περιβάλλον, εάν εφαρμοστούν απευθείας σε γεωργική γη. Κατά συνέπεια, έχουν αναπτυχθεί ποικίλοι τρόποι επεξεργασίας και διαχείρισης για τη σταθεροποίηση και την ασφαλή ανακύκλωση και απόρριψη της ιλύος λυμάτων, οι οποίοι επίσης οδηγούν στην ανάκτηση πόρων και την παραγωγή ενέργειας (Cieślik et al., 2015; Raheem et al., 2018). Η αναερόβια χώνευση (ΑΧ) είναι μια από τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες για την ανάκτηση ενέργειας και πόρων (Raheem et al., 2018). Η παραγωγή λιπάσματος από ιλύ λυμάτων είναι ένας άλλος συνήθης τρόπος αντιμετώπισης και ασφαλούς απόρριψης της ιλύος λυμάτων και ταυτόχρονα υποστήριξης της βιώσιμης γεωργίας.

Η ΑΧ είναι η πιο κοινή τεχνική επεξεργασίας για τη σταθεροποίηση της λυματολάσπης και μια βιώσιμη επιλογή για τη διαχείριση των αποβλήτων βιομάζας, αφού οδηγεί σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, καθώς και στην ανακύκλωση θρεπτικών ουσιών και τη μείωση του αριθμού πτητικών στερεών (Athanasoulia et al., 2012, Liu et al., 2012). Η αναβάθμιση βιοαερίου αποτελεί επίσης μια σημαντική πρόκληση σε αυτόν τον τομέα.

Κατά τη διαδικασία κομποστοποίησης, πρόκληση αποτελούν οι μεγάλες απώλειες αζώτου ως αποτέλεσμα της υψηλής περιεκτικότητας σε υγρασία και της χαμηλής αναλογίας άνθρακα - αζώτου (Jiang et al., 2011, Yuan et al., 2016). Επομένως, είναι κοινή πρακτική η συν-κομποστοποίηση της λυματολάσπης με παράγοντες διόγκωσης που βελτιώνουν τη διαδικασία κομποστοποίησης και τη συνολική ποιότητα του τελικού προϊόντος (Roberts et al., 2007; Doublet et al., 2011; Guo et al., 2012; Zhang et al., 2017).

Η ανοικτή μονάδα κομποστοποίησης είναι η συμβατική τεχνολογία που χρησιμοποιείται για την παραγωγή λιπάσματος. Δεδομένου ότι η δημιουργία οσμών είναι αναπόφευκτη, αυτές οι εγκαταστάσεις πρέπει να κατασκευάζονται σε μεγάλες αποστάσεις από όμορα ακίνητα, λαμβάνοντας υπόψη τους ανέμους που επικρατούν στην περιοχή (Forgie et al., 2004). Μια εναλλακτική λύση είναι η επεξεργασία ιλύς λυμάτων με τεχνολογίες κλειστού τύπου που χρησιμοποιούν συστήματα τεχνητού αερισμού και μεταχείρισης οσμών (Roberts et al., 2007; McMahon et al., 2008; Farrell and Jones, 2010; Avidov et al., 2017; Avidov et al., 2018). Χρησιμοποιώντας αυτή την τεχνολογία επιτυγχάνονται μειώσεις στην παραγωγή αερολυμάτων και εκπλυμάτων, καθώς επίσης επιτρέπεται ένας καλύτερος έλεγχος της διαδικασίας (Roberts et al., 2007).

Στην παρούσα εργασία εξετάζονται και ποσοτικοποιούνται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της εκμετάλλευσης ιλύος λυμάτων, δημιουργούμενη κατά την επεξεργασία μονάδας αστικών λυμάτων, για την παραγωγή λιπάσματος - κομπόστ (Σ1) και την παραγωγή βιοαερίου με τη χρήση αναερόβιου χωνευτήρα (Σ2). Δεδομένου ότι υπάρχουν πολλοί τρόποι παραγωγής βιοαερίου, καθώς και λιπάσματος, αυτή η μελέτη επικεντρώνεται στις Βέλτιστες Διαθέσιμες Τεχνικές (ΒΔΤ) και των δύο διαδικασιών.

2. Θεωρητικό υπόβαθρο

2.1 Βέλτιστες Διαθέσιμες Τεχνικές για βιολογική επεξεργασία ιλύος λυμάτων

Η βιολογική επεξεργασία θεωρείται επιτυχής μόνο όταν τα απόβλητα δεν είναι επιβλαβή για τη βιοτική κοινότητα και συμμορφώνονται στο πλαίσιο αρκετών σημαντικών συνθηκών, όπως το εύρος του pH, την αναλογία άνθρακα - αζώτου, και την περιεκτικότητα σε οξυγόνο (Pace & Farrell-Poe, 1995). Σύμφωνα με το έγγραφο αναφοράς των ΒΔΤ για την επεξεργασία αποβλήτων, οι δύο διεργασίες αερόβιας και αναερόβιας επεξεργασίας αποβλήτων ΙΛ που εξετάζονται σε αυτή την εργασία έχουν πολλές ομοιότητες. Έχουν όμως εξίσου σημαντικές διαφορές, όσον αφορά τα αποτελέσματα που προκύπτουν και την περαιτέρω χρήση τους (τεχνική καθοδήγηση ΥΠΠΣ).

2.1.1 Αερόβια επεξεργασία: διαδικασία κομποστοποίησης

Η μετατροπή των βιοαποικοδομήσιμων αποβλήτων σε λίπασμα - κομπόστ (μια μικροβιακή διαδικασία) με αερόβια επεξεργασία είναι η φυσική διαδικασία βιολογικής αποικοδόμησης κατά την οποία τα βακτήρια που ευδοκιμούν σε περιβάλλοντα πλούσια σε οξυγόνο διασπώνται και αφομοιώνουν τα απόβλητα σε διοξείδιο του άνθρακα, νερό, νιτρικά και θειικά άλατα.

Η αερόβια επεξεργασία της ΙΛ αποτελείται από τέσσερα κύρια στάδια:

- Υποδοχή
- Προετοιμασία
- Κομποστοποίηση
- Τελικό στάδιο

Το στάδιο της υποδοχής περιλαμβάνει την προ-αποδοχή και αποδοχή κατάλληλων αποβλήτων για κομποστοποίηση. Επίσης, σε αυτή τη διαδικασία συμπεριλαμβάνονται ο έλεγχος και η απομάκρυνση απορριμμάτων (Pinasseau et al., 2010), οπότε και λαμβάνονται μέτρα για την αποτροπή ακατάλληλων αποβλήτων, δηλαδή ανεξέλεγκτων εκπομπών ή κακής ποιότητας λιπάσματος.

Το στάδιο της προετοιμασίας συνίσταται από τη διαλογή, τον τεμαχισμό και την ομογενοποίηση της πρώτης ύλης. Κατά τη διαδικασία διαλογής, επιτυγχάνεται η αφαίρεση του υλικού συσκευασίας και των

μη βιοαποικοδομήσιμων υλικών, όπως χώμα, λίπος και μέταλλο. Η διαδικασία τεμαχισμού στοχεύει στην παροχή μικρού μεγέθους σωματιδίων πρώτης ύλης για προστασία των κατάντη συστατικών της μονάδας από φυσικές βλάβες.

Το στάδιο της κομποστοποίησης περιλαμβάνει την απολύμανση, τη σταθεροποίηση, τον αερισμό και την ωρίμανση του οργανικού υλικού:

- Στη διαδικασία απολύμανσης ή αλλιώς στη μεσοφιλική φάση, λαμβάνει χώρα εντατική αποσύνθεση της πρώτης ύλης τις δύο πρώτες έως τρεις εβδομάδες της διαδικασίας. Ως αποτέλεσμα, παρατηρείται αύξηση της ζήτησης οξυγόνου και μείωση των πτητικών στερεών, παθογόνων και σπόρων ζιζανίων (τεχνική καθοδήγηση SEPA; Jenkins, 2019). Σε αυτό το στάδιο της ενεργού κομποστοποίησης, απελευθερώνονται ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα, νερού και θερμότητας, καθώς και οσμών, όπως πτητικά λιπαρά οξέα, αμμωνία, άλλες ενώσεις που περιέχουν άζωτο, κετόνες, και ενώσεις ανόργανου και οργανικού θείου.
- Στη διαδικασία σταθεροποίησης ή στη θερμοφιλική φάση, πραγματοποιείται η χώνευση πιο ανθεκτικών οργανικών υλικών, η οποία διαρκεί μία έως δώδεκα εβδομάδες (Chen et al., 2011; Jenkins, 2019). Μέσα από αυτό το λιγότερο έντονο στάδιο ωρίμανσης, συντελείται μείωση του διοξειδίου του άνθρακα και της θερμότητας.
- Κατά τη διαδικασία αερισμού, η θερμότητα και η υγρασία απομακρύνονται από το χώρο με τη χρήση αέρα ή με αναρρόφηση μέσω δαπέδων. Αυτό το στάδιο στοχεύει στην αποτροπή του σχηματισμού αναερόβιων ζωνών που απελευθερώνουν μεθάνιο, έτσι ώστε να διατηρείται η αερόβια αποδόμηση.
- Στη διαδικασία ωρίμανσης, συντελείται μείωση της ζήτησης οξυγόνου και θερμότητας μετά την αποσύνθεση του οργανικού υλικού. Μέσω αυτής της φάσης ανάπαυσης, η οποία διαρκεί από έξι έως δώδεκα εβδομάδες, οι χουμικές ουσίες απελευθερώνονται από μη αποσυντιθέμενα υλικά. Το υπόλοιπο άζωτο ενσωματώνεται σε οργανικές ενώσεις και απελευθερώνεται αργά, όταν το λίπασμα εφαρμόζεται στο έδαφος (Chen et al., 2011).

Η διαδικασία του τελικού σταδίου αφορά την μετεπεξεργασία του λιπάσματος, δηλαδή τη διαλογή, την ανάμειξη και τη συσκευασία του προϊόντος. Η ταξινόμηση και η αφαίρεση τυχόν υπολειπόμενων ακαθαρσιών επιτυγχάνεται με τη χρήση οθονών τυμπάνου και ταξινομητών αέρα (Pinasseau et al., 2010).

Ο κύριος στόχος για την επίτευξη της διαδικασίας κομποστοποίησης είναι η δημιουργία και διατήρηση του βέλτιστου περιβάλλοντος, δηλαδή των μεταβλητών ελέγχου διεργασίας που επηρεάζουν την αποσύνθεση των οργανικών αποβλήτων (Amlinger, 2017).

2.1.2 Αναερόβια επεξεργασία: διαδικασία παραγωγής βιοαερίου

Η χρήση ελεγχόμενης αναερόβιας επεξεργασίας - χώνευσης για την επεξεργασία βιοαποικοδομήσιμων αποβλήτων μπορεί να μετατρέψει την οργανική ύλη που περιέχεται στα απόβλητα σε βιοαέριο και χωνευμένη λάσπη.

Η αναερόβια επεξεργασία της ΙΛ αποτελείται από τέσσερα κύρια στάδια:

- Υποδοχή
- Προετοιμασία
- Διαδικασία χώνευσης
- Τελικό στάδιο

Το στάδιο της υποδοχής περιλαμβάνει τη διαδικασία ζύγισης, καταγράφοντας τα χαρακτηριστικά και την ποσότητα εισερχόμενων αποβλήτων, καθώς και την παρακολούθηση αποδοχής, βάσει της ανάλυσης των δειγμάτων πρώτων υλών. Ο τύπος του υποστρώματος, ο έλεγχος της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και οι απαιτήσεις υγιεινής είναι παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η στάδιο υποδοχής (Pinasseau et al., 2010).

Η διαδικασία προετοιμασίας συνίσταται στο διαχωρισμό του υλικού και στην προεπεξεργασία της ακατέργαστης λάσπης.

- Κατά τη διαδικασία διαχωρισμού, επιτυγχάνεται η απομάκρυνση μη βιοαποικοδομήσιμων υλικών, μετάλλων και υπερμεγέθων συστατικών από τα απόβλητα. Οι μηχανές κοπής, άλεσης,

τυμπάνου, πολτοποίησης ή τεμαχισμού είναι ο απαραίτητος εξοπλισμός για τη μείωση του μεγέθους, ώστε να προκύψει ένα πιο ομοιογενές υλικό.

- Η διαδικασία προεπεξεργασίας αναφέρεται στην προκαταρκτική αερόβια αποσύνθεση, η οποία πραγματοποιείται για περίοδο δύο έως τεσσάρων ημερών, προκειμένου να επιτευχθεί η διάσπαση του υλικού και να θερμανθεί το υπόστρωμα. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, η πρωτογενής και η δευτερογενής λάσπη αναμιγνύονται, κοσκινίζονται και πυκνώνονται (Bachmann et al., 2015). Η ενίσχυση του ρυθμού και του όγκου παραγωγής αερίου επιτυγχάνεται με τη θερμική αποσύνθεση στερεών δομών. Η προκαταρκτική αποσύνθεση οδηγεί σε ταχύτερη διαδικασία χώνευσης, καλύτερη αφυδάτωση, υψηλότερη παραγωγή ενέργειας και μείωση του όγκου της λάσπης.

Η διαδικασία χώνευσης μπορεί να πραγματοποιηθεί σε θερμόφιλα, μεσοφιλικά, ξηρά ή υγρά συστήματα και διακρίνεται με βάση τη θερμοκρασία λειτουργίας και το ποσοστό ξηράς ύλης στο χωνευτήρα. Παρόλο που η ποσότητα της ορυκτής ύλης παραμένει σταθερή, η αποικοδόμηση της οργανικής ύλης από μικροοργανισμούς συμβαίνει κατά τη διάρκεια της αναερόβιας επεξεργασίας (Chen et al., 2011). Η σταθεροποίηση, η εξυγίανση και η μείωση των οσμών επιτυγχάνονται με μειώση της ποσότητας των παθογόνων και των σπόρων ζιζανίων στη λάσπη, καθώς και της ποσότητας της ανακτήσιμης θερμότητας ΙΛ. Ο χρόνος κατακράτησης είναι περίπου είκοσι ημέρες, όπου γίνεται συνεχής ανάδευση της ΙΛ σε δεξαμενές. Εκτός από τη μερική μετατροπή του οργανικού αζώτου σε αμμώνιο, ζωτικής σημασίας είναι η παραγωγή βιοαερίου (Rynk. Et al., 1992). Το βιοαέριο αποτελείται από 70% μεθάνιο και 30% διοξείδιο του άνθρακα και ιχνοστοιχεία, όπως υδρογόνο και υδρόθειο. Οι φάσεις της αναερόβιας επεξεργασίας συνίστανται σε υδρόλυση, οξινογένεση, ακετογένεση και μεθανογένεση (Pinasseau et al., 2010).

- Στο στάδιο της υδρόλυσης, οι υδρολυτικοί μικροοργανισμοί αποσυνθέτουν πολυμερή συστατικά της πρώτης ύλης σε κατώτερες μοριακές οργανικές ενώσεις. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, σχηματίζεται υδρογόνο, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα για το σχηματισμό μεθανίου.
- Στο στάδιο της οξινογένεσης, τα οξινογόνα βακτήρια αποσυνθέτουν τα παραγόμενα ενδιάμεσα σε λιπαρά οξέα, διοξείδιο του άνθρακα, υδρογόνο, καθώς και γαλακτικό οξύ και αλκοόλες σε μικρές ποσότητες.
- Στο στάδιο της ακετογένεσης, τα ακετογόνα βακτήρια μετατρέπουν τα ενδιάμεσα σε οξικό οξύ, υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα.
- Στο στάδιο της μεθανογένεσης, το μεθάνιο και το διοξείδιο του άνθρακα σχηματίζονται αρχικά από οργανικά στοιχεία και στη συνέχεια απελευθερώνονται ως βιοαέριο,

Το τελικό στάδιο αφορά την μετεπεξεργασία του βιοαερίου και της χωνευμένης λάσπης (Bachmann, 2015). Αυτό το στάδιο περιλαμβάνει την εξυγίανση, την ωρίμανση, τη χώνευση της λάσπης και την επεξεργασία βιοαερίου, καθώς και τη μετατροπή του βιοαερίου.

- Η διαδικασία ωρίμανσης αναφέρεται σε ένα αερόβιο στάδιο που διαρκεί από δύο έως έξι εβδομάδες, ανάλογα με τον επιθυμητό βαθμό ωρίμανσης και εξυγίανσης. Κατά τη διάρκεια αυτού του σταδίου, επιτυγχάνεται η παραγωγή λιπάσματος, η μείωση της περιεκτικότητας σε νερό και η πρόληψη σχηματισμού μεθανίου σε στερεά προϊόντα χώνευσης.
- Η διαδικασία κατεργασμένης λάσπης περιλαμβάνει την πάχυνση και την αφυδάτωση υγρής ΙΛ. Αυτή η διαδικασία στοχεύει στη μείωση του όγκου της ΙΛ και στην αύξηση της αναλογίας της ξηράς ουσίας.
- Το τελικό στάδιο της επεξεργασίας της χωνευμένης λάσπης είναι η επανεισαγωγή και ανάμιξη του υγρού κλάσματος στη μονάδας αστικών λυμάτων με το ακατέργαστο λύμα. Η αφυδάτωση της χωνευμένης λάσπης έχει ως αποτέλεσμα την απομάκρυνση του αζώτου από το υγρό κλάσμα και κατά συνέπεια την απομάκρυνση φορτίου αζώτου κατά 15% - 20% (Bachmann, 2015).
- Η μείωση της οργανικής ύλης με αφύγρανση, καθαρισμό και ξήρανση του ακατέργαστου βιοαερίου συμβαίνει στην επεξεργασία βιοαερίου. Η αναβάθμιση του βιοαερίου σε βιομεθάνιο ή η καύση του για παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας, επιτυγχάνεται με την απομάκρυνση του υδρόθειου και άλλων ιχνοστοιχείων, σιλοξάνες και διοξείδιο του άνθρακα.

2.1.3 Εκτίμηση Κύκλου Ζωής επεξεργασίας ιλύος λυμάτων

Η εκμετάλλευση των αποβλήτων για την παραγωγή χρήσιμων προϊόντων, όπως το κομπόστ και το βιοαέριο, δίνει στο τελικό προϊόν προστιθέμενη περιβαλλοντική αξία. Ωστόσο, η πρόκληση είναι να γίνει διάκριση μεταξύ των διαφόρων επιλογών ως προς το ποια θεωρείται πιο αποτελεσματική από άποψη κατανάλωσης πόρων για την παροχή ενός προϊόντος υψηλής ποιότητας. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετές μελέτες ΕΚΖ που εξετάζουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις επεξεργασίας ΙΛ παραγόμενης από διάφορες τροφοδοσίες και διεργασίες. Η επιλογή της ΑΧ που ακολουθείται από την κομποστοποίηση έχει επισημανθεί ως η καλύτερη, αφού περιβαλλοντικά και οικονομικά κριτήρια θεωρούνται εξίσου σημαντικοί παράγοντες (Garrido-Baserba et al., 2015). Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι, σύμφωνα με άλλη ΕΚΖ, το 70% έως 75% των άμεσων εκπομπών που αφορούν την ΑΧ και την κομποστοποίηση παράγονται από τη διαδικασία της κομποστοποίησης (Garrido-Baserba et al., 2015). Ομοίως, μία οικονομικά συνδυασμένη ΕΚΖ περιβαλλοντικών και οικονομικών επιπτώσεων έδειξε ότι το σενάριο επεξεργασίας ΙΛ με τεχνολογίες ΑΧ, αφυδάτωσης και αποτέφρωσης ήταν οι πιο περιβαλλοντικά και οικονομικά κατάλληλες μέθοδοι για την επεξεργασία ΙΛ, ακολουθούμενες από τρία σενάρια γεωργικής τελικής χρήσης και τρία σενάρια υγειονομικής ταφής (Xu et al., 2014). Ωστόσο, ορισμένα ευρήματα έρχονται σε αντίθεση με την πορεία της κυκλικής οικονομίας. Η κυκλική οικονομία ακολουθείται από την ΕΕ δηλώνει ότι, παρόλο που η ανάκτηση ενέργειας είναι μια προτιμώμενη διαδικασία διαχείρισης αποβλήτων έναντι του χώρου υγειονομικής ταφής, θα πρέπει να θεωρείται ως μία από τις τελευταίες επιλογές στο τέλος της ζωή κάθε ύλης, μετά από την επαναχρησιμοποίηση και την ανακύκλωση (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2017).

Στις περισσότερες κατηγορίες επιπτώσεων, επιτυγχάνεται καλύτερη περιβαλλοντική απόδοση της μεθόδου συμπαραγωγής, ενώ ο αντίκτυπος του διαχωρισμού μεμβρανών είναι μικρότερος από αυτόν των άλλων τεχνολογιών αναβάθμισης (Florio et al., 2019). Όσον αφορά τη ζημία της ανθρώπινης υγείας και την ποιότητα του οικοσυστήματος, ένας νέος τύπος τεχνολογίας παραγωγής βιομεθανίου με μονο-ζύμωση καλλιεργούμενων ενεργειακών καλλιεργειών μπορεί σχεδόν να ανταγωνιστεί το φυσικό αέριο (Jury et al., 2010). Όσον αφορά τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου, η μονο-αποτέφρωση επέδειξε την καλύτερη απόδοση έχοντας ως αντισταθμιστικό παράγοντα την ανάκτηση ενέργειας από την αποτέφρωση λάσπης, ακολουθούμενη από την κατασκευή τούβλων και λιπασμάτων για το αστικό πράσινο (Liu et al., 2013). Η αναερόβια συγχώνευση της αφυδατωμένης ΙΛ και το οργανικό κλάσμα των αστικών στερεών αποβλήτων σε μικρές εγκαταστάσεις σε συνδυασμό με την μετεπεξεργασία της κομποστοποίησης προσφέρει μια περιβαλλοντικά βιώσιμη επιλογή διαχείρισης αποβλήτων σε μικρές κοινότητες (Righi et al., 2013). Με τη εκτροπή βιοαποικοδομήσιμων αποβλήτων από χώρους υγειονομικής ταφής σε αναερόβια χώνευση για την παραγωγή βιοαερίου και λιπασμάτων, μπορούν να αποφευχθούν πάνω από τις διπλάσιες εκπομπές ισοδυνάμου διοξειδίου του άνθρακα (Bernstad & la Cour Jansen, 2012).

3. Μεθοδολογία

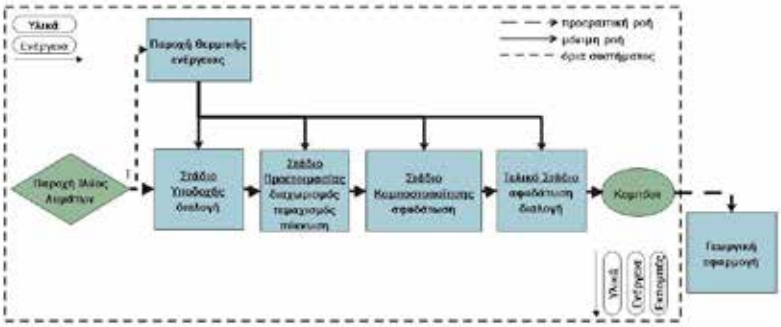
Η περιβαλλοντική εκτίμηση δύο διαφορετικών εναλλακτικών λύσεων για την επεξεργασία ιλύος λυμάτων αξιολογήθηκε με τη χρήση ΕΚΖ, η οποία εφαρμόστηκε σύμφωνα με το πρότυπο ISO 14040 (EN ISO, 2006). Το λογισμικό GaBi 5 και παγκόσμιες βάσεις δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν για τη μοντελοποίηση των συστημάτων και τη διερεύνηση της περιβαλλοντικής τους απόδοσης. Σε αυτή τη μελέτη, χρησιμοποιήθηκε η μεθοδολογία LCIA CML 2001, ως μία από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθοδολογίες εκτίμησης επιπτώσεων (Laurent et al., 2014).

3.1 Στόχος μελέτης

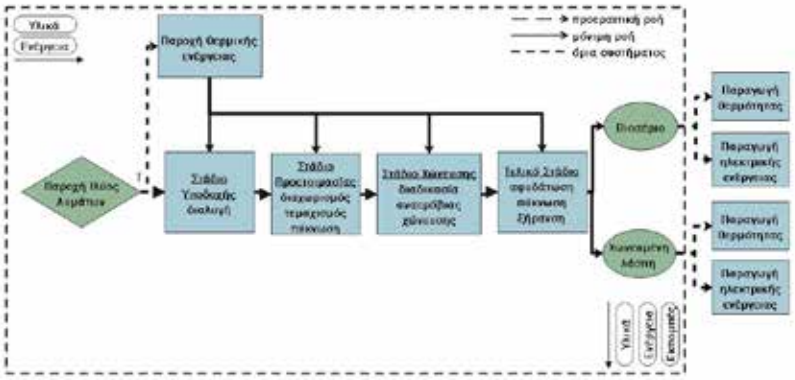
Η εργασία στοχεύει στην εκτίμηση και σύγκριση της περιβαλλοντικής απόδοσης του λιπάσματος που παράγεται από την κομποστοποίηση ιλύος λυμάτων σε ανοικτή εγκατάσταση (Σ1), και του βιοαερίου που παράγεται από ΑΧ (Σ2). Στα δύο σενάρια περιλαμβάνονται οι απαιτούμενοι πόροι για κάθε διαδικασία, συνεπώς η ενέργεια και τα υλικά που καταναλώνονται για την παραγωγή λιπάσματος (Σ1) και βιοαερίου (Σ2) αντίστοιχα. Τα συστήματα που μελετήθηκαν επικεντρώνονται στην ακατέργαστη λάσπη που παράγεται κατά την επεξεργασία μιας μονάδας αστικών λυμάτων. Ο ένας τόνος μικτής λάσπης σε ξηρή βάση (1 t DS) ορίστηκε ως η λειτουργική μονάδα της πρώτης ύλης και για τα δύο σενάρια που

διερευνήθηκαν. Τα όρια του συστήματος αυτής της μελέτης, που απεικονίζονται στα Διαγράμματα 1 και 2, εκτείνεται από πύλη σε πύλη (gate-to-gate) από την εισαγωγή ιλύος λυμάτων στην παραγωγή χρήσιμων προϊόντων: λίπασμα στην περίπτωση του Σ1 και του βιοαερίου στην περίπτωση του Σ2

Διάγραμμα 1: Σύστημα επεξεργασίας ιλύος λύματος του Σ1: παραγωγή κομπόστ σε ανοιχτή εγκατάσταση



Διάγραμμα 2: Σύστημα επεξεργασίας ιλύος λύματος του Σ2: παραγωγή βιοαερίου σε αναερόβιο χωνευτήρα



3.2 Απογραφική ανάλυση

Η απογραφική ανάλυση συγκεντρώνει τις ροές που περιλαμβάνονται στα όρια του συστήματος επεξεργασίας ΙΛ. Πρωτογενή δεδομένα σχετικά με τις ποσότητες πρώτων υλών, καθώς και πρόσθετες ποσότητες υλικών για τη λειτουργία του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη και των δύο σεναρίων, έχουν παρασχεθεί σύμφωνα με τις διαδικασίες της του εγγράφου αναφοράς των ΒΔΤ για την επεξεργασία αποβλήτων: κομποστοποίηση και παραγωγή βιοαερίου μέσω ΑΧ (τεχνική καθοδήγηση SEPA, Pinasseau et al., 2010). Για εκείνα τα δεδομένα που δεν μπορούσαν να ληφθούν πρωτογενείς τιμές, ελήφθησαν δευτερεύοντα δεδομένα από διεθνή βιβλιογραφία και βάσεις δεδομένων.

3.3 Παραδοχές

Οι κύριες παραδοχές της μελέτης ήταν οι ακόλουθες:

- Οι εργασίες κατασκευής των μονάδων επεξεργασίας δε λήφθησαν υπόψη. Όπως έχει ήδη αποδειχθεί σε προηγούμενες μελέτες, η περιβαλλοντική συμβολή αυτού του σταδίου δεν υπερβαίνει το 10% των συνολικών επιπτώσεων (Del Borghi et al., 2008).
- Οι επιπτώσεις που σχετίζονται με τη συλλογή υλικών διογκωτικού παράγοντα και την περίσσεια διεργασίας εκπλυμάτων στη διαδικασία κομποστοποίησης αποκλείστηκαν λόγω της μικρής τους επίδρασης (Zorpas et al., 2008, Doublet et al., 2011).
- Τα απόβλητα υγρά που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας παραλείφθησαν, επειδή θεωρήθηκε ότι αποστέλλονται πίσω στη μονάδα επεξεργασίας λυμάτων. Η ανακτημένη ενέργεια θεωρήθηκε ως υποκατάστατο των ορυκτών καυσίμων.
- Οι ενεργειακές απαιτήσεις για τις διαδικασίες χώνευσης λάσπης, πάχυνσης και αφυδάτωσης, ξήρανσης και γενικής θέρμανσης χώρου πληρούνται με ορυκτά καύσιμα.
- Οι αποστάσεις σε χιλιόμετρα μεταξύ των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων και των περιοχών διαχείρισης αποβλήτων και εφαρμογής ιλύος και για τα δύο σενάρια θεωρήθηκαν οι ίδιες για τη μεταφορά χημικών, στερεών αποβλήτων και ιλύος, οπότε και παραλείφθησαν.
- Η περιεκτικότητα υγρασίας λάσπης μετά την πάχυνση εκτιμήθηκε ότι ήταν περίπου 97%. Διενεργήθηκε αφυδάτωση με φίλτρο ιμάντα. Εκτιμήθηκε ότι η περιεκτικότητα υγρασίας λάσπης μετά την αφυδάτωση μειώθηκε περαιτέρω στο 78%.
- Η περιεκτικότητα βιοαερίου διατηρήθηκε στο 20% και η χωνευμένη λάσπη ήταν περίπου το 80% της αρχικής μάζας (Demirbas et al. 2016).
- Ο χρόνος κατακράτησης του χωνευτήρα σχεδιάστηκε να είναι 15-18 ημέρες (Demirbas, 2004).
- Η περιεκτικότητα σε υγρασία λάσπης μετά την κομποστοποίηση ήταν περίπου 40%.

4. Αξιολόγηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων και σχολιασμός

4.1 Περιβαλλοντική απόδοση

Συγκριτικά στοιχεία σχετικά με τη συνολική περιβαλλοντική απόδοση του συστήματος επεξεργασίας ΙΛ για τις εξεταζόμενες κατηγορίες επιπτώσεων, που περιλαμβάνονται στη μεθοδολογία CML 2001, δίνονται στον Πίνακα 1. Συγκεκριμένα, η διεργασία ΑΧ για την παραγωγή βιοαερίου και χωνευμένης λάσπης στο Σ2 έχει σημαντικά χαμηλότερες επιπτώσεις στο περιβάλλον από την επεξεργασία ΙΛ που χρησιμοποιείται για την παραγωγή λιπάσματος στο Σ1. Σε όλες τις κατηγορίες, οι μειωμένες τιμές του σεναρίου βιοαερίου κυμαίνονται περίπου στο 6,5%, εκτός από τις εκπομπές στο βιομηχανικού εδάφους όπου το ποσοστό αυξάνεται κατά 1%, δηλαδή είναι 7,5%. Στους Πίνακες 2 και 3 παρέχονται στοιχεία για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις κάθε διαδικασίας σεναρίου. Και στα δύο σενάρια, η διαδικασίες πάχυνσης και ξήρανσης, είναι οι λιγότερο ενεργοβόρες διαδικασίες. Αντίθετα, η διαδικασία κομποστοποίησης στο Σ1 και η ΑΧ στο Σ2 είναι τα δύο πιο ενεργοβόρα στάδια στη συγκριτική ΕΚΖ (Horttanainen et al., 2011).

Από τα συγκριτικά στοιχεία σχετικά με τις συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις άλλων μελετών για όλες τις κατηγορίες επιπτώσεων που περιλαμβάνονται στη μεθοδολογία CML 2001 παρατηρήθηκε ότι οι κατηγορίες επιπτώσεων του δυναμικού υπερθέρμανσης του πλανήτη σε χρονική περίοδο 100 ετών (Global Warming Potential – GWP100), μετρούμενο σε κιλά ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα, η αβιοτική εξασθένιση (Abiotic depletion – ADP) και η εξασθένιση οικοτοξικότητας θαλάσσιου νερού (Marine Aquatic Ecotoxicity Potential - MAETP) παρουσιάζουν τις υψηλότερες τιμές στην παραγωγή λιπάσματος και βιοαερίου. Η κατηγορία κατανάλωσης ορυκτής ενέργειας (Abiotic depletion fossil - ADP-fossil) επηρεάζεται κυρίως από τη συνολική ποσότητα κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων και τις σχετικές εκπομπές. Στο Σ1, η εξασθένιση της στοιβάδας του όζοντος (Ozone Depletion – ODP) παρουσιάζει τη χαμηλότερη τιμή στη διαδικασία παραγωγής λιπάσματος, και μαζί με την εξασθένιση οικοτοξικότητας (Terrestric Ecotoxicity Potential – TETP) παρουσιάζουν εγγύτητα στις τιμές της μελέτης των Pasqualino et al. (2009). Στο Σ2, τα στοιχεία ODP και ADP παρουσιάζουν τις χαμηλότερες τιμές στη διαδικασία παραγωγής βιοαερίου. Σε σύγκριση με άλλες μελέτες, οι τιμές GWP και ODP βρίσκονται στα ίδια επίπεδα με τη μελέτη των Xu et al. (2015).

Σκοπός της μελέτης ήταν ένα αποτέλεσμα όσο το δυνατόν ρεαλιστικότερο, οπότε καθορίστηκαν τα δεδομένα και οι προδιαγραφές των μηχανημάτων και για τις δύο διαδικασίες σεναρίων. Επιπλέον, με

βάση τον πραγματικό χρόνο λειτουργίας της κατανάλωσης ενέργειας και το χρόνο που απαιτείται για την ολοκλήρωση όλων των διαδικασιών, υπολογίστηκε η ενεργειακή ζήτηση κάθε σταδίου. Η πλειονότητα των διεξαγόμενων μελετών, που σχετίζονται με το αντικείμενο και των δύο σεναρίων αυτής της μελέτης, δεν αναλύει λεπτομερώς όλα τα στάδια της παραγωγής και χρησιμοποιούνται διαφορετικές ώρες λειτουργίας των μηχανημάτων, με διαφορετικά συστήματα ορίων. Με γνώμονα την παρουσίαση μιας πιο αναλυτικής άποψης των διαδικασιών που ακολουθούνται σε άλλες μελέτες, παρατηρήθηκαν διαφοροποιήσεις στη βιβλιογραφία σχετικά με τις τιμές των συνολικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Τα στοιχεία που παρουσιάζονται σε αυτές τις μελέτες, για την πραγματοποίηση της απογραφής, συλλέχθηκαν κυρίως από σχετικές αναφορές και όχι από άμεσες μετρήσεις.
Για το Σ1, υπάρχει κατανομή τιμών που σχετίζονται με τη διαδικασία αφυδάτωσης και στις τρεις μελέτες (Akwo et al. (2008), Pasqualino et al. (2009), Hong et al. (2009)). Αντιθέτως, οι τιμές του σταδίου κομποστοποίησης μεταξύ της παρούσας μελέτης και των μελετών των Akwo et al. (2008) και Hong et al. (2009) διαφέρουν σημαντικά. Σε σύγκριση με τις άλλες μελέτες, η τιμή της ΑΧ στο Σ2 είναι κοντά στις τιμές των μελετών των Hospido et al. (2005) και Akwo et al. (2008). Όσον αφορά τα στάδια που σχετίζονται με την ξήρανση - θερμική ξήρανση και κατανάλωση θερμότητας της ξήρανσης – οι μελέτες των Hospido et al. (2005) και Hong et al. (2009) συμφωνούν, αλλά παρουσιάζουν μια πολύ μεγάλη διαφοροποίηση από τις τιμές της παρούσας μελέτης, η οποία θα μπορούσε να δικαιολογηθεί λόγω του γεγονότος ότι η ενεργειακή ζήτηση κάθε σταδίου υπολογίστηκε με βάση τον πραγματικό χρόνο λειτουργίας της κατανάλωσης ενέργειας και τη διάρκεια που απαιτείται καθ 'όλη τη διάρκεια ολοκλήρωσης όλων των διαδικασιών.

5. Συμπεράσματα

Το αντικείμενο αυτής της μελέτης ήταν η εκτίμηση και η σύγκριση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της εκμετάλλευσης της λυματολάσπης, μέσω Εκτίμησης Κύκλου Ζωής από πύλη σε πύλη και η παροχή αντιπροσωπευτικών στοιχείων σχετικά με την ενσωματωμένη ενέργεια των τελικών προϊόντων. Η ΕΚΖ της εκμετάλλευσης ιλύος λυμάτων για την παραγωγή λιπάσματος (Σ1) και για την παραγωγή βιοαερίου με χρήση αναερόβιου χωνευτήρα (Σ2) έδωσε ενδιαφέροντα αποτελέσματα. Οι τιμές της παρούσας μελέτης παρουσιάζουν μια πολύ μεγάλη διαφοροποίηση σε σχέση με τη βιβλιογραφία. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ενεργειακή ζήτηση κάθε σταδίου υπολογίστηκε με βάση τον πραγματικό χρόνο λειτουργίας της κατανάλωσης ενέργειας και τη διάρκεια που απαιτείται καθ 'όλη τη διάρκεια ολοκλήρωσης όλων των διαδικασιών. Η σύγκριση των δύο παραπάνω σεναρίων έδειξε ότι η διεργασία ΑΧ για την παραγωγή βιοαερίου και χωνευμένης λάσπης έχει σημαντικά χαμηλότερες επιπτώσεις στο περιβάλλον από την επεξεργασία ΙΛ που χρησιμοποιείται για την παραγωγή λιπάσματος. Όλες οι κατηγορίες επιπτώσεων παρουσιάζουν μειωμένες τιμές το λιγότερο 6,5% στο σενάριο του βιοαερίου. Αμφότερα, οι διαδικασίες πάχυνσης και ξήρανσης, είναι οι λιγότερο ενεργοβόρες διαδικασίες, ενώ οι κύριες διεργασίες και στα δύο σενάρια, δηλαδή η κομποστοποίησης και η ΑΧ είναι τα δύο πιο ενεργοβόρα στάδια στη συγκριτική ΕΚΖ.

Πίνακας 1: Σύστημα επεξεργασίας λυμάτων – περιβαλλοντικές επιπτώσεις – συγκριτικά δεδομένα

Σενάρια παραγωγής	Κατηγορίες επιπτώσεων										
	GWP	AP	EP	ODP	ADP elements	ADP fossils	FAETP	HTP	MAETP	POCP	TETP
	[kg CO_2-equiv.]	[kg SO_2-equiv.]	[kg phosphate-equiv.]	[kg R11-equiv.]	[kg Sb-equiv.]	[MJ]	[kg DCB-equiv.]	[kg DCB-equiv.]	[kg DCB-equiv.]	[kg ethene-equiv.]	[kg DCB-equiv.]
Σ1.	7.86E+02	3.96E+00	0.22E+00	5.85E-07	1.25E-04	8.76E+03	1.91E+00	4.84E+01	9.02E+04	2.21E-01	1.04E+00
Σ2.	5.03E+01	0.25E+00	1.37E-02	3.70E-08	7.90E-06	5.61E+02	1.27E-01	3.12E+00	5.73E+03	1.41E-02	6.72E-02

Πίνακας 2: Σύστημα επεξεργασίας λυμάτων – Σ1 (παραγωγή κομπόστ)

Διαδικασία	GWP	AP	EP	ODP	ADP elements	ADP fossils	FAETP	HTP	MAETP	POCP	TETP
	[kg CO_2-equiv.]	[kg SO_2-equiv.]	[kg phosphate-equiv.]	[kg R11-equiv.]	[kg Sb-equiv.]	[MJ]	[kg DCB-equiv.]	[kg DCB-equiv.]	[kg DCB-equiv.]	[kg ethene-equiv.]	[kg DCB-equiv.]
Πύκνωση	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή
Αφυδάτωση	1.05E+01	5.28E-02	2.87E-03	7.81E-09	1.66E-06	1.17E+02	2.55E-02	6.46E-01	1.20E+03	2.96E-03	1.39E-02
Κομποστοποίηση	7.47E+02	3.76E+00	2.04E-01	5.56E-07	1.19E-04	8.33E+03	1.82E+00	4.60E+01	8.58E+04	2.11E-01	9.90E-01
Διαλογή	2.78E+01	0.14E+00	7.60E-03	2.07E-08	4.41E-06	3.10E+02	6.76E-02	1.71E+00	3.19E+03	7.83E-03	3.68E-02
Σύνολο	7.86E+02	3.96E+00	2.15E-01	5.85E-07	1.25E-04	8.76E+03	1.91E+00	4.84E+01	9.02E+04	2.21E-01	1.04E+00

Πίνακας 3: Σύστημα επεξεργασίας λυμάτων – Σ2 (παραγωγή βιοαερίου)

Διαδικασία	GWP	AP	EP	ODP	ADP elements	ADP fossils	FAETP	HTP	MAETP	POCP	TETP
	[kg CO_2-equiv.]	[kg SO_2-equiv.]	[kg phosphate - equiv.]	[kg R11-equiv.]	[kg Sb-equiv.]	[MJ]	[kg DCB-equiv.]	[kg DCB-equiv.]	[kg DCB-equiv.]	[kg ethene-equiv.]	[kg DCB-equiv.]
Πύκνωση	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή
Αναερόβια χώνευση	4.04E+01	2.03E-01	1.10E-02	3.01E-08	6.40E-06	4.50E+02	9.82E-02	2.49E+00	4.63E+03	1.14E-02	5.35E-02
Αφυδάτωση	8.39E+00	4.22E-02	2.29E-03	6.42E-09	1.33E-06	9.35E+01	2.04E-02	5.17E-01	9.63E+02	2.36E-03	1.11E-02
Πύκνωση	9.17E-01	4.62E-03	2.51E-04	6.83E-10	1.46E-07	1.02E+01	2.23E-03	5.65E-02	1.05E+02	2.59E-04	1.22E-03
Ξήρανση	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή
Παροχή θερμικής ενέργειας	6.15E-01	2.18E-03	1.26E-04	1.62E-08	1.72E-08	7.71E+00	5.82E-03	6.40E-02	3.06E+01	1.42E-04	1.38E-03
Σύνολο	5.03E+01	2.52E-01	1.37E-02	3.70E-08	7.90E-06	5.61E+02	1.27E-01	3.12E+00	5.73E+03	1.41E-02	6.72E-02

Βιβλιογραφία

1. Amlinger F. (2017), Composting and Compost use in organic farming, How to do composting in a simple and smart way?, First Zero Waste & Organic Cycle Organization, Independent schools network meeting, https://www.compostnetwork.info/wordpress/wp-content/uploads/171004_4.-Amlinger_Composting-in-a-simple-way-2-without-video.pdf
2. Athanasoulia, E., Melidis, P., & Aivasidis, A. (2012). Optimization of biogas production from waste activated sludge through serial digestion. Renewable energy, 47, 147-151.
3. Avidov, R., Saadi, I., Krasnovsky, A., Medina, S., Raviv, M., Chen, Y., &Laor, Y. (2018). Using polyethylene sleeves with forced aeration for composting olive mill wastewater pre-absorbed by vegetative waste. Waste management, 78, 969-979.
4. Avidov, R., Saadi, I., Krassnovsky, A., Hanan, A., Medina, S., Raviv, M. Chen, Y.,&Laor, Y. (2017). Composting municipal biosolids in polyethylene sleeves with forced aeration: Process control, air emissions, sanitary and agronomic aspects. Waste Management, 67, 32-42.
5. Bachmann, N., la Cour Jansen, J., Bochmann, G., & Montpart, N. (2015). Sustainable biogas production in municipal wastewater treatment plants. Massongex, Switzerland: IEA Bioenergy.
6. BAT for composting, SEPA (Scottish Environment Protection Agency) Technical Guidance
7. Bernstad, A., & la Cour Jansen, J. (2012). Review of comparative LCAs of food waste management systems–current status and potential improvements. Waste management, 32(12), 2439-2455.
8. Chen L., de Haro Marti M., Moore A., Falen C. (2011), The composting process, Dairy compost production and use in Idaho, University of Idaho Extension, CIS 1179, https://www.extension.uidaho.edu/publishing/pdf/CIS/CIS1179.pdf
9. Cieślik, B. M., Namieśnik, J., & Konieczka, P. (2015). Review of sewage sludge management: standards, regulations and analytical methods. Journal of Cleaner Production, 90, 1-15.
10. CML, 2001. CML's impact assessment methods and characterisation factors. Leiden University, Institute of Environmental Science (CML).
11. Doublet, J., Francou, C., Poitrenaud, M., & Houot, S. (2011). Influence of bulking agents on organic matter evolution during sewage sludge composting; consequences on compost organic matter stability and N availability. Bioresource Technology, 102(2), 1298-1307.
12. European Commission (2017). Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. The role of waste-to-energy in the circular economy. COM(2017)34.
13. Farrell, M., & Jones, D. L. (2010). Food waste composting: its use as a peat replacement. Waste management, 30(8-9), 1495-1501.
14. Florio, C., Fiorentino, G., Corcelli, F., Ulgiati, S., Dumontet, S., Güsewell, J., &Eltrop, L. (2019). A life cycle assessment of biomethane production from waste feedstock through different upgrading technologies. Energies, 12(4), 718.
15. Garrido-Baserba, M., Molinos-Senante, M., Abelleira-Pereira, J. M., Fdez-Güelfo, L. A., Poch, M., & Hernández-Sancho, F. (2015). Selecting sewage sludge treatment alternatives in modern wastewater treatment plants using environmental decision support systems. Journal of Cleaner Production, 107, 410-419.
16. Guo, R., Li, G., Jiang, T., Schuchardt, F., Chen, T., Zhao, Y., &Shen, Y. (2012). Effect of aeration rate, C/N ratio and moisture content on the stability and maturity of compost. Bioresource Technology, 112, 171-178.
17. Hospido, A., Moreira, T., Martín, M., Rigola, M., &Feijoo, G. (2005). Environmental evaluation of different treatment processes for sludge from urban wastewater treatments: Anaerobic digestion versus thermal processes (10 pp). The International Journal of Life Cycle Assessment, 10(5), 336-345.
18. Horttanainen, M., Kaikko, J., Bergman, R., Pasila-Lehtinen, M., & Nerg, J. (2010). Performance analysis of power generating sludge combustion plant and comparison against other sludge treatment technologies. Applied thermal engineering, 30(2-3), 110-118.

ΣΥΝ-ΚΑΥΣΗ ΔΑΣΙΚΩΝ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΩΝ ΜΕ ΛΙΓΝΙΤΗ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ. ΘΕΡΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΑΙ ΤΑΣΗ ΕΠΙΚΑΘΙΣΕΩΝ/ΕΠΙΣΚΩΡΙΩΣΕΩΝ

Δέσποινα Βάμβουκα[1*], Γεράσιμος Παναγόπουλος[1]

[1] Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, 73100 Χανιά, Ελλάδα,
[*]e-mail: vamvuka@mred.tuc.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι χαρακτηριστικές καύσης λιγνίτη και δασικών υπολειμμάτων από την Β. Ελλάδα, καθώς και των μιγμάτων τους, μελετήθηκαν με την τεχνική της θερμικής ανάλυσης. Προσδιορίστηκαν το σημείο ανάφλεξης, η αντιδραστικότητα, η μέγιστη και η τελική θερμοκρασία καύσης, ο χρόνος καύσης και οι αλληλοεπιδράσεις μεταξύ των συνθετικών κάθε μίγματος. Μέσω ορυκτολογικών αναλύσεων και αναλύσεων ευτηκτότητας των τεφρών έγινε αποτίμηση της τάσης τους για επικαθίσεις και επισκωριώσεις. Η καύση του λιγνίτη έλαβε χώρα μεταξύ 220°C και 730°C, ενώ των δασικών υπολειμμάτων, τα οποία ήταν πλούσια σε πτητικά συστατικά (83%), μεταξύ 200°C και 520°C με πολύ υψηλότερο ρυθμό. Τα μίγματα λιγνίτη/δασικών υπολειμμάτων παρουσίασαν κάποια συνέργεια κατά την καύση. Μία αύξηση του ποσοστού της βιομάζας στο μίγμα βελτίωσε την αντιδραστικότητα συγκριτικά με τον λιγνίτη. Η θερμοκρασία αρχικής παραμόρφωσης των τεφρών θεωρείται χαμηλή για τις περισσότερες διεργασίες καύσης, ειδικά αυτή των δασικών υπολειμμάτων, λόγω της περιεκτικότητας τους στο ορυκτό αρκανίτη. Εντούτοις, η θερμοκρασία ροής της τέφρας των δασικών υπολειμμάτων ήταν περίπου 100°C υψηλότερη από αυτή του λιγνίτη και ο αναμενόμενος ρυθμός επικαθίσεων χαμηλότερος. Όταν τα δύο καύσιμα αναμείχθηκαν, η τάση για επικαθίσεις/επισκωριώσεις μειώθηκε σε σχέση με τον λιγνίτη.

Λέξεις κλειδιά: συν-καύση*; λιγνίτης; βιομάζα; τέφρες*

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Πρόσφατα, η συν-καύση γαιάνθρακα με υλικά βιομάζας αποκτά αυξημένο ενδιαφέρον, λόγω της μείωσης των αποθεμάτων τωνορυκτών καυσίμων και των περιβαλλοντικών προβλημάτων που σχετίζονται με αυτά. Η κοινή καύση μειώνει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και αποφεύγει τις μεγάλες επενδύσεις κεφαλαίου σε νέες μονάδες βιομάζας [1,2]. Από την άλλη πλευρά, ορισμένες ιδιότητες αποβλήτων ειδών βιομάζας, όπως η υψηλή περιεκτικότητα σε πτητικά συστατικά, η χαμηλότερη θερμογόνος δύναμη και η αυξημένη συγκέντρωσή τους σε αλκάλια, θα μπορούσαν να έχουν αρνητικό αντίκτυπο στη σταθερότητα της καύσης και στα φαινόμενα επικαθίσεων/επισκωριώσεων, μειώνοντας έτσι την απόδοση των εγκαταστάσεων και αυξάνοντας το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας [3-5]. Επιπλέον, ενδέχεται να προκύψουν αλληλεπιδράσεις κατά τη διάρκεια της καύσης μεταξύ των συστατικών καυσίμων, κάτι που θα μπορούσε να είναι ωφέλιμο ή όχι [2,6,7]. Επομένως, η θερμική συμπεριφορά των μιγμάτων γαιάνθρακα / βιομάζας πρέπει να αξιολογηθεί σωστά για να αποφευχθούν προβληματικοί συνδυασμοί καυσίμων.

Η συν-καύση διαφόρων γεωργικών, δασικών και αστικών στερεών αποβλήτων με γαιάνθρακες υψηλής τάξης έχει μελετηθεί εκτενώς [4,8,9]. Λίγες μελέτες έχουν επικεντρωθεί σε γαιάνθρακες χαμηλής τάξης [6,7,10], οι οποίοι είναι το εγχώριο καύσιμο πολλών χωρών, συμπεριλαμβανομένης και της Ελλάδας, αντιπροσωπεύοντας το 40% περίπου των παγκόσμιων αποθεμάτων γαιάνθρακα [11]. Ο λιγνίτης, ένας γαιάνθρακας χαμηλής ποιότητας, έχει μεγαλύτερη ομοιότητα με τη βιομάζα από τους γαιάνθρακες υψηλής τάξης και κατά συνέπεια η διερεύνηση της συμπεριφοράς των μειγμάτων παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον. Τα δασικά υπολείμματα βρίσκονται σε αφθονία σε όλη την Ευρώπη, καθιστώντας την εκμετάλλευσή τους ελκυστική. Στην Ελλάδα παράγονται περίπου 1,7 εκατομμύρια τόνοι ετησίως [12].

Λαμβάνοντας υπόψη τις περιορισμένες πληροφορίες για τη συν-καύση λιγνίτη με δασικά υπολείμματα, καθώς και για την επίδραση των μιγμάτων τέφρας στα φαινόμενα επικαθίσεων/επισκωριώσεων στους λέβητες, αυτή η μελέτη στοχεύει στη διερεύνηση των χαρακτηριστικών καύσης αυτών των καυσίμων και των μειγμάτων τους, μέσω δοκιμών θερμικής ανάλυσης. Οι τάσεις επικαθίσεων/επισκωριώσεων εκτιμήθηκαν από ορυκτολογικές αναλύσεις και αναλύσεις ευτηκτότητας της τέφρας.

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Ο λιγνίτης και τα δασικά υπολείμματα παρασχέθηκαν από τα ορυχεία της Δυτικής Μακεδονίας στη Βόρεια Ελλάδα και ένα δάσος κοντά στα εργοστάσια παραγωγής ενέργειας, αντίστοιχα. Μετά από αεροξήρανση και λήψη αντιπροσωπευτικών δειγμάτων, ο λιγνίτης αλέστηκε σε θραυστήρα σιαγόνων και σφαιρόμυλο, ενώ τα υπολείμματα σε μαχαιρόμυλο. Όλα τα υλικά κοσκινίστηκαν σε μέγεθος σωματιδίων ≤ 200μm, προκειμένου να διασφαλιστεί ότι τα πειράματα θα διεξαχθούν σε συνθήκες κινητικά ελεγχόμενες. Προκειμένου να προσομοιωθούν εφαρμογές συμπαραγωγής σε ευρωπαϊκούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, παρασκευάστηκαν μίγματα καυσίμων με ποσοστά δασικών υπολειμμάτων 10%, 20% και 30% στο μείγμα.

Η προσεγγιστική ανάλυση, η στοιχειακή ανάλυση και η μέτρηση της θερμογόνου δύναμης πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με τα ευρωπαϊκά πρότυπα CEN / TC335 για τα καύσιμα βιομάζας και τα πρότυπα ASTM για τον λιγνίτη. Ο πειραματικός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε περιελάμβανε προγραμματιζόμενους εργαστηριακούς φούρνους, έναν αναλυτή Thermo Scientific CHNS, μοντέλο Flash 2000 και ένα θερμιδόμετρο βόμβας, μοντέλο AC-300 της Leco. Η ορυκτολογική ανάλυση της τέφρας πραγματοποιήθηκε με ένα περιθλασίμετρο ακτίνων X (XRD), τύπου D8 Advance της εταιρείας Bruker AXS. Η ανάλυση ευτηκτότητας της τέφρας πραγματοποιήθηκε με ένα θερμαινόμενο μικροσκόπιο, εξοπλισμένο με κάμερα υψηλής ευκρίνειας, μοντέλο Leitz Wetzlar EM201 της Hesse Instruments. Τα δείγματα τέφρας θερμάνθηκαν με ρυθμό 5 ° C / min σε οξειδωτική ατμόσφαιρα έως τους 1550 ° C και καταγράφηκαν οι χαρακτηριστικές θερμοκρασίες τήξης.

Για τις δοκιμές καύσης χρησιμοποιήθηκε ένας διαφορικός θερμοβαρυτομετρικός αναλυτής TG / DTG της Perkin Elmer. Η ευαισθησία του μικροζυγού ήταν <5 μg, η ακρίβεια 0,2% wt και η ακρίβεια θερμοκρασίας ± 2ºC. Οι περιορισμοί μεταφοράς θερμότητας και μάζας εξαλείφθηκαν χρησιμοποιώντας μικρές μάζες (~ 20 mg) και μεγέθη σωματιδίων ≤200 μm. Ο ρυθμός θέρμανσης ρυθμίστηκε στους 10°C / min και ο ρυθμός ροής του αέρα καύσης στα 35 mL / min. Το φέρον αέριο ήταν άζωτο. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, η απώλεια βάρους και ο ρυθμός απώλειας βάρους (καμπύλη DTG) καταγράφονταν συνεχώς ως συνάρτηση της θερμοκρασίας και του χρόνου, έως τους

900ºC. Δύο έως τρείς επαναλήψεις των πειραμάτων καθόρισαν την υψηλή αναπαραγωγιμότητα των δεδομένων, η οποία εκφράστηκε ως η σχετική τυπική απόκλιση (RSD). Τα θερμογραφήματα υποβλήθηκαν σε επεξεργασία για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών παραμέτρων. Η αντιδραστικότητα κάθε καυσίμου εκφράστηκε ως ο λόγος του μέγιστου ρυθμού προς την αντίστοιχη θερμοκρασία.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1. Χαρακτηρισμός καυσίμων

Ο Πίνακας 1 παρουσιάζει την προσεγγιστική και στοιχειακή ανάλυση των καυσίμων που μελετήθηκαν. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, τα δασικά υπολείμματα είχαν πολύ υψηλότερη περιεκτικότητα σε πτητικά συστατικά και πολύ χαμηλή περιεκτικότητα σε τέφρα σε σχέση με τον λιγνίτη. Οι υψηλότερες συγκεντρώσεις άνθρακα και υδρογόνου των δασικών υπολειμμάτων και η χαμηλή περιεκτικότητα τους σε τέφρα οδήγησαν σε υψηλότερη θερμαντική ικανότητα. Και τα δύο καύσιμα εμφάνισαν πολύ χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο, υποδηλώνοντας αμελητέες εκπομπές SOx κατά την καύση. Ωστόσο, η συγκέντρωση του αζώτου του λιγνίτη ήταν σημαντική, υπονοώντας πιθανές εκπομπές NOx κατά τη διάρκεια της διεργασίας.

Πίνακας 1. Προσεγγιστική και στοιχειακή ανάλυση των καυσίμων (% επί ξηρού)

Δείγμα	Πτητική ύλη	Μόνιμος άνθρακας	Τέφρα	C	H	N	O	S	GCV[a] (MJ/kg)
Δασικά Υπολείμματα (FR)	83.0	16.1	0.9	53.2	6.2	0.3	39.4	0.1	21.7
Λιγνίτης (LIG)	56.0	18.1	25.9	45.4	5.5	2.3	20.4	0.5	18.8

[a] Ανώτερη θερμογόνος δύναμη

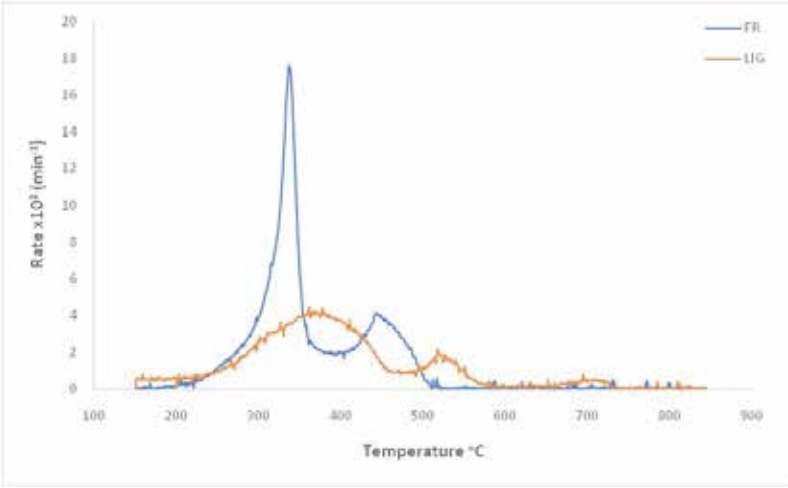
3.2. Συμπεριφορά καύσης αρχικών καυσίμων και των μιγμάτων τους

Τα προφίλ καύσης των δασικών υπολειμμάτων και του λιγνίτη συγκρίνονται στο Σχήμα 1, ενώ οι χαρακτηριστικές παράμετροι καύσης που καθορίστηκαν από αυτά τα θερμογραφήματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 2. Για τα δασικά υπολείμματα, σημαντική απώλεια βάρους σημειώθηκε μεταξύ 200 ° C και 370 ° C, με υψηλή κορυφή , η οποία αποδίδεται στην αποσύνθεση της ημικυτταρίνης και της κυτταρίνης. Το μεγαλύτερο μέρος των πτητικών απελευθερώθηκε και κάηκε σε αυτό το στάδιο. Τα δευτερογενή αέρια και το εξανθράκωμα κάηκαν μεταξύ 370 ° C και 500 ° C με χαμηλότερο ρυθμό, που αντιστοιχεί στο κλάσμα της λιγνίνης. Για τον λιγνίτη, η πρώτη περιοχή θερμοκρασίας, κατά την οποία οι πτητικές ουσίες και το εξανθράκωμα κάηκαν αργά, επεκτάθηκε έως τους 480 ° C, ενώ το λιγότερο αντιδραστικό εξανθράκωμα συνέχισε να καίγεται έως τους ~ 600 ° C. Όπως δείχνει ο Πίνακας 2, η μέγιστη θερμοκρασία, καθώς και η θερμοκρασία και ο χρόνος αποπεράτωσης της καύσης των δασικών υπολειμμάτων ήταν σημαντικά χαμηλότερες από εκείνες του λιγνίτη. Η αντιδραστικότητα της καύσης των δασικών υπολειμμάτων ήταν πενταπλάσια.

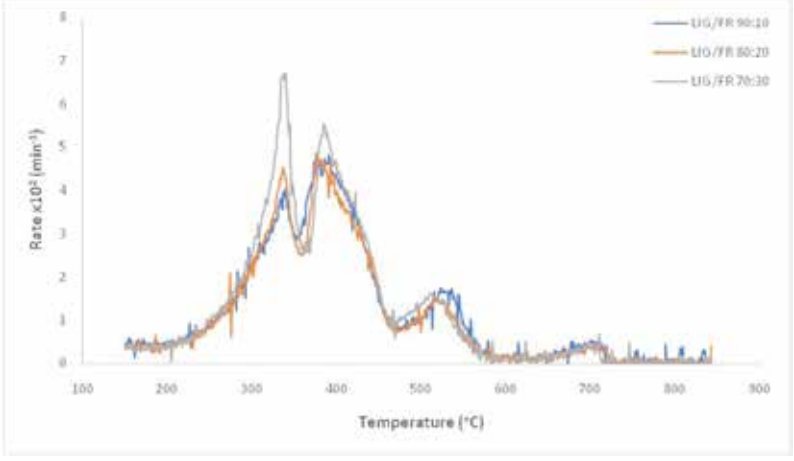
Πίνακας 2.Χαρακτηριστικές παράμετροι καύσης αρχικών καυσίμων και μιγμάτων

Δείγμα	T_i (°C)	T_{max} (°C)	R_{max} (10^2/min)	R_f (10^2/min°K)	T_b (°C)	t_b (min)
FR	205	337	17.6	12.6	523	41.3
LIG	215	362	4.3	2.8	733	62.3
LIG/FR 90:10	200	375	4.8	2.9	725	61.5
LIG/FR 80:20	200	375	4.8	2.9	733	62.3
LIG/FR 70:30	200	336	6.9	4.9	717	60.7

Στην περίπτωση των μειγμάτων λιγνίτη / δασικών υπολειμμάτων, από το Σχήμα 2 φαίνεται ότι η θέση κορυφής των μιγμάτων 90:10 και 80:20 ήταν περίπου η ίδια με εκείνη του αρχικού λιγνίτη, ενώ για το μείγμα 70:30 μετατοπίστηκε σε περίπου 30 ° C χαμηλότερη τιμή θερμοκρασίας και σχεδόν συνέπεσε με εκείνη των δασικών υπολειμμάτων. Επίσης, όπως δείχνει ο Πίνακας 2, ο μέγιστος ρυθμός αντίδρασης των μειγμάτων αυξήθηκε με αυξανόμενο το ποσοστό βιομάζας και η θερμοκρασία καύσης και ο χρόνος μειώθηκαν, ωστόσο αυτές οι τιμές δεν έδειξαν μια γραμμική σχέση με την αναλογία ανάμειξης, υπονοώντας ορισμένες αμοιβαίες αλληλεπιδράσεις μεταξύ των συστατικών καυσίμων. Παρ' όλα αυτά, τα δασικά υπολείμματα βελτίωσαν την αντιδραστικότητα και την απόδοση καύσης του λιγνίτη όταν αναμίχθηκαν με αυτόν.



Σχήμα 1: DTG προφίλ καύσης αρχικών καυσίμων (RSD=0.4-0.8%)



Σχήμα 2: DTG προφίλ καύσης μιγμάτων (RSD=1.1-1.6%)

3.3. Χαρακτηρισμός και συμπεριφορά τήξης των τεφρών των αρχικών καυσίμων και των μιγμάτων τους

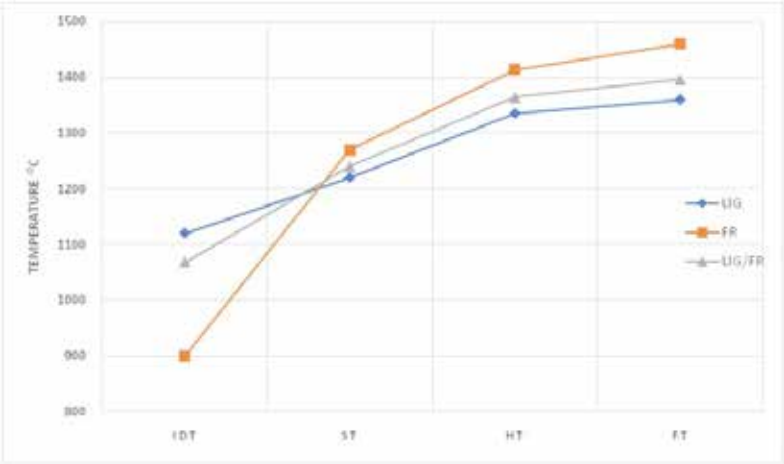
Ο Πίνακας 3 αντιπροσωπεύει τις ορυκτολογικές φάσεις που προσδιορίστηκαν στις τέφρες των καυσίμων από την ανάλυση XRD. Η τέφρα των δασικών υπολειμμάτων ήταν πλούσια σε ασβεστίτη και χαλαζία. Ο σίδηρος υπήρχε σε μικρότερες ποσότητες υπό μορφή αιματίτη και σιδερίτη. Το κάλιο και το νάτριο ήταν ενσωματωμένα σε αρκανίτη και αλβίτη, αντίστοιχα. Από την άλλη μεριά, η τέφρα του λιγνίτη, αν και περιείχε υψηλές ποσότητες σε χαλαζία και ασβεστίτη, παρουσίασε επίσης σημαντικές ποσότητες σε ανυδρίτη και αργιλοπυριτικά ορυκτά, όπως ο γκελενίτης, ο ανορθίτης και ο μοσχοβίτης. Ο σίδηρος ήταν ενσωματωμένος σε αιματίτη και μπραουνμιλερίτη, ενώ το μαγνήσιο σε περίκλαστο. Ο λαρνίτης ανιχνεύθηκε επίσης σε μικρές ποσότητες και λίγο οξείδιο ασβεστίου δημιουργήθηκε από αποσύνθεση ασβεστίτη σε υψηλές θερμοκρασίες. Όσον αφορά το μείγμα τέφρας λιγνίτη / δασικών υπολειμμάτων 70:30, οι ορυκτολογικές φάσεις ήταν οι ίδιες με αυτές των συστατικών καυσίμων. Δεν ήταν δυνατή η ανίχνευση του σιδερίτη και του λαρνίτη, καθώς βρίσκονταν σε χαμηλές ποσότητες.

Πίνακας 3 Ορυκτολογική ανάλυση τεφρών αρχικών καυσίμων και μιγμάτων

Ορυκτολογικές φάσεις	Δείγμα		
	Δασικά υπολείμματα	Λιγνίτης	Λιγνίτης / Δασικά υπολείμματα
Χαλαζίας SiO_2	++	+++	++
Ασβεστίτης $CaCO_3$	+++	++	+
Ανυδρίτης $CaSO_4$		++	++
Οξείδιο ασβεστίου CaO		+	+
Μοσχοβίτης $KAl_2(Si_3AlO_{10})(OH)_2$		+	+
Σιδερίτης $FeCO_3$	+		
Γκελενίτης $Ca_2Al(AlSi)O_7$		++	+
Αιματίτης Fe_2O_3	+	+	+
Αρκανίτης K_2SO_4	+		+
Περίκλαστο MgO		+	+
Αλβίτης $(Na,Ca)(Si,Al)_4O_8$		+	
Μπραουνμελερίτης $FeAlO_3(CaO)_2$		+	+
Ανορθίτης $Ca_{.66}Na_{.34}Al_{1.66}Si_{2.34}O_8$		++	+
Αλβίτης low $Na(AlSi_3O_8)$	+		+
Λαρνίτης Ca_2SiO_4		+	

+++: υψηλή ένταση ++: μέτρια ένταση +: χαμηλή ένταση

Η συμπεριφορά τήξης των τεφρών συγκρίνεται στο Σχήμα 3. Η αρχική θερμοκρασία παραμόρφωσης (IDT) και των δύο υλικών, που κυμαίνεται μεταξύ 900 ° C και 1120 ° C, θεωρείται χαμηλή για τα περισσότερα συστήματα καύσης, εκτός από τις ρευστοποιημένες κλίνες που λειτουργούν κάτω από 1000 ° C , δηλώνοντας προβλήματα εναποθέσεων στους λέβητες. Η χαμηλότερη IDT των δασικών υπολειμμάτων αποδίδεται στην περιεκτικότητά τους σε εύτηκτο αρκανίτη (σημείο τήξης 1070 ° C) [5]. Ωστόσο, η θερμοκρασία ροής (FT) των δασικών υπολειμμάτων ήταν 100 ° C υψηλότερη από εκείνη του λιγνίτη, αντανακλώντας την αυξημένη συγκέντρωσή του σε ασβεστίτη και ενώσεις σιδήρου υψηλότερου σημείου τήξεως (1339 ° C και 1500-1565 ° C, αντίστοιχα) [13] . Επιπλέον, μπορεί να παρατηρηθεί ότι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ IDT και FT των δασικών υπολειμμάτων ήταν σχεδόν διπλάσια σε σχέση με την τέφρα του λιγνίτη, υποδηλώνοντας χαμηλότερο ρυθμό επικαθίσεων στους λέβητες. Οι θερμοκρασίες τήξης των μιγμάτων λιγνίτη / δασικών υπολειμμάτων ήταν ενδιάμεσες των τεφρών των καυσίμων, σχεδόν αναλογικά με κάθε συστατικό του μείγματος. Επίσης, όταν ο λιγνίτης καίγεται μαζί με δασικά υπολείμματα, ο ρυθμός επικαθίσεων αναμένεται να είναι χαμηλότερος σε σύγκριση με τον λιγνίτη.



Σχήμα 3: Συμπεριφορά τήξης των τεφρών

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η καύση του λιγνίτη έλαβε χώρα μεταξύ 220 ° C και 730 ° C, ενώ εκείνη των δασικών υπολειμμάτων, τα οποία ήταν πλούσια σε πτητικά συστατικά (83%), μεταξύ 200 ° C και 520 ° C με πολύ υψηλότερο ρυθμό. Τα μίγματα λιγνίτη / δασικών υπολειμμάτων παρουσίασαν κάποια συνέργεια κατά την καύση. Η αύξηση του ποσοστού βιομάζας στο μείγμα βελτίωσε την αντιδραστικότητα σε σύγκριση με τον λιγνίτη. Η αρχική θερμοκρασία παραμόρφωσης της τέφρας θεωρείται χαμηλή για τις περισσότερες διεργασίες καύσης, ειδικά εκείνη των δασικών υπολειμμάτων λόγω της περιεκτικότητάς τους στο ορυκτό αρκανίτη. Ωστόσο, η θερμοκρασία ροής της τέφρας των δασικών υπολειμμάτων ήταν περίπου 100 ° C υψηλότερη από εκείνη του λιγνίτη και ο αναμενόμενος ρυθμός επικαθίσεων χαμηλότερος. Όταν τα δύο καύσιμα αναμίχθηκαν, η τάση για επικαθίσεις / επισκωριώσεις μειώθηκε σε σχέση με τον λιγνίτη.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς ευχαριστούν τα εργαστήρια Χημείας και Τεχνολογίας Υδρογονανθράκων και Εφαρμοσμένης Ορυκτολογίας του Πολυτεχνείου Κρήτης, για την στοιχειακή ανάλυση και τις αναλύσεις XRD.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Roni, M.S., Chowdhury, S., Mamun, S., Marufuzzaman, M., William, L., Samuel, J., 2017, “Biomass co-firing technology with policies, challenges and opportunities: A global review”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 78, pp. 1089-1101.

[2] Vamvuka, D., Loukakou, E., Sfakiotakis, S., Petrakis, E.,2020, “The impact of a combined pre-treatment on the combustion performance of various biomass wastes and their blends with lignite”, Thermochimica Acta, 688, pp. 178599.

[3] Drosatos, P., Nikolopoulos, N., Karampinis, E., Grammelis, P., Kakaras, E., 2018, “Comparative investigation of a co-firing scheme in a lignite-fired boiler at very low thermal-load operation using either pre-dried lignite or biomass as supporting fuel”, Fuel Processing Technology, 180, pp. 140-154.

[4] Liu, Y., He, Y., Wang, Z. , Xia, J., Wan, K., Whiddon, R., Cen, K., 2018, “Characteristics of alkali species release from a burning coal/biomass blend”, Applied Energy, 215, pp. 523-531.

[5] Vamvuka, D., Sfakiotakis, S., Mpoumpouris, A., 2018, “Slagging and fouling propensities of ashes from urban and industrial wastes”, Recent Innovations in Chemical Engineering, 11(2), pp. 145-158.

[6] Qu, X., Zhou, G., Cao, Y., Li, P., He, Y., Zhang, J., 2019, “Synergetic effect on the combustion of lignite blended with humus: Thermochemical characterization and kinetics”, Applied Thermal Engineering, 152, pp. 137-146.

[7] Vamvuka, D., Tsamourgeli, V., Zaharaki, D., Komnitsas, K., 2016, “Evaluation of co-combustion of mediterranean biomass/ lignite blends”, Energy Sources Part A, 38(14), pp. 2079-2085.

[8] Jayaraman, K., Kok, M., Gokalp, I., 2017, “Thermogravimetric and mass spectrometric (TG-MS) analysis and kinetics of coal-biomass blends”, Renewable Energy,101, pp. 293-300.

[9] Wang, P., Wang, G., Zhang, J., Lee, J., Li, Y., Wang, C., 2018, “Co-combustion characteristics and kinetic study of anthracite coal and palm kernel shell char”, Applied Thermal Engineering, 143, pp. 736-745.

[10] Haykiri-Acma, H., Yaman, S., Kucukbayrak, S., 2015, “Does carbonization avoid segregation of biomass and lignite during co-firing? Thermal analysis study”, Fuel Processing Technology, 137, pp. 312-319.

[11] European Association for Coal and Lignite-Euracoal, 2019, Euracoal Market, Accessed December 6, 2019. http://www.euracoal.eu

[12] Vamvuka, D., 2009, Biomass, Bioenergy and the Environment, Tziolas Publications, Salonica, Greece.

[13] Wikipedia, 2020, http://www.en_wikipedia.org/wiki/Melting-point

ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ

ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΜΗ-ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΟΥ – ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ – ΗΛΕΚΤΡΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Ιωάννης Ε. Κοσμαδάκης, Κωνσταντίνος Ελμασίδης

Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Δημοκρίτειο Παν. Θράκης,
e-mail: kelmasid@env.duth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η τροφοδοσία ηλεκτρικού φορτίου σε μη ηλεκτροδοτούμενες περιοχές μπορεί να καλυφθεί από φωτοβολταϊκές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα μειονέκτημα που παρουσιάζουν αυτές οι μονάδες αφορά την απρόβλεπτη φύση της ηλιακής ενέργειας. Επιπλέον, η χρονική κατανομή της ηλιακής ενέργειας ενδέχεται να μην ταιριάζει με αυτήν της ζήτησης ενέργειας. Τα συστήματα που συνδυάζουν φωτοβολταϊκές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να εξαλείψουν τα παραπάνω μειονεκτήματα. Παρόλα αυτά η υιοθέτηση τέτοιων λύσεων από μη – ηλεκτροδοτούμενες περιοχές πολλές φορές είναι οικονομικά απαγορευτικές. Για αυτό στο στάδιο σχεδιασμού τέτοιων συστημάτων θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όλες εκείνες οι παράμετροι που οδηγούν σε ένα λειτουργικά αξιόπιστο, αποδοτικό και χαμηλού κόστους σύστημα παραγωγής ενέργειας. Στην παρούσα εργασία γίνεται προσπάθεια σχεδιασμού (διαστασιολόγησης) μη-διασυνδεδεμένων Φωτοβολταϊκών Συστημάτων με Μπαταρία που να ικανοποιεί τα παραπάνω κριτήρια. Η προσπάθεια βασίζεται στη σύνθεση της εξίσωσης που εκφράζει το Σταθμισμένο Κόστος Ενέργειας (Levelized Cost of Energy - LCOE) και ορίζεται ως η εκτίμηση κόστους του συστήματος σε βάθος χρόνου ανά μονάδα ενέργειας. Στόχος της μεθοδολογίας είναι να επιλεγεί ο κατάλληλος συνδυασμός του αριθμού των φωτοβολταϊκών πάνελ και της ονομαστικής ενέργειας της μπαταρίας ώστε το κόστος του συστήματος ανά μονάδα ενέργειας για ένα χρονικό διάστημα 25 ετών να ελαχιστοποιείται.

Λέξεις Κλειδιά Φωτοβολταϊκά, μπαταρία, Η/Ζ, σταθμισμένο κόστος ενέργειας

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μπορούν, μακροπρόθεσμα, να εξασφαλίσουν βιώσιμο ενεργειακό εφοδιασμό και να μειώσουν τις τοπικές και παγκόσμιες ατμοσφαιρικές εκπομπές ρύπων. Επιπλέον, είναι η πιο υποσχόμενη λύση για την τροφοδοσία φορτίου σε απομακρυσμένες και αγροτικές περιοχές που δεν ηλεκτροδοτούνται από ηλεκτρικό δίκτυο. Σύμφωνα με μια πρόσφατη μελέτη [1] ο πληθυσμός που δεν είχε πρόσβαση στην ηλεκτρική ενέργεια το 2018 εκτιμάτε να ήταν 861 εκατομμύρια άνθρωποι. Η μείωση του κόστους των φωτοβολταϊκών με παράλληλη αύξηση της αποδοτικότητάς τους έχει καταστήσει τα μη διασυνδεδεμένα ηλιακά συστήματα παροχής ισχύος οικονομικά πιο ελκυστικά, με αποτέλεσμα την αυξανόμενη χρήση τους για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών των προαναφερθέντων πληθυσμών. Συγκεκριμένα, από το 2010 έχουν εγκατασταθεί περισσότερα από 180 εκατομμύρια μη διασυνδεδεμένα ηλιακά συστήματα σε περιοχές όπου οι άνθρωποι δεν είχαν πρόσβαση στην ηλεκτρική ενέργεια. Ωστόσο, μόνο το 17% αυτών των συστημάτων χρησιμοποιήθηκαν για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών των νοικοκυριών, ενώ η μέγιστη ισχύς των συστημάτων που ανήκαν στο υπόλοιπο 83% δεν ξεπερνούσε τα 10 W τα οποία κάλυπταν κυρίως ανάγκες φωτισμού και φόρτισης κινητών [1]. Προκειμένου να αυξηθεί περαιτέρω ο αριθμός των εγκατεστημένων συστημάτων για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών των νοικοκυριών που δεν έχουν πρόσβαση σε ηλεκτρική ενέργεια, βελτιώνοντας παράλληλα την ποιότητα ζωής αυτών των λαών, θα πρέπει να αναπτυχθούν μέθοδοι που θα οδηγήσουν σε βέλτιστες τεχνοοικονομικές λύσεις. Ορισμένες από τις προσπάθειες που έχουν καταβληθεί προς αυτή την κατεύθυνση περιγράφονται παρακάτω.

Διάφορες ερευνητικές ομάδες ασχολήθηκαν με τη βέλτιστη διαστασιολόγηση συστημάτων Φωτοβολταϊκών – Μπαταρίας (PV-Bat) χρησιμοποιώντας κατάλληλα εργαλεία λογισμικού. Για παράδειγμα, ένα ευρέως διαδεδομένο λογισμικό είναι το Hybrid Optimization Model for Electric Renewables (HOMER) το οποίο αναπτύχθηκε προκυμμένου να προσδιορίσει το βέλτιστο μέγεθος των υποσυστημάτων ενός PV-Bat συστήματος μέσω μιας τεχνο-οικονομικής ανάλυσης. Στην πολύ περιεκτική ανασκόπηση [2] περιγράφεται πως λειτουργεί αυτό το λογισμικό. Τα δεδομένα εισόδου που απαιτούνται για την προσομοίωση και τη βελτιστοποίηση των PV-Bat συστημάτων είναι τα τοπικά μετεωρολογικά δεδομένα, το προφίλ του φορτίου, τα τεχνικά και οικονομικά χαρακτηριστικά του εξοπλισμού.

Άλλα διαθέσιμα εργαλεία λογισμικού για τη βέλτιστη διαστασιολόγηση αυτόνομων PV-Bat συστημάτων είναι τα: Improved Hybrid Optimization by Genetic Algorithms (IHOGA), Transient Systems Simulation Program (TRNSYS), RETScreen, and PVSYST [3]. Όλα αυτά τα λογισμικά χρησιμοποιούν σχεδόν τα ίδια δεδομένα εισόδου με εκείνα που αναφέρθηκαν για το λογισμικό HOMER στην προηγούμενη παράγραφο. Παρόλα αυτά, τα αποτελέσματα κάθε λογισμικού και της εφαρμογής τους διαφέρουν όπως περιγράφεται λεπτομερώς στην αναφορά [3].

Εκτός από την ανάπτυξη λογισμικών, πολλές ερευνητικές ομάδες ανέπτυξαν εργαλεία και τεχνικές βελτιστοποίησης προς την ίδια κατεύθυνση για να προσεγγίσουν μια βέλτιστη τεχνοοικονομική λύση. Οι προσπάθειες αυτές μπορούν να ταξινομηθούν σε διάφορες κατηγορίες μεταευριστικών αλγορίθμων επαναληπτικής βελτίωσης όπως είναι οι γενετικοί αλγόριθμοι, οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων, προσομοιωμένης ανόπτησης, αλγόριθμοι αποικίας μυρμηγκιών. Πληροφορίες σχετικά με την φιλοσοφία ανάπτυξης αυτών των μεθόδων και τον τρόπο χρήσης τους μπορεί κάποιος να βρει στην ανασκόπηση [4].

Ένα κοινό χαρακτηριστικό των μεθόδων διαστασιολόγησης είναι η κατασκευή μιας αντικειμενικής συνάρτησης και η προσπάθεια βελτιστοποίησης της μέσω της μεταβολής λειτουργικών, τεχνικών και οικονομικών παραμέτρων. Η ευρέως χρησιμοποιούμενη αντικειμενική συνάρτηση είναι το σταθμισμένο κόστος ενέργειας (LCOE) [5-7]. Το LCOE παρέχει μια ένδειξη του κόστους ανά μονάδα ενέργειας σε όλη τη διάρκεια λειτουργίας του υπό διαστασιολόγηση συστήματος. Σε γενικές γραμμές, το LCOE αθροίζει όλα τα κόστη στη διάρκεια ζωής ενός ενεργειακού συστήματος και τα διαιρεί με τη συνολική παραγωγή ενέργειας σε όλη τη διάρκεια ζωής.

Στην παρούσα εργασία γίνεται προσπάθεια σχεδιασμού (διαστασιολόγησης) μη-διασυνδεδεμένων Φωτοβολταϊκών Συστημάτων με Μπαταρία. Η μέθοδος βασίζεται στη σύνθεση της εξίσωσης που εκφράζει το LCOE. Στόχος της μεθοδολογίας είναι να επιλεγεί ο κατάλληλος συνδυασμός του αριθμού των φωτοβολταϊκών πάνελ και της ονομαστικής ενέργειας της μπαταρίας ώστε το κόστος του συστήματος (κόστος αγοράς εξοπλισμού, κόστος αντικατάστασης μπαταριών, κόστος απωλειών ενέργειας, κόστος χρήσης ενέργειας από εφεδρική πηγή ενέργειας) ανά μονάδα ενέργειας για ένα

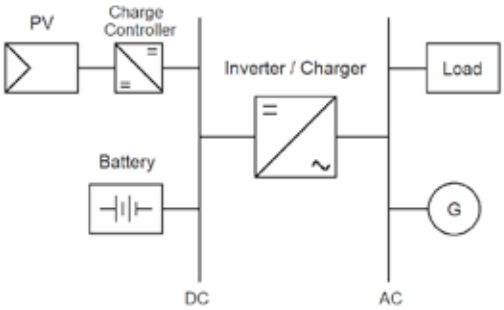
χρονικό διάστημα 25 ετών να ελαχιστοποιείται. Για την διεξαγωγή της μελέτης εκτιμάται η ωριαία παραγόμενη από τα φωτοβολταϊκά ενέργεια καθώς επίσης χρησιμοποιείται το προφίλ κατανάλωσης από ένα τυπικό οικιακό φορτίο.

Η διαστασιολόγηση πραγματοποιείται με βάση μια λεπτομερή ετήσια χρονοσειρά κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας και έχει ως αποτέλεσμα έναν βελτιστοποιημένο σχεδιασμό PV-Bat. Επομένως το προϊόν του παρόντος αλγορίθμου καλύπτει την κατανάλωση ενέργειας πιο ρεαλιστικά, σε αντίθεση με τους αλγορίθμους που χρησιμοποιούν είτε απομονωμένα χρονικά διαστήματα είτε γενικευμένες μέσες τιμές καταναλώσεων [8-15]. Επιπρόσθετα, αποτελεί μια αριθμητική μέθοδο που παράγει όχι μόνο τις βέλτιστες διαμορφώσεις ΦΒ και μπαταριών, αλλά προσδιορίζει επίσης τον εκτιμώμενο χρόνο λειτουργίας της ενεργειακής εφεδρείας και την πραγματικά χρησιμοποιούμενη «συγκομιδή» ηλιακής ενέργειας, υπολογίζοντας συνεπώς ένα ακριβέστερο LCOE.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1 Αρχιτεκτονική μη διασυνδεδεμένου συστήματος

Στα ΦΒ συστήματα με μπαταρία η συνηθέστερη αρχιτεκτονική είναι αυτή της σύζευξης συνεχούς ρεύματος (DC-Coupling). Οι φωτοβολταϊκές συστοιχίες συνδέονται μέσω μονοκατευθυντικών μετατροπέων DC/DC, γνωστοί συνήθως ως ρυθμιστές φόρτισης σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT), στους ζυγούς συνεχούς ρεύματος του συστήματος. Η μπαταρία συνδέεται απευθείας στους ζυγούς, σχηματίζοντας παράλληλη σύνδεση με την έξοδο του ρυθμιστή φόρτισης στην DC πλευρά ενός αντιστροφέα. Σε αυτήν τη ρύθμιση, οι φωτοβολταϊκές μονάδες τροφοδοτούν το φορτίο στην πλευρά κατανάλωσης σε δυο βήματα, μέσω του ρυθμιστή φόρτισης και στη συνέχεια μέσω ενός αντιστροφέα. Η μπαταρία συμβάλει επίσης στην τροφοδοσία του φορτίου σε ένα βήμα, μέσω του αντιστροφέα. Σε αυτόνομα συστήματα, μη διασυνδεδεμένα σε κάποιο ηλεκτρικό δίκτυο, μια εφεδρική πηγή ισχύος σε κατάσταση αναμονής στην AC πλευρά του αντιστροφέα, τροφοδοτεί απευθείας το φορτίο όταν δεν υπάρχει διαθέσιμη ενέργεια από τα ΦΒ ή την μπαταρία. Η φόρτιση της μπαταρίας από την εφεδρική πηγή ισχύος πραγματοποιείται μέσω ενός ενσωματωμένο στο αντιστροφέα πρόσθετο ανορθωτή AC/DC. Αυτή η απλή και στιβαρή τοπολογία διευκολύνει την αξιόπιστη και αποτελεσματική φόρτιση των μπαταριών, ειδικά σε περιπτώσεις όπου πρέπει να μεγιστοποιηθεί η φωτοβολταϊκή παραγωγή. Επιπρόσθετα, η σύζευξη DC αποτελεί οικονομικότερη λύση σε συστήματα εκτός δικτύου μικρού έως μεσαίου μεγέθους. Τα εν λόγο συστήματα είναι εύκολα επεκτάσιμα, καθώς επιπλέον φωτοβολταϊκές συστοιχίες μπορούν εύκολα να προστεθούν στους DC ζυγούς χρησιμοποιώντας ρυθμιστές φόρτισης χαμηλού κόστους.



Εικόνα 1: Αρχιτεκτονική μη διασυνδεδεμένου φωτοβολταϊκού συστήματος με μπαταρία και εφεδρική ηλεκτρογεννήτρια.

Στην παρούσα εργασία, έχουν ληφθεί υπόψη μόνο φωτοβολταϊκές μονάδες από κρυσταλλικό πυρίτιο, δεδομένου ότι αποτελούν τον πιο διαδεδομένο φωτοβολταϊκό τύπο στην αγορά φωτοβολταϊκών. Επί του παρόντος, βιομηχανικά κύτταρα πυριτίου, επιτυγχάνουν βαθμό απόδοσης από 18% έως 22% σε πρότυπες συνθήκες δοκιμής (STC) [16]. Το κόστος φωτοβολταϊκής μονάδας κρυσταλλικού πυριτίου το 2020 κυμαινόταν από περίπου 0,45 €/Wp έως 0,25 €/Wp, συνεχίζοντας την παγκόσμια πτωτική τάση στη μέση τιμή πώλησης [17]. Τα κριτήρια για την επιλογή των φωτοβολταϊκών πάνελ είναι ο βαθμός

απόδοσης ως συνάρτηση των συντελεστών θερμοκρασίας, των εγγυήσεων του προϊόντος και της απόδοσης, και του κόστος αγοράς των φωτοβολταϊκών σε € ανά εγκατεστημένη ισχύ. Για τους σκοπούς προσομοίωσης της παρούσας εργασίας, επιλέχθηκαν τα χαρακτηριστικά της ΦΒ μονάδας SolarCall SCM310, από μονοκρυσταλλικό πυρίτιο [18], τα βασικά χαρακτηριστικά της οποίας αναγράφονται στον Πίνακα 1, μαζί με τα χαρακτηριστικά των μπαταριών και της ενεργειακής εφεδρείας.

Ο βαθμός απόδοσής του ρυθμιστή φόρτισης θεωρήθηκε σχετικά σταθερός σε ολόκληρο το εύρος ισχύος του μετατροπέα, περίπου 95%. Ωστόσο, επειδή οι αντιστροφείς είναι σχεδιασμένοι για να επιτυγχάνουν υψηλούς βαθμούς απόδοσης όταν λειτουργούν σε πλήρη ισχύ, ο βαθμός απόδοσης του αντιστροφέα που χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις θεωρήθηκε μεγαλύτερος από 90% όταν η ισχύς εξόδου ήταν μεγαλύτερη από το 20% της ονομαστικής ισχύος του αντιστροφέα. Επίσης θεωρήθηκε ότι οι ρυθμιστές φόρτισης έχουν τάση εισόδου, που κυμαίνεται από 75V έως 150V και ένταση εξόδου έως 70A. Ο αντιστροφέας φέρει ενσωματωμένο φορτιστή μπαταρίας και ρελέ ενεργοποίησης γεννήτριας και η φαινόμενη ισχύς του θεωρήθηκε ίση με 5000VA.

Η μπαταρία μολύβδου-οξέος εξακολουθεί να αποτελεί επιλογή στην αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας σε αυτόνομα υβριδικά συστήματα, ειδικά όταν το αρχικό κόστος κεφαλαίου ή ο υψηλός ρυθμός ανακύκλωσης παίζουν σημαντικό ρόλο. Στην σύζευξη συνεχούς ρεύματος, η μπαταρία συνδέεται απευθείας στους ζυγούς DC και επομένως καθορίζει την τάση λειτουργίας του συστήματος. Εδώ η ονομαστική τάση συστήματος θεωρήθηκε ίση με 48V. Το γινόμενο της ονομαστικής χωρητικότητας της μπαταρίας, επί την ονομαστική τάση καθορίζει την ονομαστική ενεργειακή χωρητικότητα της μπαταρίας που χρησιμοποιείται στην προσομοίωση. Επιπλέον, σημαντικά χαρακτηριστικά της μπαταρίας όπως ονομαστικοί κύκλοι φόρτισης-εκφόρτισης στο μέγιστο βάθος εκφόρτισης (DOD) και η ημερολογιακή διάρκεια ζωής της μπαταρίας, εξήχθησαν από τα φύλλα δεδομένων γνωστών κατασκευαστών μπαταριών.

Τα ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη (HZ) τροφοδοτούνται με καύσιμο και γενικά κατηγοριοποιούνται σύμφωνα με την χρήση τους σε αδιάληπτης ή εφεδρικής λειτουργίας. Τα τελευταία χρησιμοποιούνται ως εφεδρικές ηλεκτρογεννήτριες που τροφοδοτούν άμεσα το φορτίο όταν η κύρια τροφοδοσία, σε αυτή την περίπτωση το ΦΒ σύστημα με μπαταρία, αποτύχει ή αδυνατεί. Η ορθή διαστασιολόγηση των εφεδρικών ηλεκτρογεννητριών σε υβριδικά ενεργειακά συστήματα αποτελεί ένα βασικό κομμάτι στον οικονομικό και ανθεκτικό σχεδιασμό των εκτός δικτύου συστημάτων ηλεκτροδότησης [19, 20]. Επί του παρόντος, οι κινητήρες φυσικού αερίου και ντίζελ αποτελούν την πρώτη επιλογή εφεδρικών ηλεκτρογεννητριών, αν και η βιομάζα και το βιοαέριο κερδίζουν συνεχώς έδαφος. Ωστόσο, υπάρχουν πολλοί άλλοι κρίσιμοι παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στην επιλογή εφεδρικών HZ. Αυτά τα συστήματα λειτουργούν κυρίως σε περιορισμένα και ακαθόριστα χρονικά διαστήματα, και βρίσκονται σε ανενεργή κατάσταση για το μεγαλύτερο μέρος της ζωής τους. Επομένως, είναι σημαντικό να οριοθετηθούν τα χρονικά διαστήματα λειτουργίας των HZ. Για την διαστασιολόγηση τους πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ο μέγιστος συνεχόμενος χρόνος λειτουργίας (CTU), ο εκτιμώμενος ετήσιος χρόνος λειτουργίας (APT) και το μέσο εξυπηρετούμενο φορτίο (ALV), συναρτήσει της ονομαστικής ισχύος της γεννήτριας. Επιπλέον, η ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που παρέχεται στο φορτίο από τα HZ εξαρτάται από την ποσότητα των καυσίμων που καταναλώνεται, η οποία με τη σειρά της είναι συνάρτηση της απόδοσης της γεννήτριας και του χρόνου λειτουργίας της. Η συνολική διάρκεια ζωής τέτοιων συστημάτων μπορεί να φτάσει τα 20 χρόνια εφόσον η γεννήτρια συντηρείται τακτικά και δεν υπερβαίνονται οι CTU και APT [21].

Πίνακας 1 Τεχνικά χαρακτηριστικά των ΦΒ μονάδων, της Μπαταρίας και ενεργειακής εφεδρείας (H/Z)

Φωτοβολταϊκά		Μπαταρία		Ηλεκτρογεννήτρια	
Εμβαδό ΦΒ	1,627 μ^2	Τεχνολογία	Μολύβδου - Οξέος	Καύσιμο	Diesel
Ονομαστική Ισχύς	310 Wp	Ονομαστική ενεργειακή χωρητικότητα	5 - 30 kWh	Μέγιστη Ισχύς / ALV	4500W / 4000W
Βαθμός Απόδοσης ΦΒ	19 %	Κύκλος ζωής στο 50% DOD	2500 κύκλοι	συν(φ) / Βαθμός Απόδοσης H/Z	0.8 / 90%
ο συντελεστής θερμοκρασίας μέγιστης ισχύος	-0,40 % / °C	Μέγιστη ημερολογιακή ζωή [22]	5 έτη	CTU / APT	5ώρες / 500ώρες ανά έτος

Εγγύηση Γραμμικής Απόδοσης 15ετία/ 30ετία	91,2 % / 80,6 %	Ετήσιο Κόστος Συντήρησης Μπαταρίας	0€	Ετήσιο Κόστος Συντήρησης Η/Ζ	235€ - 260€
Κόστος Προμήθειας	0,35€/W - 0,55€/W	Κόστος Προμήθειας	154 €/kWh	Κόστος Προμήθειας	1390€/τεμ. – 1650€/τεμ.

2.2 Ετήσια παραγωγή ενέργειας από Φωτοβολταϊκά

Στην παρούσα εργασία η προσομοίωση της ετήσιας παραγωγής φωτοβολταϊκής ενέργειας, απαιτεί τη χρήση τυποποιημένων δεδομένων της φωτοβολταϊκής μονάδας και ωριαίων μετεωρολογικών δεδομένων για ένα ημερολογιακό έτος από την θέση της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης. Ωριαίες χρονοσειρές ολικής οριζόντιας ακτινοβολίας (GHI), ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας (T) και ταχύτητας ανέμου (WS) χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ανάλογων χρονοσειρών άμεσης κανονικής ακτινοβολίας (DNI) και διάχυτης οριζόντιας ακτινοβολίας (DHI), μέσω των μοντέλων DISC και DIRINT [23, 24].

Λαμβάνοντας υπόψη την κλήση και των προσανατολισμό των ΦΒ μονάδων, υπολογίζονται οι χρονοσειρές των γωνιών πρόσπτωσης (AOI) της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια των ΦΒ, ως συνάρτηση της ηλιακής θέσης αναφορικά με το γεωγραφικό πλάτος, μήκος και υψόμετρο της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης. Ακολούθως, υπολογίζονται ωριαίες χρονοσειρές της συνολικής ηλιακής προσπίπτουσας ακτινοβολίας (Epoa) οι οποίες αρχικά, μαζί με τις μετρήσεις ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας και ταχύτητας ανέμου, τροφοδοτούνται σε μοντέλο θερμοκρασίας του εργαστηρίου Sandia [25] για τον υπολογισμό των θερμοκρασιών ΦΒ πλαισίου (TC) και ΦΒ κυττάρου (TM).

Στη συνέχεια, οι χρονοσειρές Epoa εισάγονται στο μοντέλο πέντε παραμέτρων [26] που οδηγεί τελικά στις πέντε αντίστοιχες εξόδους του μοντέλου που είναι (i) το φωτόρευμα (IL), (ii) το ρεύμα αντίστροφου κορεσμού διόδου (Io), (iii) η αντίσταση σειράς (Rs), (iv) η αντίσταση διακλάδωσης (Rsh) και (v) ο τροποποιημένος ιδεατός παράγοντας διόδου (nNsVth). Αυτές οι έξοδοι αποτελούν τις εισόδους για το ευρέως αποδεκτό μοντέλο μονής διόδου [27, 28] για φωτοβολταϊκές μονάδες από το οποίο λαμβάνονται εκτιμήσεις ισχύος. Στον υπολογισμό λαμβάνονται υπόψη πρόσθετες απώλειες λόγω της αντανακλαστικότητας και της ρύπανσης του γυαλιού στην πρόσοψη του φωτοβολταϊκού. Η ετήσια φωτοβολταϊκή παραγωγή διορθώνεται περαιτέρω με έναν συντελεστή υποβάθμισης 0.9, βελτιστοποιώντας τις εκτιμήσεις ισχύος για μια τυπική περίοδο 25 ετών.

Η εφαρμογή του μοντέλου και η επεξεργασία δεδομένων πραγματοποιήθηκαν στην γλώσσα προγραμματισμού Python χρησιμοποιώντας τη βιβλιοθήκη ηλιακής προσομοίωσης PVLIB για συστήματα φωτοβολταϊκής ενέργειας [29 - 33]. Χρησιμοποιώντας ένα τυπικό μετεωρολογικό έτος (TMY) [34] για μια καθορισμένη τοποθεσία (Ξάνθη, Ελλάδα) σε συνδυασμό με την ανωτέρω περιγραφείσα μέθοδο εκτίμησης φωτοβολταϊκής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, δημιουργήθηκαν συνολικά 8760 ωριαία σημεία φωτοβολταϊκής ισχύος. Αυτά αντιπροσωπεύουν την ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από μία φωτοβολταϊκή μονάδα. Αυτή η έξοδος αναφοράς πολλαπλασιάστηκε στη συνέχεια με τον αντίστοιχο αριθμό των φωτοβολταϊκών μονάδων που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε βήμα για τον προσδιορισμό της συνολικής ετήσιας ενέργειας.

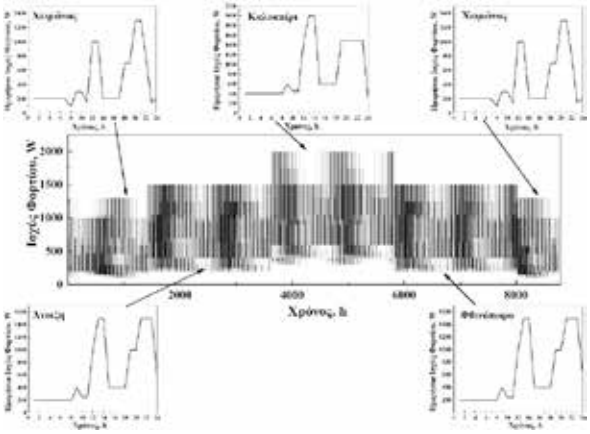
2.3 Ετήσια ενεργειακή απαίτηση φορτίου

Για τις ανάγκες προσομοίωσης στην παρούσα εργασία συντέθηκε ένα προφίλ κατανάλωσης ενέργειας μιας οικίας 4 ατόμων. Η ενεργειακή ανάλυση αφορά χρονικό διάστημα μιας ώρας ώστε να ταιριάζει με την ανάλυση του προφίλ παραγωγής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά. Έτσι δημιουργήθηκε μια χρονοσειρά 8760 σημείων της ανελαστικής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας.

Το προφίλ που χρησιμοποιήθηκε, σχεδιάστηκε με βάση τα αποτελέσματα δημοσιευμένων έρευνών στον ελληνικό χώρο [35, 36, 37].
Η συνολική ετήσια κατανάλωση ανέρχεται στις περίπου 5500 kWh με ένα ελάχιστο μηνιαίο βασικό φορτίο περίπου 300kWh το οποίο διαμορφώνεται από τους χειμερινούς μήνες, από Δεκέμβριο έως τον Φεβρουάριο, όπως μπορεί να παρατηρηθεί στην εικόνα 2.

Εικόνα 2 Συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ανά μήνα. Το βασικό φορτίο των τριών μηνών με την χαμηλότερη κατανάλωση ανέρχεται σε περίπου 300kWh.

Το προφίλ ακολουθεί την καθημερινή δραστηριότητα τεσσάρων ανθρώπων ενός νοικοκυριού και παρουσιάζει εποχιακές διακυμάνσεις. Συγκεκριμένα, και όπως γίνεται φανερό στην εικόνα 3, η μέγιστη ισχύς που εμφανίζεται σε ένα 24ωρο αυξάνεται από το χειμώνα στο καλοκαίρι με τιμές 1.2kW και 2kW, αντιστοίχως. Ενώ για την άνοιξη και το φθινόπωρο θεωρούμε ότι η μέγιστη τιμή σε ένα 24ωρο δεν ξεπερνά την τιμή των 1.4kW. Επιπλέον, το ημερήσιο προφίλ παρουσιάζει δύο μέγιστες καταναλώσεις, μία φορά το μεσημέρι και μία φορά το βράδυ παρόμοιο με αυτό που εμφανίζεται στην αναφορά [38].

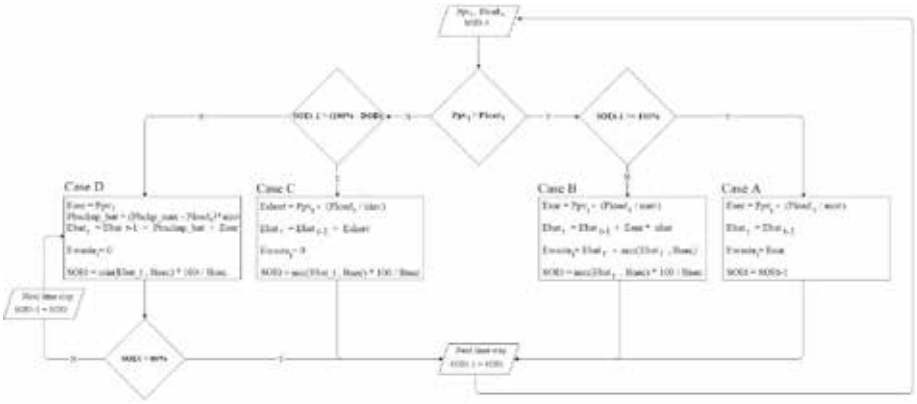


Εικόνα 3: Ωριαίο ενεργειακό προφίλ φορτίου για ένα έτος με βάση την καθημερινή χρήση ηλεκτρικών συσκευών από ένα νοικοκυριό 4 ατόμων.

2.4 Αλγόριθμος λειτουργίας και διαστασιολόγησης μη διασυνδεδεμένου συστήματος

Σε αυτήν την παράγραφο παρουσιάζεται αναλυτικά ο αλγόριθμος λειτουργίας ενός μη διασυνδεδεμένου συστήματος με την αρχιτεκτονική που περιεγράφηκε στην ενότητα 2.1. Η προσομοίωση ξεκινά σε χρόνο t=0 που αντιστοιχεί στην ώρα 00:00 της πρώτης μέρας του έτους. Σε αυτήν τη χρονική στιγμή θεωρούμε ότι η ενεργειακή στάθμη της μπαταρίας βρίσκεται στο μέγιστο, δηλαδή SOE = 100%. Αρχικά γίνεται η εκτίμηση της ενέργειας που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά (ενότητα 2.2) και αντιπαραβάλλεται η απαίτηση του φορτίου (ενότητα 2.3). Στη συνέχεια γίνεται

έλεγχος της ύπαρξης ή μη περίσσειας ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Ανάλογα με το αν υπάρχει περίσσεια ή έλλειμα ενέργειας διακρίνονται οι περιπτώσεις που παρουσιάζονται στην εικόνα 4 και περιγράφονται αναλυτικά στη συνέχεια. Η εφαρμογή του αλγόριθμου, η επεξεργασία δεδομένων και εξαγωγή αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκαν στην γλώσσα προγραμματισμού Python χρησιμοποιώντας τις βιβλιοθήκες Numpy και Pandas [39, 40].



Εικόνα 4: Αλγόριθμος λειτουργίας μη διασυνδεδεμένου συστήματος

2.4.1 Περίπτωση περίσσειας ενέργειας

Στην περίπτωση αυτή, η διαθέσιμη πλεονάζουσα ενέργεια, που ορίζεται ως E_{sur}, θα πρέπει είτε να χρησιμοποιείται για τη φόρτιση της μπαταρίας είτε να απορρίπτεται.

$$E_{sur} = [P_{PV} - (\frac{P_{load}}{n_{inv}})]\Delta t \geq 0 \quad (1)$$

Όπου n_{inv} είναι η απόδοση του αντιστροφέα για την οποία μπορεί να ληφθεί τιμή από το φύλλο προδιαγραφών του κατασκευαστή.

Διακρίνουμε δύο υποπεριπτώσεις: στην πρώτη η στάθμη ενέργειας (SOE) της μπαταρίας να είναι μεγαλύτερη ή ίση της μονάδας ενώ στη δεύτερη είναι μικρότερη της μονάδας. Στην περίπτωση που ισχύει η συνθήκη SOE≥1, η πλεονάζουσα ενέργεια E_{sur} δεν μπορεί να απορροφηθεί από την μπαταρία και απορρίπτεται. Με το SOE να παραμένει ανεπηρέαστο, ο αλγόριθμος προχωρά στο επόμενο ωριαίο βήμα με τις ακόλουθες εξισώσεις.

$$E_{waste} = E_{sur} \quad (2)$$

και

$$SOE_t = SOE_{t-1} \quad (3)$$

Ο δείκτης t-1 σημαίνει ότι ο υπολογισμός της SOE έγινε λαμβάνοντας υπόψη τα στοιχεία που ελήφθησαν στο προηγούμενο ωριαίο έλεγχο.

Διαφορετικά, στην υποπερίπτωση που ισχύει SOE ≤ 100%, η μπαταρία είναι σε μερικώς φορτισμένη κατάσταση και συνεπώς μπορεί να δεχτεί το ενεργειακό ποσό Esur. Στην περίπτωση αυτή το SOE αλλά και η απορριπτόμενη ενέργεια Ewaste θα δίνονται από τη σχέση:

$$SOE_t = \frac{\min(Ebat_t, B_{nec}) * 100}{B_{nec}} \quad (4)$$

με

$$Ebat_t = Ebat_{t-1} + E_{sur} * n_{bat} \quad (5)$$

και

$$E_{waste} = Ebat_t - \min(Ebat_t, B_{nec}) \quad (6)$$

όπου E_{batt} είναι η υπόλοιπη ποσότητα ενέργειας που θα μεταφερθεί στην μπαταρία τη στιγμή t και n_{bat} είναι η απόδοση φόρτισης της μπαταρίας. Στη συνέχεια, ο αλγόριθμος προχωρά στο επόμενο ωριαίο βήμα. Πρέπει να σημειωθεί ότι στην υποκατηγορία αυτή υπάρχει η περίπτωση το SOE της μπαταρίας να είναι σε υψηλά επίπεδα και ένα μέρος από την περίσσεια ενέργειας να χρησιμοποιηθεί για την πλήρη φόρτιση της μπαταρίας ενώ το υπόλοιπο να απορριφθεί. Έτσι ερμηνεύεται η μορφή της εξίσωσης 4 και η ύπαρξη της εξίσωσης (6).

2.4.2 Περίπτωση έλλειψης ενέργειας

Σε αυτήν την περίπτωση η παραγόμενη από τα φωτοβολταϊκά ενέργεια δεν μπορεί να καλύψει πλήρως τις ενεργειακές ανάγκες του φορτίου. Το ποσό ενέργειας που αποτελεί το έλλειμα ενέργειας (E_{short}) για την πλήρη κάλυψη των αναγκών του φορτίου μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$E_{short} = P_{PV} - \left(\frac{P_{load}}{n_{inv}}\right) < 0 \quad (7)$$

Και εδώ μπορούμε να διακρίνουμε δύο υποκατηγορίες σύμφωνα με το SOE. Όταν η τιμή του SOE είναι υψηλότερη από το κάτω όριο που έχει τεθεί (100% - DOD) τότε η μπαταρία είναι μερικώς φορτισμένη και συνεισφέρει στην κάλυψη του ενεργειακού ελλείματος του φορτίου όπως προκύπτει από τη σχέση (7). Σε αυτήν την περίπτωση το SOE ορίζεται από την εξίσωση (8).

$$Ebat_t = Ebat_{t-1} - E_{short} \quad (8)$$

και

$$E_{waste} = 0 \quad (9)$$

Στην περίπτωση που το SOE είναι μικρότερο από το κάτω όριο που έχει τεθεί (100% - DOD), γεγονός που δηλώνει ότι η μπαταρία είναι πλήρως εκφορτισμένη, η εφεδρεία αναλαμβάνει την πλήρη κάλυψη του φορτίου αλλά και την παράλληλη φόρτιση της μπαταρίας. Η εφεδρεία θα λειτουργήσει όσα ωριαία βήματα απαιτούνται για την πλήρη φόρτιση της μπαταρίας.

Η φόρτιση της μπαταρίας από την εφεδρεία θα ακολουθήσει τα βήματα που εμφανίζονται στο βρόχο της εικόνας 3. Η λογική που ακολουθείται κατά τη διάρκεια λειτουργίας της εφεδρείας είναι η εξής: δίνεται προτεραιότητα στην κάλυψη των αναγκών του φορτίου και η διαφορά της μέγιστης διαθέσιμης ενέργειας από τη γεννήτρια ($P_{backupMAX}$) από την ενέργεια που απαιτεί το φορτίο (P_{load}) οδηγείται στην μπαταρία. Φυσικά, καθόλη τη διάρκεια φόρτισης της μπαταρίας από την εφεδρεία όλη η ενέργεια που πιθανόν να παράγεται από τα φωτοβολταϊκά διοχετεύεται στην μπαταρία. Αυτό είναι αναπόφευκτο λόγω της συγκεκριμένης αρχιτεκτονικής του συστήματος. Επιπλέον, αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο θέτουμε ως όριο ολοκλήρωσης της φόρτισης της μπαταρίας το SOE = 80%. Συγκεκριμένα, για να αποφύγουμε ή τουλάχιστον να ελαττώνουμε σημαντικά την πιθανότητα να υπάρξει ωριαίο βήμα όπου κατά τη διάρκεια της φόρτισης της μπαταρίας το άθροισμα της ενέργειας που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά με την ενέργεια της εφεδρείας δεν ξεπερνάει το μέγιστο SOE της μπαταρίας με συνέπεια να χρειαστεί να απορρίψουμε ενέργεια. Σε αυτήν την περίπτωση η ενέργεια που συσσωρεύεται στην μπαταρία θα δίνεται από τη σχέση (14).

$$P_{backup \to load} = P_{load} \quad (10)$$

$$P_{backup \to battery} = (P_{backupMAX} - P_{load})n_{inv} \quad (11)$$

$$P_{backup} = P_{backup \to load} + P_{backup \to battery} \quad (12)$$

και

$$E_{sur} = P_{pv} \quad (13)$$

$$Ebat_t = Ebat_{t-1} + P_{backup \rightarrow battery} + E_{sur} \quad (14)$$

Το SOE υπολογίζεται πάλι με την εξίσωση (4).

Όταν επιτευχθεί ο έλεγχος όλης της χρονοσειράς, που σημαίνει ότι το τελευταίο ωριαίο βήμα της προσομοίωσης έχει εξεταστεί, ακολουθεί η αποθήκευση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Ο παραπάνω έλεγχος θα επαναληφθεί για την επόμενη τιμή του αριθμού των φωτοβολταϊκών πλαισίων (N) που θα οδηγήσει και σε διαφορετική παραγόμενη από τα φωτοβολταϊκά ενέργεια. Όταν ολοκληρωθεί ο έλεγχος για όλα τα N που έχουν επιλεγεί τότε δίνεται μια νέα τιμή για την ονομαστική ενέργεια της μπαταρίας (Bnec) και επαναλαμβάνεται ο παραπάνω έλεγχος για όλα τα N. Η προσομοίωση ολοκληρώνεται όταν γίνει ο έλεγχος για όλα τα N και Bnec.

Η επανάληψη αυτής της διαδικασίας για κάθε ζεύγος τιμών N και Bnec οδηγεί στο υπολογισμό της ετήσιας απορριπτόμενης ενέργειας (ΣE_{waste}) καθώς επίσης και της ετήσιας ενέργειας που παρέχεται από τη γεννήτρια (ΣP_{backup}). Επιπλέον, είναι εφικτός και ο υπολογισμός της ωφέλιμης από τα φωτοβολταϊκά ενέργειας στη διάρκεια ενός έτος για όλα τα ζεύγη τιμών N και Bnec. Η ωφέλιμη από τα φωτοβολταϊκά ενέργεια (Eus) ορίζεται από την εξίσωση 15.

$$E_{us} = \Sigma(P_{pv}) - \Sigma(E_{waste}) \quad (15)$$

2.5 Εκτίμηση Σταθμισμένου Κόστους Ενέργειας (LCOE)

Η απόδοση των διαφόρων τεχνολογιών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να αξιολογηθεί με τον υπολογισμό του Σταθμισμένου Κόστους Ενέργειας (LCOE) [41]. Η εκτίμηση αυτή λαμβάνει υπόψη όλες τις δαπάνες που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια ζωής του υπό μελέτη συστήματος παραγωγής ενέργειας σε σχέση με τη συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας του συστήματος καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του. Με τη μέθοδο αυτή, το κόστος κεφαλαίου, καθώς και το κόστος κύκλου ζωής που περιλαμβάνει τις δαπάνες λειτουργίας, συντήρησης και αντικατάστασης κατά τη διάρκεια ζωής του συστήματος, υπολογίζονται λαμβάνοντας υπόψη έναν εκτιμώμενο συντελεστή έκπτωσης (Discount Factor). Έτσι, το LCOE είναι ο λόγος του συνολικού προεξοφλημένου κόστους σε όλη τη διάρκεια ζωής ενός συστήματος διαιρούμενο με την συνολική παραγόμενη ενέργεια σε όλη τη διάρκεια ζωής του συστήματος και μπορεί να υπολογιστεί σε κάθε περίπτωση προσομοίωσης σύμφωνα με την εξίσωση 16.

$$LCOE = \frac{C_{pi} + C_{b,r} + \sum_{n=0}^{24} \frac{C_m + C_{eb} + C_{es}}{(1+i)^n}}{\sum_{n=0}^{24} \frac{E_{us}}{(1+i)^n}} = \frac{C_{pi} + C_{b,r} + (C_m + C_{eb} + C_{es}) \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i\,(1+i)^n} \right]}{E_{us} \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i\,(1+i)^n} \right]} \quad (16)$$

Οι μονάδες για το LCOE είναι €/kWh, ενώ το Cpi είναι το συνολικό κόστος αγοράς και εγκατάστασης του εξοπλισμού, $C_{b,r}$ είναι το προεξοφλημένο κόστος αντικατάστασης μπαταριών, C_m είναι το ετήσιο κόστος συντήρησης του συστήματος, C_{eb} είναι το ετήσιο κόστος ενέργειας από την εφεδρεία, C_{es} είναι το κόστος της ανανεώσιμης ενέργειας που απορρίπτεται και E_{us} είναι η ετήσια ωφέλιμη ενέργεια. Για την εκτίμηση του πραγματικού επιτοκίου, *i*, γίνεται χρήση της εξίσωσης Fisher [42]:

$$i = \frac{i' - f}{1 + f} \quad (17)$$

όπου i' το ονομαστικό επιτόκιο και
f ο ετήσιος πληθωρισμός.

2.5.1 Κόστος αντικατάστασης μπαταριών

Ο χρόνος αντικατάστασης των μπαταριών (TOR) μεταβάλλεται ανάλογα με την τεχνολογία του συσσωρευτή και εξαρτάται ισχυρά από τον αριθμό των κύκλων φόρτισης και εκφόρτισης που θα ολοκληρώσει η μπαταρία [43]. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η μπαταρία εκτελεί κυκλική λειτουργία θέτουμε ένα μέγιστο ημερολογιακό χρονικό όριο ζωής για την αντικατάσταση της μπαταρίας ίσο με 5 έτη (TOR_{max}).

Επιπλέον, στο πλαίσιο υπολογισμού του λειτουργικού κόστους του συστήματος και για να αξιολογηθεί εάν η μπαταρία πρέπει να αντικατασταθεί πριν από την προαναφερθείσα μέγιστη διάρκεια ζωής TOR_{max}, υπολογίζεται ο αριθμός των κύκλων φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας σε βάθος εκφόρτισης (DOD) 100%. Η εκτίμηση γίνεται σύμφωνα με την συνολική ηλεκτρική ενέργεια η οποία αποδίδεται από την μπαταρία (Pbatd) σε ένα χρόνο, χρησιμοποιώντας την εξίσωση 18.

$$NC = \frac{\sum Pbat_d}{E_{max}} \tag{18}$$

Όπου NC είναι ο αριθμός των κύκλων που ολοκληρώνει η μπαταρία στη διάρκεια ενός έτους θεωρώντας ότι το βάθος εκφόρτισης είναι 100%. Ο χρόνος αντικατάστασης της μπαταρίας, εκφρασμένος σε χρόνια, υπολογίζεται από την εξίσωση 19,

$$TOR = \frac{Total\ Number\ of\ Cycles\ up\ to\ the\ End\ of\ Life\ at\ 100\%\ DOD}{NC} \tag{19}$$

Τιμές σχετικά με τον αριθμητή της εξίσωσης 19 μπορούν να αναζητηθούν το φύλλο δεδομένων του κατασκευαστή της μπαταρίας. Στο πλαίσιο αυτής της εργασίας θεωρούμε ότι ο αριθμός κύκλων φόρτισης - εκφόρτισης (για DOD=100%) είναι 500.

Αν ο υπολογισμός του TOR σύμφωνα με την εξίσωση 19 δίνει τιμή μικρότερη από τη μέγιστη ημερολογιακή τιμή που ορίσαμε παραπάνω (TOR < TOR_{max} = 5ετη), τότε ως χρόνος αντικατάστασης της μπαταρίας θεωρείται ο TOR. Στις περιπτώσεις όπου ο υπολογιζόμενος TOR υπερβαίνει τη μέγιστη ημερολογιακή διάρκεια ζωής της μπαταρίας (TOR > TOR_{max}), τότε το TOR_{max} = 5 έτη θεωρείται ως ο χρόνος αντικατάστασης της μπαταρίας.

Δεδομένου ότι η εγγυημένη ισχύς των φωτοβολταϊκών μονάδων είναι 25 έτη, ολόκληρο το σύστημα PVBAT θεωρείται ότι έχει την ίδια συνολική διάρκεια ζωής. Ως εκ τούτου, οι μπαταρίες αναμένεται να αντικατασταθούν πολλές φορές κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου. Το συνολικό κόστος αντικατάστασης της μπαταρίας, υπολογίζεται με την ακόλουθη εξίσωση:

$$C_{br} = C_b \sum_{k=0}^{k=n*TOR<25} \frac{1}{(1+i)^k} \tag{20}$$

Όπου C_b είναι το αρχικό κόστος αγοράς της μπαταρίας και k η χρονιά αντικατάστασης της μπαταρίας. Το k λαμβάνει ακέραιες τιμές και υπολογίζεται από το γινόμενο n*TOR με το n να λαμβάνει τιμές από 1 έως 25 και το TOR είτε να υπολογίζεται από την εξίσωση 19 ή να χρησιμοποιείται το TOR_{max}.

2.5.2 Εκτιμήσεις ετησίων Cm, Ceb and Ces

Το ετήσιο κόστος λειτουργίας και συντήρησης Cm του συστήματος προκύπτει από το άθροισμα του αντίστοιχου κόστους κάθε υποσυστήματος.

Η ενέργεια που αποδίδεται από την εφεδρεία (E_{fuel}) σε ετήσια βάση υπολογίζεται από την εξίσωση 21, και αφορά την ενέργεια που απαιτείται να καλύψει τις ανάγκες του φορτίου και να φορτίσει τις μπαταρίες.

$$E_{fuel} = \frac{\sum P_{bat}/n_{bat} + \sum P_{load}}{n_{gen}} \tag{21}$$

Όπου n_{gen} είναι η απόδοση της γεννήτριας. Το ετήσιο κόστος της ενέργειας από την εφεδρεία C_{eb}, ορίζεται ως ο λόγος του γινόμενου του E_{fuel} και του κόστους του καυσίμου ($Fuel_{cost}$) εκφρασμένου σε €/lt, προς την τιμή της κατώτερης θερμογόνου δύναμης (LHV) του καυσίμου diesel, δηλαδή 9.85 kWh/lt και εκφράζεται από την εξίσωση 22,

$$C_{eb} = \frac{E_{fuel} * Fuel_{cost}}{LHV} \quad (22)$$

Το κόστος της περίσσειας ενέργειας που απορρίπτεται από το σύστημα C_{es}, προκύπτει από το γινόμενο της συνολικής ενέργειας που απορρίπτεται στη διάρκεια ενός έτους E_{waste} εκφρασμένη σε kWh και του μέσου σταθμισμένου κόστους ενός συστήματος φωτοβολταϊκού - μπαταρίας εκφρασμένου σε €/kWh και περιγράφεται από την εξίσωση 23,

$$C_{es} = \Sigma E_{waste} * LCOE_{pvbat} \quad (23)$$

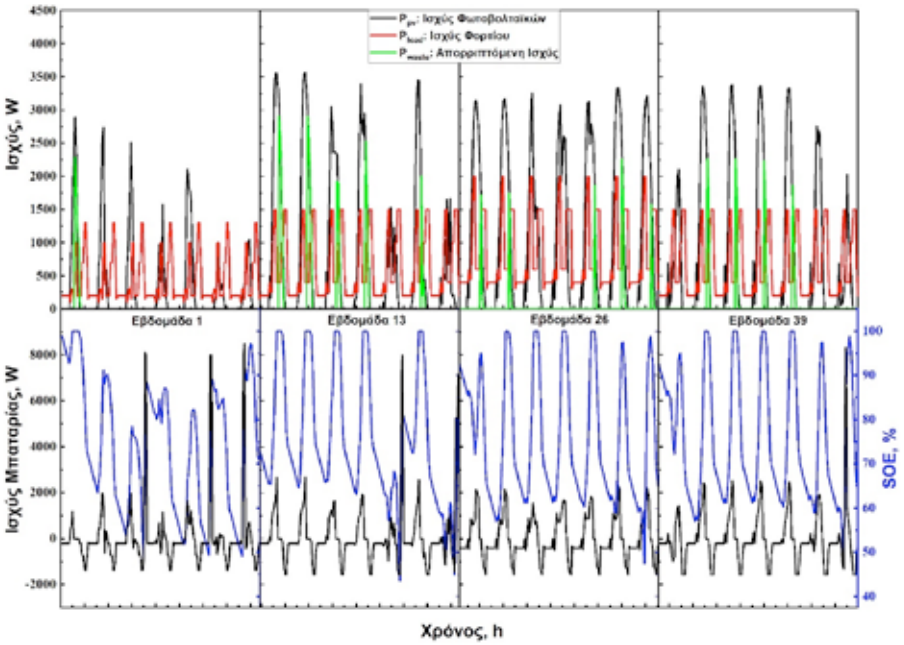
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 Μελέτη της λειτουργίας του συστήματος

Ο αλγόριθμος διαστασιολόγησης που περιγράφεται στο κεφάλαιο 2.4 ελέγχθηκε αρχικά με τη μελέτη της μεταβολής λειτουργικών παραμέτρων του συστήματος σαν συνάρτηση του χρόνο για τέσσερις αντιπροσωπευτικές εβδομάδες του έτους, μία από κάθε εποχή (Εικόνα 5). Όπως προβλέπεται από τον αλγόριθμο λειτουργίας, όταν η ισχύς εξόδου από τα φωτοβολταϊκά (μαύρη καμπύλη) είναι υψηλότερη από την απαίτηση του φορτίου και η ενεργειακή στάθμη της μπαταρίας (SOE – μπλε καμπύλη) είναι ίση με 100% υπάρχει περίσσεια ενέργειας η οποία δεν μπορεί να απορροφηθεί και απορρίπτεται (πράσινη καμπύλη).

Η περιοχή στην οποία κυμαίνεται η ενεργειακή στάθμη της μπαταρίας έχει ρυθμιστεί μεταξύ 50 και 100%. Το κάτω όριο του 50% επιλέχθηκε λόγω της χρήσης μπαταρίας μολύβδου – οξέος. Στη συγκεκριμένη τεχνολογία θα πρέπει να αποφεύγονται κύκλοι λειτουργίας με υψηλούς βαθμούς εκφόρτισης για την αποφυγή της πρόωρης γήρανσης της μπαταρίας [44]. Όπως γίνεται φανερό στην Εικόνα 5, το όριο του 50% προσεγγίζεται πολύ συχνά την πρώτη εβδομάδα του χρόνου (χειμώνας) ενώ την 26η εβδομάδα (καλοκαίρι) η SOE δεν λαμβάνει τιμές χαμηλότερες από 60%. Όσο αφορά το ανώτερο όριο, παρατηρούμε ότι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά είναι χαμηλότερη τους μήνες του χειμώνα με αποτέλεσμα το χειμώνα η μέγιστη τιμή της ενεργειακής κατάστασης της μπαταρίας (100%) να επιτυγχάνεται μόνο με την υποστήριξη της εφεδρείας. Αντιθέτως, την εβδομάδα 26 που αντιστοιχεί σε καλοκαιρινό μήνα η ενέργεια που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά είναι αρκετή για να φορτίσει την μπαταρία πλήρως. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια των εβδομάδων 13 (άνοιξη) και 39 (φθινόπωρο) το SOE προσεγγίζει το μέγιστο τόσο με την ισχύ των φωτοβολταϊκών όσο και της εφεδρείας.

Πρέπει να σημειωθεί ότι εμφανίζονται κάποιες ωριαίες καταγραφές όπου το SOE είναι μικρότερο από το κάτω όριο που έχει τεθεί (ημέρα 5 της εβδομάδας 13 και ημέρα 7 της εβδομάδας 39). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι με βάση τα κριτήρια που ικανοποιούνται ο αλγόριθμος προβλέπει την εκφόρτιση της μπαταρίας για την κάλυψη των αναγκών του φορτίου αλλά το ποσό ενέργειας που τελικά θα απομακρυνθεί από την μπαταρία είναι τέτοιο που θα ελαττώσει το SOE σε επίπεδα χαμηλότερα του 50%. Αν και η συμπεριφορά αυτή δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στη συνέχεια, θα μπορούσε να βελτιωθεί με την ελάττωση του χρονικού διαστήματος εκτέλεσης των σταδίων του αλγορίθμου (π.χ. από 1ώρα σε 15 λεπτά).



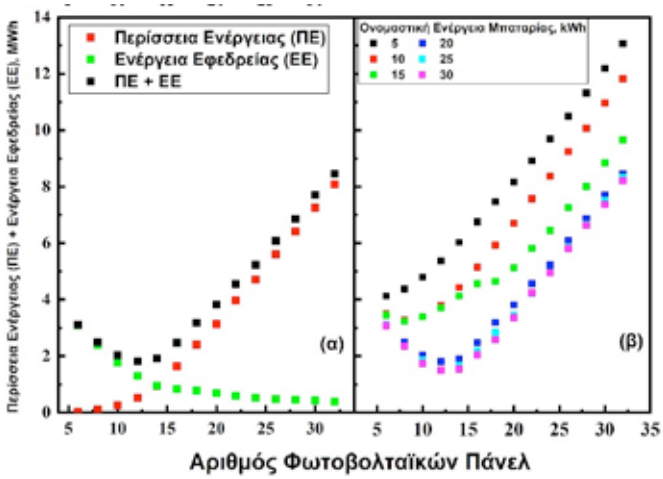
Εικόνα 5: Η απόδοση του συστήματος χρησιμοποιώντας μπαταρία μολύβδου-οξέος

3.2 Μεγιστοποίηση της συνεισφοράς της ηλιακής ενέργειας

Ο αλγόριθμος που περιγράφεται στην ενότητα 2.4 εκτελείτε για κάθε ώρα και για τις 8760 ώρες του έτους. Η ολοκλήρωση ενός ελέγχου αφορά την εκτέλεση του αλγορίθμου για τις 8760 ώρες για έναν δεδομένο αριθμό φωτοβολταϊκών πάνελ (N) και ονομαστικής ενέργειας της μπαταρίας (Bnec). Όταν ολοκληρωθεί ένας πλήρης έλεγχος αθροίζονται τα ωριαία ποσά περίσσειας (απορριπτόμενης) ενέργειας και ενέργειας από την εφεδρεία έτσι ώστε να αποκτήσουμε μια ετήσια εικόνα για αυτές τις περιπτώσεις. Στη συνέχεια μεταβάλλεται το N (αυξάνεται κατά 2) διατηρώντας το Bnec σταθερό και επαναλαμβάνεται η εκτέλεση του αλγορίθμου για έναν πλήρη έλεγχο (8760 ώρες). Όταν ολοκληρωθεί ο έλεγχος όλων των N (από 6 έως και 34) τότε αλλάζει τιμή το Bnec (κατά 5kWh) και επαναλαμβάνεται η εκτέλεση του αλγορίθμου όπως περιγράφεται προηγουμένως για κάθε N (6-34). Η περιοχή στην οποία έπαιρνε τιμές ο αριθμός των φωτοβολταϊκών N (6-34) καθορίστηκε έτσι ώστε ο λόγος της συνολικής ετήσιας ενέργειας που απαιτείται για το φορτίο προς την συνολική ετήσια ενέργεια που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά να βρίσκεται στην περιοχή 0.4 - 2. Επιπλεόν και λαμβάνοντας υπόψη ότη η ημερήσια ενεργειακή απαίτηση του φορτίου σε όλη τη διάρκεια του έτους κυμαίνονταν στην περιοχή 10 – 20 kWh, καθορίστηκε η συγκεκριμένη περιοχή επιλογής τιμών για την ονομαστική ενέργεια της μπαταρίας (5-30kWh).

Στην Εικόνα 6α παρουσιάζεται η μεταβολή της περίσσειας (απορριπτόμενης) ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά (κόκκινα σημεία) και της ενέργειας από την εφεδρεία (πράσινα σημεία) σαν συνάρτηση του αριθμού των φωτοβολταϊκών πάνελ με σταθερή την ονομαστική ενέργεια της μπαταρίας στα 20kWh. Γίνεται φανερό ότι όταν το N είναι μικρό, δηλαδή όταν το επίπεδο ενέργειας που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά είναι χαμηλό τότε είναι αμελητέα η ενέργεια που περισσεύει (ΠΕ) και απορρίπτεται από το σύστημα. Αντιθέτως, η ενέργεια που απαιτείται από την εφεδρεία (ΕΕ), όταν το N είναι μικρό, είναι υψηλή λόγω συχνότερης χρήσης της. Αυτό που παρατηρούμε είναι ότι καθώς αυξάνεται το N το ΠΕ αυξάνεται ενώ το ΕΕ ελαττώνεται, κάτι που άλλωστε ήταν αναμενόμενο. Αυτό που έχει ενδιαφέρον είναι ότι το άθροισμα αυτών των δύο ποσοτήτων ενέργειας (ΠΕ + ΕΕ)

παρουσιάζει ένα ελάχιστο (Εικόνα 6α, μαύρα σημεία). Το σημείο αυτό είναι, από ενεργειακής άποψης, το βέλτιστο σημείο λειτουργίας του συστήματος για το δεδομένο ζεύγος τιμών N και Bnec.

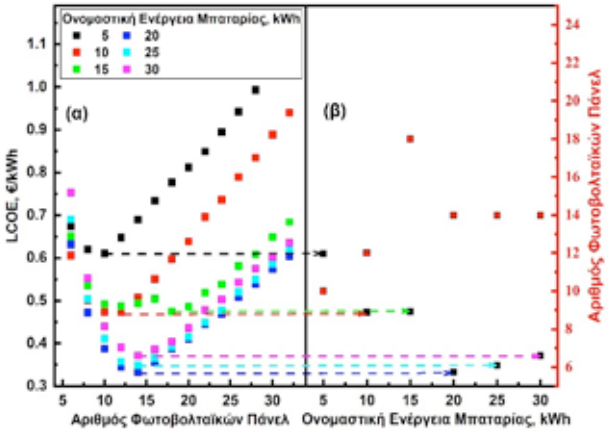


Εικόνα 6: Μεταβολή της περίσσειας (απορριπτόμενης) ενέργειας και ενέργειας από την εφεδρεία σαν συνάρτηση του αριθμού των φωτοβολταϊκών πάνελ για σταθερή ονομαστική ενέργεια της μπαταρίας

Στην Εικόνα 6β παρουσιάζεται η μεταβολή του αθροίσματος ΠΕ + ΕΕ για όλα τα ζεύγη τιμών N και Bnec. Γίνεται φανερό ότι καθώς αυξάνεται το B_{nec} ελαττώνεται το σημείο στο οποίο εμφανίζει ελάχιστο η καμπύλη ΠΕ + ΕΕ. Επιπλέον, ο ρυθμός ελάττωσης του σημείου στο οποίο εμφανίζει ελάχιστο η καμπύλη ΠΕ + ΕΕ μικραίνει από την ονομαστική ενέργεια της μπαταρίας 20 kWh και μετά. Με άλλες λέξεις, θα μπορούσαμε να υποστηρίξουμε ότι για N=14 και B_{nec} = 20kWh έχουμε το βέλτιστο σημείο λειτουργίας του συστήματος από ενεργειακής άποψης. Επιπλέον, θα πρέπει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση που το Bnec λαμβάνει την τιμή 15kWh η καμπύλη δεν παρουσιάζει την ίδια, ποιοτικά, συμπεριφορά με τις άλλες καμπύλες. Ο λόγος ύπαρξης αυτής της συμπεριφοράς δεν έχει ακόμα ερμηνευθεί.

3.3 Ελαχιστοποίηση του LCOE

Η εκτίμηση του LCOE, όπως ορίζεται από την εξίσωση 16, για όλα τα ζεύγη τιμών N και Bnec παρουσιάζεται γραφικά στην Εικόνα 6α. Παρατηρείται ότι οι καμπύλες LCOE περνούν από ένα ελάχιστο. Αυτό το ελάχιστο μειώνεται αυξάνοντας την ονομαστική ενέργεια της μπαταρίας μέχρι να φτάσει στην τιμή των 20kWh. Μετά από αυτή την τιμή, παρατηρείται αύξηση του ελάχιστου της καμπύλης LCOE. Η εικόνα 7β απεικονίζει τον τρόπο με τον οποίο η ελάχιστη τιμή κάθε καμπύλης που παρουσιάζεται στην εικόνα 7α μεταβάλλεται σαν συνάρτηση της ονομαστικής ενέργειας της μπαταρίας. Το ίδιο γράφημα περιλαμβάνει τον βέλτιστο αριθμό φωτοβολταϊκών πάνελ όπως προκύπτει από την εκτέλεση του αλγορίθμου.



Εικόνα 7: Μεταβολή (α) του LCOE σαν συνάρτηση του αριθμού των φωτοβολταϊκών πάνελ (6-34) αλλά και του ονομαστικού ενεργειακού περιεχόμενου της μπαταρίας (5-30kWh) και (β) της ελάχιστης τιμής του LCOE (εικόνα 6β) σαν συνάρτηση της ονομαστικής ενέργειας της μπαταρίας.

Ο υπολογισμός της LCOE, ή με άλλα λόγια το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας ανά μονάδα ενέργειας, απαιτεί πληροφορίες σχετικά με το κόστος κεφαλαίου, καθώς και τις δαπά νες λειτουργίας, συντήρησης και αντικατάστασης. Στη συνέχεια, τα συγκεκριμένα χρηματοοικονομικά στοιχεία θα χρησιμοποιηθούν για την προετοιμασία των ταμειακών ροών σε περίοδο 25 ετών. Ο πίνακας 2 παρουσιάζει το λεπτομερές κόστος για κάθε περίπτωση που εμφανίζεται στην Εικόνα 7. Ο φόρος προστιθέμενης αξίας δεν συμπεριλήφθηκε και τα στοιχεία κόστους αναφέρονται στο δεύτερο μισό του 2020.

Πίνακας 2 Τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του LCOE στο σημείο όπου εμφανίστηκε το ελάχιστο (Εικόνα 6)

Κόστος Υποσυστήματος (€)				Κόστος Εγκατάστασης (€)	Κόστος Συντήρησης		Κόστος Λειτουργίας		N (mods)	Bnec (kWh)	Eus (kWh/y)	LCOE (€/kWh)
PV	Μπαταρία	Ηλεκτρονικά ισχύος	Γεννήτρια		C_{br} (€)	C_m (€/y)	C_{es} (€/y)	C_{eb} (€/y)				
1100	770	2600	1300	3125	4445	100	369	503	10	5	3487.4	0.61
1320	1540	2700	1300	3350	4405	100	389	341	12	10	4409.8	0.48
1980	2310	3000	1300	4025	4289	100	834	215	18	15	5557.0	0.47
1540	3080	2800	1300	3575	5719	100	247	143	14	20	6021.8	0.34
1540	3850	2800	1300	3575	7149	100	215	126	14	25	6157.9	0.36
1540	4620	2800	1300	3575	8579	100	199	117	14	30	6226.7	0.38

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία, προτάθηκε μια μέθοδος σχεδιασμού αυτόνομων μη διασυνδεδεμένων ΦΒ συστημάτων με μπαταρία και εφεδρική ηλεκτρογεννήτρια πετρελαίου, που βασίζεται στην ελαχιστοποίηση του σταθμισμένου κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από αυτά τα συστήματα. Έμφαση δόθηκε στα μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά και μπαταρία μολύβδου οξέος σε σύζευξη με το ζυγό συνεχούς ρεύματος. Προσομοιώθηκε η ενεργειακή εφεδρεία υπό την μορφή ηλεκτρογεννήτριας σε αναμονή, λαμβάνοντας υπόψη συγκεκριμένες τεχνικές προδιαγραφές. Μελετήθηκε αλγόριθμος λειτουργίας και διαστασιολόγησης ο οποίος πρακτικά μεγιστοποίησε την ηλιακή συγκομιδή παράλληλα με την ελαχιστοποίηση του συνολικού οικονομικού κόστους, εξυπηρετώντας συγκεκριμένο ανελαστικό φορτίο στην πλευρά της κατανάλωσης.

Περαιτέρω εξέταση των διαφορετικών τεχνικών πτυχών που διερευνήθηκαν, οδήγησε στον προσδιορισμό του κόστους κεφαλαίου, του κόστους αντικατάστασης και του κόστους λειτουργίας και συντήρησης. Προσδιορίστηκε η ωφέλιμη φωτοβολταϊκή παραγωγή από προσομοιώσεις διαφορετικών συνδυασμών ΦΒ και μπαταρίας, και χρησιμοποιήθηκε στην εξίσωση LCOE οπότε και υπολογίστηκε το ελάχιστο κόστος ενέργειας για βέλτιστο συνδυασμό ΦΒ και μπαταρίας. Το χαμηλότερο κόστος ανά κιλοβατώρα για όλα τα σενάρια που εξετάστηκαν στην παρούσα μελέτη κυμάνθηκε μεταξύ 0,34 €/kWh και 0.61€/kWh, υποδηλώνοντας μια πτωτική τάση στις τιμές μοναδιαίου κόστους ενέργειας ανάλογων συστημάτων [45, 46].

Η μέθοδος ανέδειξε την βέλτιστη διαστασιολόγηση ενός μονοφασικού, dc-συζευγμένου υβριδικού συστήματος ενέργειας αποτελούμενο από ΦΒ, μπαταρία μολύβδου-οξέος και εφεδρικό H/Z. Χρησιμοποιήθηκε αντιστροφέας ίσης ονομαστικής ισχύος (5000VA) με την ηλεκτρογεννήτρια ντίζελ. Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι για ένα δεδομένο ετήσιο φορτίο περίπου 5570kWh, το βέλτιστο σύστημα ενέργειας αποτελείται από 14 ΦΒ μονάδες (310Wp / mod) συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 4340Wp και από μπαταρία ονομαστικής ενεργειακής χωρητικότητας 20kWh. Από το συγκεκριμένο σύστημα κερδήθηκαν 6021.8kWh ηλεκτρικής ενέργειας και έμειναν ανεκμετάλλευτες περίπου 922.2kWh ανανεώσιμης ενέργειας. Ωστόσο, η ηλιακή συγκομιδή μεγιστοποιήθηκε σε διαφορετική διαμόρφωση (N, Bnec) όπου χρησιμοποιήθηκαν 12 φωτοβολταϊκά πάνελ και μπαταρία ονομαστικής ενεργειακής χωρητικότητας 30 kWh. Το εκτιμώμενο LCOE για το βέλτιστο σύστημα μολύβδου-οξέος εκτιμήθηκε στα 0,34 €/kWh. Η περαιτέρω εξέταση των τεχνικών πτυχών των εφεδρικών H/Z και των τεχνολογιών μπαταρίας, οδήγησε στον προσδιορισμό του κόστους κεφαλαίου, του κόστους αντικατάστασης, του κόστους λειτουργίας και συντήρησης και του κόστους καυσίμου. Οι δοκιμές ανέδειξαν επίσης ένα αδύναμο σημείο της μεθόδου. Ο αλγόριθμος που εφαρμόζεται σε αυτήν τη εργασία αποτελεί μια αριθμητική μέθοδο βασισμένη σε κανόνες (Rule based Enumerative Technique) και επομένως απαιτεί υπολογιστική ισχύ. Αυτό σημαίνει ότι ο συνολικός αριθμός περιπτώσεων προσομοίωσης (συνδυασμοί N & Bnec) είναι μια ανταλλαγή μεταξύ ακρίβειας και ταχύτητας εκτέλεσης. Ωστόσο, ο χρόνος εκτέλεσης παραμένει σχετικά σύντομος για εφαρμογές μικρής κλίμακας. Σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας, αυτό μπορεί να ξεπεραστεί με τον διαισθητικό περιορισμό των τιμών N και Bnec.

Εφαρμόζοντας τη μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη, μια πρόταση για μελλοντική εργασία περιλαμβάνει τη χαρτογράφηση του σταθμισμένου κόστους ηλεκτρικής ενέργειας, με χρήση συστημάτων γεωγραφικών πληροφοριών, αντιμετωπίζοντας παράλληλα τις μετεωρολογικές αβεβαιότητες διαφόρων απομονωμένων περιοχών όπως είναι τα νησιά. Ειδικότερα σε περιοχές χωρίς κάποιο δίκτυο ηλεκτροδότησης θα είχε ενδιαφέρον και η σύγκριση διαφορετικών συστημάτων εφεδρικής ενέργειας και των αβεβαιοτήτων τους και η επίδρασή τους στην διακύμανση του κόστους ηλεκτροπαραγωγής. Επιπρόσθετη πρόταση για μελλοντική εργασία αποτελεί η ανάπτυξη μεθόδου δημιουργίας κατανομών προφίλ ηλεκτρικής κατανάλωσης ανά κατηγορία κατανάλωσης, η οποία θα οδηγούσε σε μια πιο γενικευμένη εφαρμογή της προτεινόμενης, σε αυτήν την εργασία, μεθοδολογίας.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Η μέθοδος διαστασιολόγησης που παρουσιάζεται στην παρούσα εργασία βασίζεται στην επιλογή του κατάλληλου αριθμού φωτοβολταϊκών πλαισίων (N_optimal) και της απαραίτητης ονομαστικής ενέργειας του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας (Bnec_optimal), έτσι ώστε να ικανοποιεί χωρίς διακοπές το προφίλ κατανάλωσης ενέργειας ενός μέσου νοικοκυριό για ένα τυπικό μετεωρολογικό έτος σε μια καθορισμένη τοποθεσία, ελαχιστοποιώντας ταυτόχρονα το LCOE που εκφράζεται με την εξίσωση 15. Τα αρχικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για το την προσομοίωση PV-Battery-Generator παρουσιάζονται στον Πίνακα Π1.

Πίνακας Π.1

	Input Parameters	**Sim Data A**	**Units**	**Input Type**
1	Number of PV modules, N	6 to 34		Υποθέσεις φυσικού μοντέλου
3	Nominal PV Module Power, P_{mpp}	310	Wp	
2	Nominal Energy Capacity, Bnec	5 to 30	kWh	
4	Nominal Battery Cycle life	500	Cycles (100% DOD)	
5	Calendar Battery Life	5	Years	

6	Depth of Discharge	50	%	
7	$SOE_{t=0}$	100	%	
8	Inverter efficiency, n_{inv}	95	%	
9	Battery charging efficiency, n_{bat}	85	%	
10	P_{backup_max}	4000	W	
11	Number of Inverters	1		
12	P_{load_max}	4000	W	
13	Battery Type	Lead-Acid		
14	Generator Efficiency, n_{gen}	80	%	
15	Battery Cost	154	€/kWh	Υποθέσεις οικονομικού κόστους
16	PV Module Cost	110	€	
17	Inverter Cost	1600	€	
18	Monitoring & BMS Cost	250	€	
19	PV Mounting System Cost	50	€/mod	
20	Electrical Installation Cost	1000	€	
21	Generator Cost	1300	€	
22	$LCOE_{pvbat}$	0.26	€/kWh	
23	LHV	9.85	kWh/lt	
24	Cost of Fuel	1.175	€/lt	
25	Real Interest Rate	0.06919	%	
26	Maintenance Cost, C_m	160	€/year	
27	Project Years	25	Years	

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] REN21. Renewables 2020 Global Status Report; REN21 Secretariat: Paris, France, 2020; ISBN 978-3-948393-00-7.

[2] Optimal planning of hybrid renewable energy systems using HOMER: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews 62 (2016) 609–620.

[3] A review on sizing methodologies of photovoltaic array and storage battery in a standalone photovoltaic system, Energy Conversion and Management 120 (2016) 430–448.

[4] Optimization in microgrids with hybrid energy systems – A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 45 (2015) 431–446.

[5] A sizing methodology based on Levelized Cost of Supplied and Lost Energy for off-grid rural electrification systems, Renewable Energy 89 (2016) 475 – 488.

[6] Levelised cost of energy – A theoretical justification and critical assessment, Energy Policy 124 (2019) 169–179.

[7] Levelized cost of electricity for solar photovoltaic and electrical energy, Applied Energy 190 (2017) 191–203.

[8] Rodolfo Dufo-López, José L. Bernal-Agustín, José M. Yusta-Loyo, José A. Domínguez-Navarro, Ignacio J. Ramírez-Rosado, Juan Lujano, Ismael Aso, Multi-objective optimization minimizing cost and life cycle emissions of stand-alone PV–wind–diesel systems with batteries storage, Applied Energy, Volume 88, Issue 11, 2011, Pages 4033-4041, ISSN 0306-2619, https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.04.019

[9] Akbar Maleki, Alireza Askarzadeh, Optimal sizing of a PV/wind/diesel system with battery storage for electrification to an off-grid remote region: A case study of Rafsanjan, Iran, Sustainable Energy Technologies and Assessments, Volume 7, 2014, Pages 147-153, ISSN 2213-1388, https://doi.org/10.1016/j.seta.2014.04.005

[10] Zhongbao Wei, Xiaolu Li, Lijun Xu, Yanting Cheng, Comparative study of computational intelligence approaches for NOx reduction of coal-fired boiler, Energy, Volume 55, 2013, Pages 683-692, ISSN 0360-5442, https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.04.007

[11] Abdul Ghafoor, Anjum Munir, Design and economics analysis of an off-grid PV system for household electrification, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 42, 2015, Pages 496-502, ISSN 1364-0321, https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.012

[12] Stefano Mandelli, Claudio Brivio, Emanuela Colombo, Marco Merlo, A sizing methodology based on Levelized Cost of Supplied and Lost Energy for off-grid rural electrification systems, Renewable Energy, Volume 89, 2016, Pages 475-488, ISSN 0960-1481, https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.12.032

[13] Stefano Mandelli, Claudio Brivio, Emanuela Colombo, Marco Merlo, Effect of load profile uncertainty on the optimum sizing of off-grid PV systems for rural electrification, Sustainable Energy Technologies and Assessments, Volume 18, 2016, Pages 34-47, ISSN 2213-1388, https://doi.org/10.1016/j.seta.2016.09.010

[14] Ce Shang, Dipti Srinivasan, Thomas Reindl, An improved particle swarm optimization algorithm applied to battery sizing for stand-alone hybrid power systems, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 74, 2016, Pages 104-117, ISSN 0142-0615, https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.07.009

[15] Carlos D. Rodríguez-Gallegos, Dazhi Yang, Oktoviano Gandhi, Monika Bieri, Thomas Reindl, S.K. Panda, A multi-objective and robust optimization approach for sizing and placement of PV and batteries in off-grid systems fully operated by diesel generators: An Indonesian case study, Energy, Volume 160, 2018, Pages 410-429, ISSN 0360-5442, https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.185

[16] https://www.energy.gov/eere/solar/crystalline-silicon-photovoltaics-research

[17] https://www.nrel.gov/docs/fy20osti/77010.pdf

[18] https://www.solarcall.it/home-en/download

[19] Saban Yilmaz, Furkan Dincer, Optimal design of hybrid PV-Diesel-Battery systems for isolated lands: A case study for Kilis, Turkey, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 77, 2017, Pages 344-352, ISSN 1364-0321, https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.037

[20] Jeffrey Marqusee, Donald Jenket, Reliability of emergency and standby diesel generators: Impact on energy resiliency solutions, Applied Energy, Volume 268, 2020, 114918, ISSN 0306-2619, https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114918

[21] Kelly Benton, Xufei Yang, Zhichao Wang, Life cycle energy assessment of a standby diesel generator set, Journal of Cleaner Production, Volume 149, 2017, Pages 265-274, ISSN 0959-6526, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.082

[22] Dongjiang Li, Dmitri L. Danilov, Jie Xie, Luc Raijmakers, Lu Gao, Yong Yang, Peter H.L. Notten, Degradation Mechanisms of C6/LiFePO4 Batteries: Experimental Analyses of Calendar Aging, Electrochimica Acta, Volume 190, 2016, Pages 1124-1133, ISSN 0013-4686, https://doi.org/10.1016/j.electacta.2015.12.161

[23] Maxwell, E.L. A Quasi-Physical Model for Converting Hourly Global to Direct Normal Insolation. Aug. 1987 (SERI/TR-215-3087). pp. 35–46. Available online: http://rredc.nrel.gov/solar/pubs/PDFs/TR-215-3087.pdf

[24] Loutzenhiser, P.G.; Manz, H.; Felsmann, C.; Strachan, P.A.; Frank, T.; Maxwell, G.M. Empirical validation of models to compute solar irradiance on inclined surfaces for building energy simulation. Sol. Energy 2007, 81 254–267.

[25] King, D.L.; Boyson, W.E.; Kratochvil, J.A. Photovoltaic Array Performance Model. Sandia Report 2004 (SAND2004-3535). Available online: http://www.osti.gov/servlets/purl/919131-sca5ep/ (accessed on 17 August 2018).

[26] De Soto, W.; Klein, S.A.; Beckman, W.A. Improvement and Validation of a Model for Photovoltaic Array Performance. Sol. Energy 2006, 80, 78–88.

[27] Hongmei, T.; Mancilla-David, F.; Ellis, K.; Muljadi, E.; Jenkins, P. A Cell-to-Module-to-Array Detailed Model for Photovoltaic Panels. Sol. Energy 2012, 86, 2695–2706. Energies 2019, 12, 1357 13 of 14

[28] Gray, J.L. The Physics of the Solar Cell; JohnWiley & Sons, Ltd.: Hoboken, NJ, USA, 2003; Chapter 3; pp. 62–112, ISBN 0-471-49196-9 2003. Available online: http://dx.doi.org/10.1002/9780470974704.ch3

[29] William F. Holmgren, Clifford W. Hansen, and Mark A. Mikofski. “pvlib python: a python package for modeling solar energy systems.” Journal of Open Source Software, 3(29), 884, (2018). https://doi.org/10.21105/joss.00884

[30] Stein, J.S.; Holmgren, W.F.; Forbess, J.; Hansen, C.W.H. PVLIB: Open Source Photovoltaic Performance Modeling Functions for Matlab and Python. In Proceedings of the IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference, Portland, OR, USA, 5–10 June 2017; pp. 3425–3430.

[31] Andrews, R.W.; Stein, J.S.; Hansen, C.W.H.; Riley, D. Introduction to the Open Source PV LIB for Python Photovoltaic System Modelling Package. In Proceedings of the IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference, Denver, CO, USA, 8–13 June 2014; pp. 170–174.

[32] Holmgren, W.F.; Groenendyk, D.G. An Open Source Solar Power Forecasting Tool Using PVLIB-Python. In Proceedings of the IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference, Portland, OR, USA, 5–10 June 2016; pp. 972–975.

[33] Stein, J.S. The Photovoltaic Performance Modeling Collaborative (PVPMC). In Proceedings of the 2012 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Austin, TX, USA, 3–8 June 2012; pp. 3048–3052.

[34] https://ec.europa.eu/jrc/en/PVGIS/tools/tmy

[35] http://www.cres.gr/pepesec/apotelesmata.html

[36] Ioannis Kostakis, Socio-demographic determinants of household electricity consumption: evidence from Greece using quantile regression analysis, Current Research in Environmental Sustainability, Volume 1, 2020, Pages 23-30, ISSN 2666-0490, https://doi.org/10.1016/j.crsust.2020.04.001

[37] https://www.statistics.gr/el/statistics/-/publication/SFA40/-

[38] Frits Møller Andersen, Mattia Baldini, Lars Gårn Hansen, Carsten Lynge Jensen, Households’ hourly electricity consumption and peak demand in Denmark, Applied Energy, Volume 208, 2017, Pages 607-619, ISSN 0306-2619, https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.09.094

[39] Wes McKinney, Data Structures for Statistical Computing in Python, Proceedings of the 9th Python in Science Conference, pages 56 - 61, 2010, Stefan van der Walt and Jarrod Millman, https://doi.org/10.25080/Majora-92bf1922-00a

[40] The pandas development team, pandas-dev/pandas: Pandas, feb, 2020, Zenodo, https://doi.org/10.5281/zenodo.3509134

[41] W. Short, D. Packey, T. Holt, "A Manual for the Economic Evaluation of Energy Efficiency and Renewable Energy Technologies", National Renewable Energy Laboratory - March 1995, https://www.nrel.gov/docs/legosti/old/5173.pdf

[42] Mario I. Blejer, Benjamin Eden, A note on the specification of the fisher equation under inflation uncertainty, Economics Letters, Volume 3, Issue 3, 1979, Pages 249-255, ISSN 0165-1765, https://doi.org/10.1016/0165-1765(79)90126-5

[43] Sarah Paul Ayeng'o, Toni Schirmer, Kai-Philipp Kairies, Hendrik Axelsen, Dirk Uwe Sauer, Comparison of off-grid power supply systems using lead-acid and lithium-ion batteries, Solar Energy, Volume 162, 2018, Pages 140-152, ISSN 0038-092X, https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.12.049

[44] Sauer, D. U., & Wenzl, H. (2008). Comparison of different approaches for lifetime prediction of electrochemical systems-Using lead-acid batteries as example. Journal of Power Sources, 176(2), 534–546. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.08.057

[45] Christoph Kost, Shivenes Shammugam, Verena Juelch, Huyen-Tran Nguyen, Thomas Schlegl, "Study: Levelized Cost of Electricity- Renewable Energy Technologies" Fraunhofer ISE, March 2018

[46] Ioannis E. Kosmadakis, Costas Elmasides, Georgios Koulinas, Konstantinos P. Tsagarakis, Energy Unit Cost Assessment of Six Photovoltaic-Battery Configurations, Renewable Energy, 2021, ISSN 0960-1481, https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.03.010

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ ΓΙΑ ΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΜΕ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΓΙΑ ΑΡΔΕΥΣΗ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ

Χρήστος Σπυρίδων Καραβάς[1]*, Ευάγγελος Δημητρίου[1], Δημήτριος Μανωλάκος[1] και Γεώργιος Παπαδάκης[1]

[1]* Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων & Γεωργικής Μηχανικής, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών
11855 Αθήνα, Ελλάδα, e-mail: ckarav@aua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παγκόσμια αύξηση του πληθυσμού οδηγεί σε αυξανόμενη ζήτηση τροφίμων, ζωοτροφών και θρεπτικών συστατικών. Το νερό είναι βασικό στοιχείο της ζωής στον πλανήτη και ταυτόχρονα για την ανάπτυξη θρεπτικών συστατικών. Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας, 844 εκατομμύρια άνθρωποι σήμερα στερούνται ακόμη και τις πιο βασικές υπηρεσίες γλυκού νερού και ο αριθμός αυτός αναμένεται να αυξηθεί λόγω της αύξησης του πληθυσμού και της αυξανόμενης ζήτησης τροφίμων. Ως εκ τούτου, είναι επιτακτική ανάγκη να βρεθούν νέες λύσεις για μια βιώσιμη παραγωγή γλυκού νερού με στόχο τη βελτίωση και την αύξηση της παραγωγής των καλλιεργειών με μηδενικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η αφαλάτωση, που τροφοδοτείται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ), αποτελεί μια επιτυχή και βιώσιμη λύση αυτού του προβλήματος, παράγοντας γλυκό νερό για την άρδευση των καλλιεργειών. Η παρούσα εργασία παρουσιάζει την ανάπτυξη ενός υπολογιστικού εργαλείου για τον βέλτιστο (οικονομικά και τεχνικά) σχεδιασμό συστημάτων αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης (ΑΟ) θαλασσινού νερού με στόχο τη βιώσιμη παραγωγή νερού για άρδευση καλλιεργειών. Επιπλέον, με σκοπό την περαιτέρω μείωση του κόστους του παραγόμενου νερού, σχεδιάστηκε ένα σύστημα διαχείρισης ενέργειας και ελέγχου που εξασφαλίζει τη βέλτιστη λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης, Το σύστημα επιτρέπει τη λειτουργία της μονάδας ΑΟ σε μεταβλητό φορτίο και προσδιορίζει το σημείο λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης ΑΟ χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο υπολογιστικής νοημοσύνης (Fuzzy cognitive maps). Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης θα συμβάλουν στην οικονομική ανάπτυξη σε εθνικό και διεθνές επίπεδο, καθώς στοχεύουν στην ελαχιστοποίηση του κόστους του προϊόντος νερού με βιώσιμο τρόπο.

Λέξεις Κλειδιά: Αφαλάτωση ΑΟ, φωτοβολταϊκά συστήματα, υπολογιστική ευφυΐα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο παγκόσμιος πληθυσμός σύμφωνα με τον Οργανισμό Ηνωμένων Εθνών ξεπέρασε τα 7.4 δισεκατομμύρια το 2016, ενώ προβλέπεται να αγγίξει τα 11.2 δισεκατομμύρια το 2100. Σήμερα, το 85% των διαθέσιμων πόρων γλυκού νερού παγκοσμίως χρησιμοποιείται στη γεωργία και αναμένεται το ποσοστό αυτό να συνεχίζει να κυριαρχεί στην κατανάλωση νερού εξαιτίας της αύξησης του πληθυσμού [1]. Η γεωργία στις ημι-άνυδρες και άνυδρες περιοχές εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το νερό για άρδευση [2]. Η έλλειψη γλυκού νερού στις περιοχές αυτές έχει οδηγήσει σε αυξημένη χρήση χαμηλής ποιότητας και υφάλμυρων υπογείων υδάτων [3]. Η αλατότητα του νερού άρδευσης είναι γνωστό ότι επηρεάζει αρνητικά τόσο την ανάπτυξη των καλλιεργειών όσο και τις αποδόσεις τους [4]. Για τον λόγο αυτό, απαιτείται κατάλληλη διαχείριση του νερού άρδευσης ώστε να διατηρηθεί στα κατάλληλα επίπεδα αλατότητας για άρδευση, καθώς υψηλή αλατότητα οδηγεί σε οσμωτικό στρες που μειώνει την πρόσληψη νερού και καταστέλλει την ανάπτυξη των φυτών [5]. Επομένως, αποτελεί επείγουσα ανάγκη η δημιουργία νέων στρατηγικών βασισμένες στην επιστήμη και την τεχνολογία για την βιώσιμη και αειφόρο παραγωγή και χρήση του γλυκού νερού. Μια μακροχρόνια βιώσιμη στρατηγική για την άρδευση αποτελεί η χρήση αφαλατωμένου νερού [6]. Η αντικατάσταση των νερών υψηλής περιεκτικότητας σε άλατα με καθαρό νερό θα βελτιώσει τις αποδόσεις της παραγωγής των καλλιεργειών και ταυτόχρονα θα μειώσει τις απαιτήσεις άρδευσης χωρίς τοπικές αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις [7].

Η κύρια μέθοδος αφαλάτωσης, που είναι γνωστή και χρησιμοποιείται ευρέως σήμερα είναι η αφαλάτωση με Αντίστροφη Όσμωση (ΑΟ) [8]. Η ΑΟ είναι μια διαδικασία κατά την οποία το νερό τροφοδοσίας εισέρχεται σε ημιπερατή μεμβράνη υπό πίεση μεγαλύτερη από την οσμωτική και η μεμβράνη διαχωρίζει το φρέσκο νερό από το διάλυμα συμπυκνώματος. Η αφαλάτωση με ΑΟ είναι μια ενεργοβόρος διεργασία λόγω της υψηλής πίεσης που απαιτείται για την παραγωγή φρέσκου νερού [9]. Η συνεχής αύξηση των τιμών των ορυκτών καυσίμων και ο αντίκτυπός τους στο περιβάλλον σε σύγκριση με τα πλεονεκτήματα των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), καθιστά τη χρήση μονάδων αφαλάτωσης με ΑΠΕ ως τη φθηνότερη, πιο αξιόπιστη και πιο φιλική προς το περιβάλλον λύση για την παραγωγή καθαρού φρέσκου νερού. Επομένως τα συστήματα αφαλάτωσης ΑΟ σε συνδυασμό με ΑΠΕ μπορούν να οδηγήσουν στην οικονομική και κοινωνική ανάπτυξη περιοχών που παρουσιάζουν έλλειψη φρέσκου νερού τόσο για πόση όσο και για άρδευση [10].

Η παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ μεταβάλλεται λόγω των καιρικών συνθηκών. Έρευνες έδειξαν ότι η μονάδα αφαλάτωσης ΑΟ απευθείας συνδεδεμένη με συστήματα ΑΠΕ (όπως φωτοβολταϊκά ή ανεμογεννήτρια) παρουσιάζει χαμηλή ειδική κατανάλωση ενέργειας (kWh ανά μονάδα όγκου παραγόμενου φρέσκου νερού) υπό μεταβλητές συνθήκες λειτουργίας (μη σταθερή πίεση και ροή τροφοδοσίας του αλμυρού νερού) [11,12]. Ως εκ τούτου, η επίτευξη του βέλτιστου σχεδιασμού ενός συστήματος αφαλάτωσης ΑΟ που τροφοδοτείται από ΑΠΕ αποτελεί ένα σημαντικό στόχο, όπου θα επιλέγεται το βέλτιστο μέγεθος όλων των επιμέρους συστημάτων και εξαρτημάτων, με στόχο το ελάχιστο κόστος και διατηρώντας ταυτόχρονα την αξιοπιστία του συστήματος.

Η παρούσα εργασία στοχεύει στην ολοκληρωμένη διαχείριση νερού για άρδευση με χρήση μονάδων αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης, που τροφοδοτούνται από φωτοβολταϊκά, με παράλληλο στόχο την ελαχιστοποίηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των προτεινόμενων διεργασιών. Σήμερα, η διαδικασία σχεδιασμού των συστημάτων αφαλάτωσης που τροφοδοτούνται με φωτοβολταϊκά πραγματοποιείται σε δύο ξεχωριστά βήματα χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικά μοντέλα σχεδιασμού. Το πρώτο βήμα περιλαμβάνει το σχεδιασμό του συστήματος αφαλάτωσης με βάση το απαιτούμενο προφίλ ζήτησης νερού και μια παραδοχή σχετικά με τον συντελεστή χωρητικότητας της μονάδας (μέση τιμή ωρών λειτουργίας ανά ημέρα). Το δεύτερο βήμα περιλαμβάνει το σχεδιασμό του φωτοβολταϊκού συστήματος με βάση τις ενεργειακές ανάγκες της μονάδας αφαλάτωσης που σχεδιάστηκε στο πρώτο βήμα. Επομένως, στο πρώτο βήμα δημιουργείται ένα προφίλ ισχύος, το οποίο χρησιμοποιείται ως είσοδος στο δεύτερο βήμα για το σχεδιασμό του συστήματος ΑΠΕ. Αυτός ο τρόπος σχεδιασμού οδηγεί σε μη βελτιστοποιημένα συστήματα.

Στη παρούσα εργασία παρουσιάζεται ένα νέο υπολογιστικό εργαλείο με σκοπό το βέλτιστο (οικονομικά και τεχνικά) σχεδιασμό συστημάτων αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης σε συνδυασμό με φωτοβολταϊκά συστήματα, παρουσιάζοντας σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των συμβατικών εμπορικά διαθέσιμων λογισμικών προγραμμάτων, καθώς ο βέλτιστος σχεδιασμός προέρχεται από την ταυτόχρονη βελτιστοποίηση τόσο του μεγέθους του συστήματος αφαλάτωσης όσο και του συστήματος των φωτοβολταϊκών. Επιπλέον, το υπολογιστικό εργαλείο ενσωματώνει αλγόριθμους βασισμένους σε τεχνικές υπολογιστικής νοημοσύνης με σκοπό τον έλεγχο της μονάδας αφαλάτωσης, προσδίδοντας τη

δυνατότητα λειτουργίας της μονάδας υπό μεταβλητές συνθήκες λειτουργίας. Η λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης υπό μερικό φορτίο παρουσιάζει χαμηλότερη ειδική κατανάλωση ενέργειας σε σύγκριση με την λειτουργία της σε ονομαστικό φορτίο. Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης θα συμβάλουν στην οικονομική ανάπτυξη σε εθνικό και διεθνές επίπεδο, καθώς στοχεύουν στην ελαχιστοποίηση του κόστους του προϊόντος νερού με βιώσιμο τρόπο.

2. ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ

2.1. Εισαγωγή

Το προτεινόμενο εργαλείο αποτελεί ένα καινοτόμο υπολογιστικό εργαλείο για το βέλτιστο σχεδιασμό συστημάτων αφαλάτωσης με φωτοβολταϊκά συστήματα. Το υπολογιστικό εργαλείο στοχεύει στην ταυτόχρονη βελτιστοποίηση τόσο του συστήματος αφαλάτωσης όσο και του συστήματος ανανεώσιμης ενέργειας, μαζί με το συντονισμό του συστήματος ελέγχου.

Με σκοπό την εύρεση του πιο οικονομικά αποδοτικού συστήματος, εκείνο που ικανοποιεί τη ζήτηση ύδατος για άρδευση με το χαμηλότερο δυνατό κόστος, το υπολογιστικό εργαλείο πραγματοποιεί τεχνική και οικονομική βελτιστοποίηση των παρακάτω μεταβλητών:

- Τύπος μεμβρανών ΑΟ
- Αριθμός μεμβρανών συνδεδεμένες σε σειρά και παράλληλα.
- Αριθμός μεμβρανοθηκών συνδεδεμένες σε σειρά και παράλληλα.
- Τεχνικά χαρακτηριστικά συσκευής ανάκτησης ενέργειας στη μονάδα ΑΟ.
- Επιλογή στρατηγικής ελέγχου (πλήρες φορτίο ή μεταβλητό φορτίο).
- Τύπος και αριθμός φωτοβολταϊκών πλαισίων.
- Τύπος, αριθμός συσσωρευτών και σχεδιασμός της συστοιχίας των συσσωρευτών (αριθμός συσσωρευτών σε σειρά και παράλληλα).
- Μέγεθος της δεξαμενής νερού.

Ο βελτιστοποιημένος σχεδιασμός θα οδηγήσει σε συστήματα που παρέχουν χαμηλότερο κόστος νερού και εξαιρετικά βελτιωμένη απόδοση λειτουργίας.

2.2. Δημιουργία βάσης δεδομένων μονάδων αφαλάτωσης

Αρχικά δημιουργήθηκε μια βάση δεδομένων που περιλαμβάνει συστήματα αφαλάτωσης θαλασσινού νερού για παραγωγή νερού δυναμικότητας από 50 m^3/ημέρα έως 300 m^3/ημέρα. Σημαντικό στοιχείο για την εύρεση του βέλτιστου συστήματος αφαλάτωσης ανάλογα με τη επιθυμητή δυναμικότητα παραγωγής νερού, αποτελεί η σύσταση του διαλύματος τροφοδοσίας (αλμυρό νερό). Οπότε, το βέλτιστο σύστημα αφαλάτωσης προσδιορίζεται ανάλογα με τη ποιότητα του νερού τροφοδοσίας (συνολική ποσότητα των στερεών σωματιδίων σε mg/L νερού – Total Dissolved Solids, TDS). Ένα σύστημα αφαλάτωσης για συγκεκριμένη παραγωγή νερού σχεδιάζεται επιλέγοντας το είδος και τον αριθμό των μεμβρανών, τη διάταξή τους, τον αριθμό των μεμβρανοθηκών και τον αριθμό των σταδίων. Το βέλτιστο σύστημα αφαλάτωσης θα αποτελεί το σύστημα που παρουσιάζει τις λιγότερες ενεργειακές απαιτήσεις ανά μονάδα παραγόμενης ποσότητας αφαλατωμένου νερού (kWh/m^3). Με σκοπό τη δημιουργία της βάσης δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πακέτο SQL Server Management Studio [13].

2.3. Ανάπτυξη αλγορίθμων πρόγνωσης καιρού

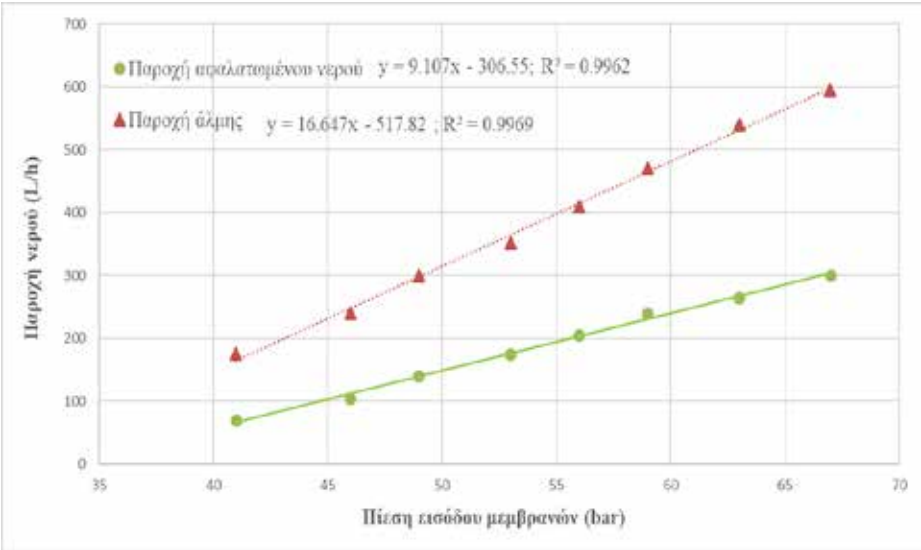
Ο καιρός είναι ο σημαντικότερος παράγοντας της γεωργικής παραγωγής, καθώς επηρεάζει σημαντικά την ανάπτυξη των καλλιεργειών, τις ανάγκες τους σε νερό, τις απαιτήσεις τους σε λιπάσματα, καθώς και τις αποδόσεις τους. Οι καιρικές μεταβολές μπορούν να προκαλέσουν φυσική ζημιά στις καλλιέργειες και τη διάβρωση του εδάφους και να επηρεάσουν την ποιότητα των καλλιεργούμενων προϊόντων. Επιπλέον, αποτελούν τον κυριότερο παράγοντα για τη πρόγνωση της παραγωγής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Ως εκ τούτου, η πρόγνωση του καιρού είναι ένα από τα πιο σημαντικά ζητήματα. Οπότε, αναπτύχθηκε αλγόριθμος πρόγνωσης καιρού που βασίστηκε σε τεχνικές μηχανικής μάθησης (machine learning), συγκεκριμένα με τη χρήση χρονοσειρών και το μοντέλο ARIMA [14]. Οι μεταβλητές που είναι κύριες για πρόβλεψη είναι η ηλιακή ακτινοβολία, η σχετική

υγρασία, η ταχύτητα του ανέμου, η εκδήλωση και χρονική διάρκεια βροχοπτώσεων και η θερμοκρασία περιβάλλοντος.

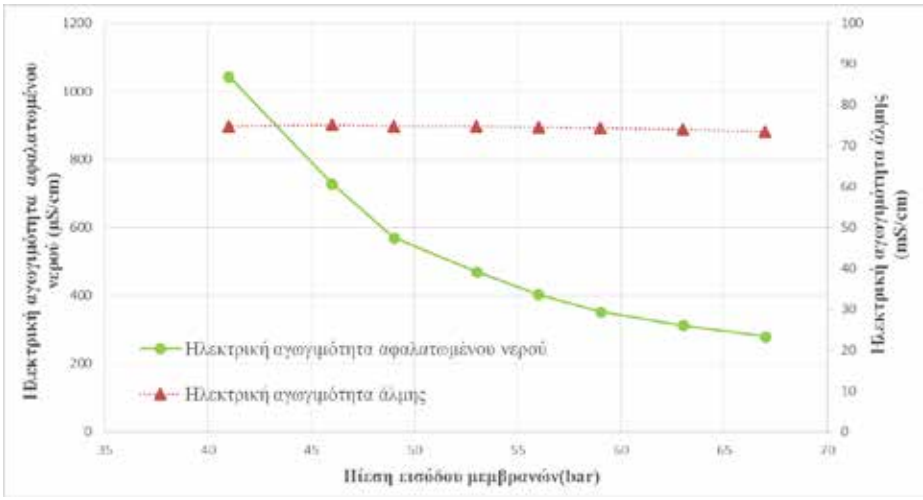
Η ανάπτυξη του αλγορίθμου βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης καιρού (3 ημερών) πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας την γλώσσα προγραμματισμού Python [15].

2.4. Ανάπτυξη αλγορίθμων ενεργειακής διαχείρισης και ελέγχου μονάδων αφαλάτωσης

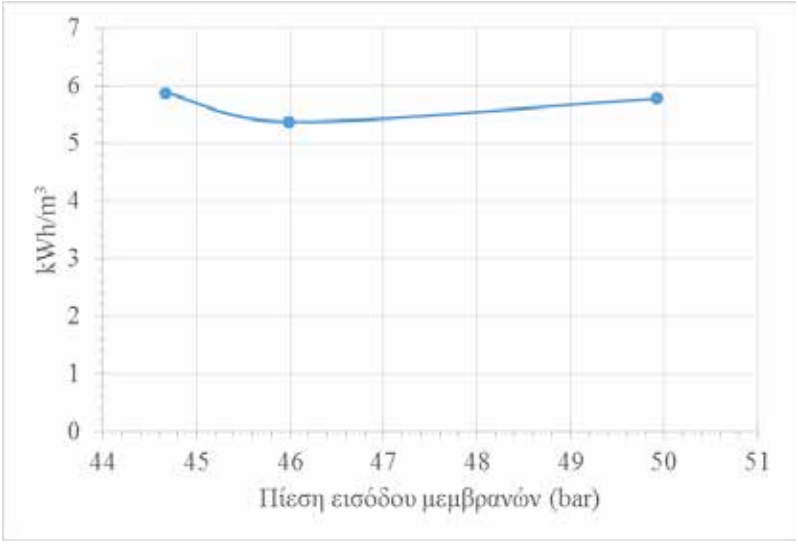
Σήμερα η συμβατική λειτουργία μιας μονάδας αφαλάτωσης ΑΟ πραγματοποιείται στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας της, με αποτέλεσμα η παροχή και πίεση του αλμυρού νερού τροφοδοσίας στις μεμβράνες να είναι σταθερή. Ωστόσο, έχουν επιτευχθεί εξαιρετικά αποτελέσματα κατά τη λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης ΑΟ υπό μεταβλητές συνθήκες (μεταβλητή πίεση και παροχή νερού τροφοδοσίας). Η μεταβλητή λειτουργία μιας μονάδας αφαλάτωσης έχει σαν αποτέλεσμα η παροχή του παραγόμενου φρέσκου νερού να μεταβάλλεται ανάλογα με την ισχύ εισόδου στη μονάδα (Εικόνα 1), ενώ η ηλεκτρική αγωγιμότητα (αλατότητα) του παραγόμενου νερού να μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα (Εικόνα 2) [11]. Αναλυτικότερα, η λειτουργία της μονάδα αφαλάτωσης υπό μερικό φορτίο παρουσιάζει χαμηλότερη ειδική κατανάλωση ενέργειας σε σύγκριση με την λειτουργία της σε ονομαστικό φορτίο (Εικόνα 3) [12].



Εικόνα 1: Παροχή αφαλατωμένου νερού και άλμης σε συνάρτηση με την πίεση εισόδου των μεμβρανών



Εικόνα 2: Ποιότητα φρέσκου νερού σε συνάρτηση με την πίεση εισόδου των μεμβρανών



Εικόνα 3: Η ειδική κατανάλωση ενέργειας ως συνάρτηση της πίεσης εισόδου στις μεμβράνες

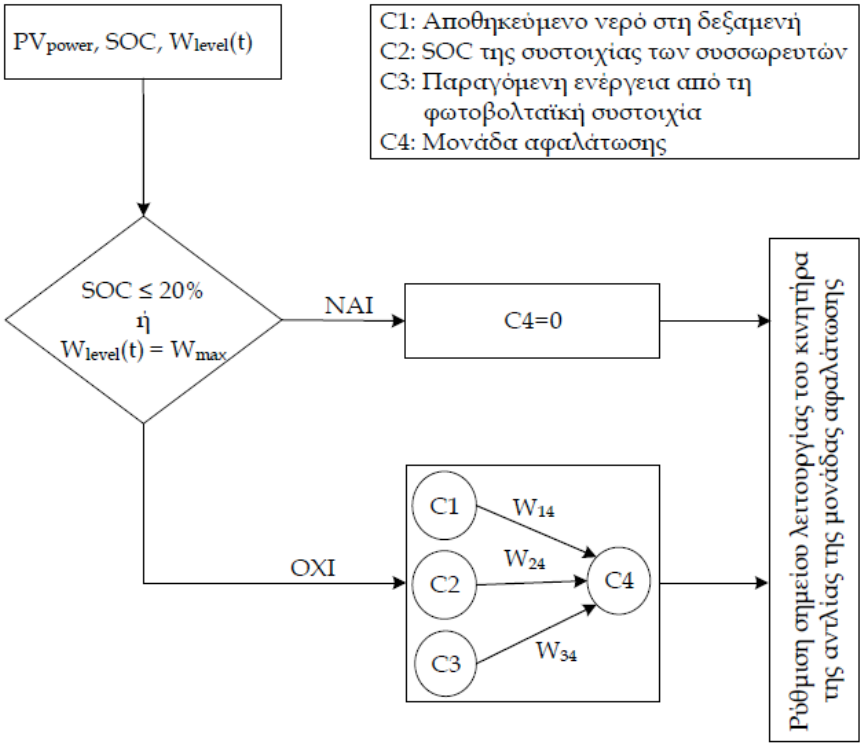
Με σκοπό την εύρεση του βέλτιστου σημείου λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης, αναπτύχθηκε σύστημα ενεργειακής διαχείρισης και ελέγχου της μονάδας αφαλάτωσης βασισμένο σε τεχνικές υπολογιστικής νοημοσύνης, συγκεκριμένα σε ασαφείς γνωστικούς χάρτες (Fuzzy Cognitive Maps), το οποίο ενσωματώθηκε στο υπολογιστικό εργαλείο, παρέχοντας με αυτόν τον τρόπο περισσότερη ευελιξία στον σχεδιαστή να επιλέγει μεταξύ δύο συστημάτων:

(α) του συστήματος όπου η μονάδα αφαλάτωσης λειτουργεί στο ονομαστικό της φορτίο και

(β) του συστήματος όπου η μονάδα αφαλάτωσης λειτουργεί σε μεταβλητό φορτίο [16-18].

Το λογικό διάγραμμα του συστήματος παρουσιάζεται στην Εικόνα 4. Οι είσοδοι του συστήματος διαχείρισης ενέργειας είναι η στάθμη της δεξαμενής νερού ($W_{level}(t)$), η κατάσταση φόρτισης των

συσσωρευτών (SOC) και η παραγόμενη ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια (PV_{power}). Παρατηρείται ότι εάν η στάθμη της δεξαμενής νερού είναι ίση με τη μέγιστη τιμή (W_{max}) ή η κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών είναι μικρότερη ή ίση με 20% (ελάχιστη επιτρεπόμενη για τη λειτουργία των συσσωρευτών) τότε το σημείο λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης (C4) τίθεται στο μηδέν. Σε κάθε άλλη περίπτωση, το σύστημα διαχείρισης ενέργειας χρησιμοποιεί ένα ασαφή γνωστικό χάρτη (FCM) για να αποφασίσει σχετικά με το σημείο λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης. Οι έννοιες αυτού του FCM είναι το αποθηκευμένο πόσιμο νερό στη δεξαμενή νερού (C1), η κατάσταση φόρτισης (SOC) των συσσωρευτών (C2), η παραγωγή ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια (C3) και το σημείο λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης (C4). Όλες οι έννοιες είναι ασαφείς στο χώρο [0, 1]. Με τη χρήση της μεθόδου αποασαφοποίησης (defuzzification centroid), η έννοια που δίνει το σημείο λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης (C4), παίρνει μια αριθμητική τιμή. Αυτή η τιμή αποτελεί ένα ποσοστό της ονομαστικής ισχύος της μονάδας αφαλάτωσης. Τα βάρη Wij εκφράζουν τη σχέση μεταξύ των εννοιών και των τιμών τους στο διάστημα [0,1].



Εικόνα 4: Λογικό διάγραμμα ελέγχου του συστήματος διαχείρισης ενέργειας

Ο σχεδιασμός και ο προγραμματισμός του συστήματος ελέγχου και διαχείρισης της ενέργειας υλοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού πακέτου MATLAB.

3. ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ

Με σκοπό τη δημιουργία του υπολογιστικού εργαλείου χρησιμοποιήθηκαν τρία υπάρχοντα λογισμικά. Ένα σχέδιο του καινοτόμου υπολογιστικού εργαλείου παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.

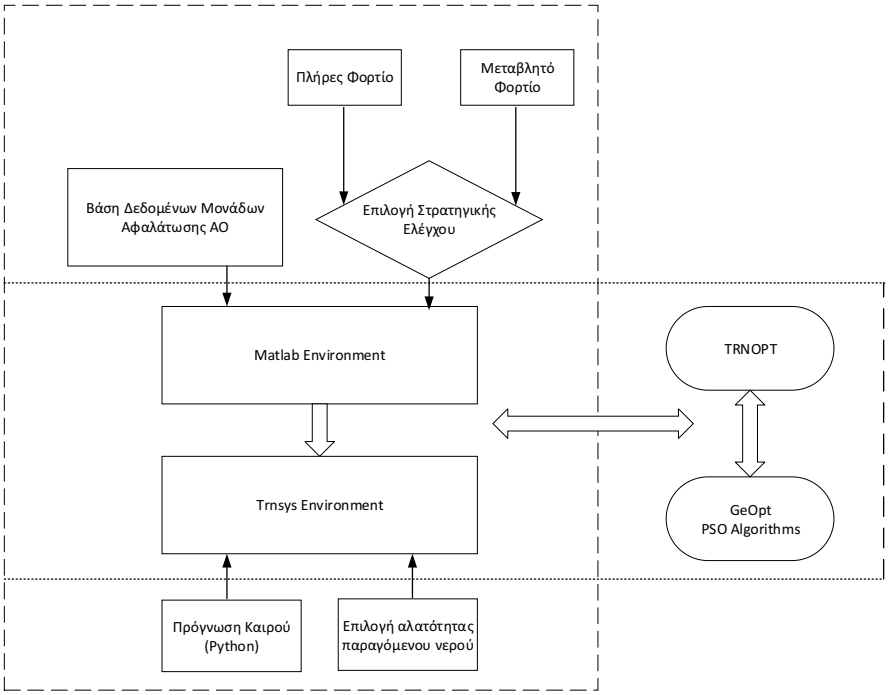
Το κύριο λογισμικό που χρησιμοποιείται είναι το TRNSYS. Το TRNSYS πρόκειται για ένα εξαιρετικά ευέλικτο περιβάλλον λογισμικού που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της συμπεριφοράς

παροδικών συστημάτων και αποτελεί ένα δυναμικό λογισμικό προσομοίωσης για ενεργειακά συστήματα. Εκτός από τη βιβλιοθήκη του, η οποία περιλαμβάνει διάφορες υπορουτίνες για φωτοβολταϊκά, συσσωρευτές κ.λπ., ο χρήστης μπορεί να συμπεριλάβει τις δικές του υπορουτίνες (π.χ. σύστημα αφαλάτωσης, ελεγκτές κτλ.) σε Fortran. Με βάση την αρθρωτή δομή του μπορεί να λύσει μεγάλες ομάδες εξισώσεων που περιγράφονται από τις διάφορες υπορουτίνες.

Το GenOpt πρόκειται για λογισμικό ανοιχτού κώδικα για βελτιστοποίηση, όπου επιτρέπει την πολυδιάστατη βελτιστοποίηση μιας αντικειμενικής συνάρτησης που υπολογίζεται από ένα πρόγραμμα προσομοίωσης. Είναι ανεξάρτητη πλατφόρμα γραμμένη σε java που μπορεί να ελαχιστοποιήσει μια συνάρτηση κόστους που αξιολογείται από ένα εξωτερικό πρόγραμμα προσομοίωσης και συνδέεται με επιτυχία με το TRNSYS. Η ανάπτυξή του πραγματοποιήθηκε για προβλήματα βελτιστοποίησης όπου η συνάρτηση κόστους είναι υπολογιστικά ακριβή και τα παράγωγά της δεν είναι διαθέσιμα ή ενδέχεται να μην υπάρχουν ακόμη. Μπορεί να βελτιστοποιήσει συνεχείς μεταβλητές, διακριτές μεταβλητές και συνδυασμούς τόσο διακριτών όσο και συνεχών. Στη παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η θεωρία σμηνών (Particle Swarm Optimization, PSO) για την εύρεση του βέλτιστου οικονομικά συστήματος και μέσω της βελτιστοποίησης επιλέγεται η διαστασιολόγηση της κάθε μονάδας του συστήματος.

Για τη σύνδεση του GenOpt με το TRNSYS, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό TRNOPT. Το TRNOPT μεταδίδει τα δεδομένα από το TRNSYS στο GenOpt και αντίστροφα χωρίς καμία αλληλεπίδραση από τον χρήστη.

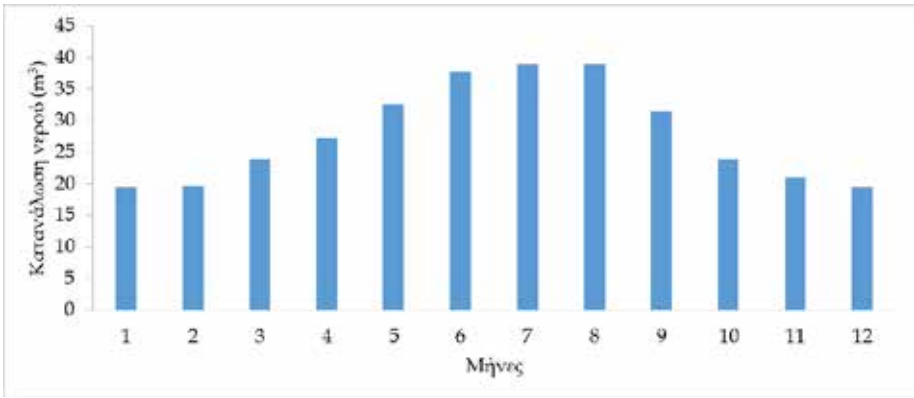
Τέλος, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Matlab για την σύνδεση της βάσης δεδομένων με το υπολογιστικό εργαλείο και για την ανάπτυξη του συστήματος διαχείρισης της ενέργειας και ελέγχου της μονάδας αφαλάτωσης. Η MATLAB είναι μία υψηλού επιπέδου γλώσσα και ένα διαδραστικό περιβάλλον για αριθμητικούς υπολογισμούς και προγραμματισμό.



Εικόνα 5:Σχέδιο του υπολογιστικού εργαλείου

4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ

Δεδομένου ότι τα νησιά του Αιγαίου χαρακτηρίζονται από υψηλό ηλιακό και αιολικό δυναμικό, ο συνδυασμός ΑΠΕ με μονάδες αφαλάτωσης ΑΟ θαλασσινού νερού θα μπορούσε να είναι ο καταλληλότερος τρόπος αντιμετώπισης της έλλειψης νερού σε αυτά τα νησιά. Οπότε, με σκοπό την εφαρμογή του υπολογιστικού εργαλείου, πραγματοποιήθηκε μια μελέτη περίπτωσης που περιλαμβάνει ένα μικρό πεδίο εφαρμογής για άρδευση σε ένα νησί των Κυκλάδων. Το προφίλ της απαιτούμενης κατανάλωσης νερού (απαίτηση νερού για άρδευση) προς κάλυψη σε μηνιαία βάση παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.



Εικόνα 6: Ημερήσια κατανάλωση νερού για άρδευση ανά μήνα

Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του υπολογιστικού εργαλείου παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, διαπιστώνεται ότι το σύστημα αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης που λειτουργεί σε μεταβλητό φορτίο και περιέχει μια μικρής χωρητικότητας συστοιχία συσσωρευτών και ένα σύστημα διαχείρισης ενέργειας που βασίζεται σε ασαφείς γνωστικούς χάρτες μπορεί να καλύψει τις ανάγκες σε νερό με το χαμηλότερο κόστος (μικρότερη σε μέγεθος μονάδα αφαλάτωσης και μικρότερη απαιτούμενη εγκατεστημένη ισχύ από τα ΦΒ).

Πίνακας 1: Αποτελέσματα εφαρμογής υπολογιστικού εργαλείου

	Συμβατικός τρόπος σχεδιασμού	Χρήση του υπολογιστικού εργαλείου – Πλήρες φορτίο της μονάδας ΑΟ	Χρήση του υπολογιστικού εργαλείου – Μεταβλητό φορτίο της μονάδας ΑΟ
Μονάδα αφαλάτωσης	2.09 m^3/h	1.50 m^3/h	1.25 m^3/h
Αριθμός τυπικών φωτοβολταϊκών πλαισίων ισχύος 180 Wp το καθένα	20	15	8
Χωρητικότητα συστοιχίας συσσωρευτών (Wh). Συνολική τάση συστοιχίας 16 V DC, 2 V ο κάθε συσσωρευτής	150	100	60
Δεξαμενή νερού	5 m^3	5 m^3	10 m^3

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η διαδικασία σχεδιασμού που ακολουθείται μέχρι και σήμερα, ενός συστήματος αφαλάτωσης ΑΟ τροφοδοτούμενο από ΑΠΕ είναι περίπλοκη και χρονοβόρα και πολλές φορές οδηγεί σε μη βελτιστοποιημένα συστήματα υψηλού κόστους. Τα προγράμματα σχεδιασμού συστημάτων αφαλάτωσης ΑΟ, τα οποία είναι εμπορικά διαθέσιμα από διάφορους κατασκευαστές μεμβρανών, χρησιμοποιούνται μόνο για τη διαστασιολόγηση των μονάδων αφαλάτωσης, ενώ για τον σχεδιασμό του συστήματος ΑΠΕ χρησιμοποιείται διαφορετικό εργαλείο υπολογισμού χρησιμοποιώντας ως δεδομένα εισαγωγής τα αποτελέσματα από το εργαλείο σχεδιασμού της μονάδας ΑΟ.

Η εργασία αυτή παρουσιάζει την ανάπτυξη ενός νέου λογισμικού πακέτου διαφοροποιημένο από τις υφιστάμενες εμπορικές υπηρεσίες, με σκοπό το βέλτιστο σχεδιασμό ολοκληρωμένων συστημάτων αφαλάτωσης ΑΟ σε συνδυασμό με φωτοβολταϊκά συστήματα, προσφέροντας λύσεις και νέες μεθόδους σχεδίασης στους αγρότες οι οποίες θα καλύπτουν τις απαιτήσεις τους για νερό με σκοπό την άρδευση καλλιεργειών (παραγωγή νερού κατάλληλης αλατότητας για άρδευση καλλιεργειών).

Το νέο υπολογιστικό εργαλείο παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των συμβατικών, εμπορικά διαθέσιμων λογισμικών προγραμμάτων, καθώς ο βέλτιστος σχεδιασμός προέρχεται από την ταυτόχρονη βελτιστοποίηση τόσο του μεγέθους του συστήματος αφαλάτωσης όσο και του συστήματος των φωτοβολταϊκών. Προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η απόδοση του σχεδιασμένου συστήματος και να εξασφαλιστεί η βέλτιστη λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης, το καινοτόμο υπολογιστικό εργαλείο περιλαμβάνει ένα προηγμένο σύστημα διαχείρισης ενέργειας και ελέγχου της μονάδας αφαλάτωσης, βασισμένο σε ασαφείς γνωστικούς χάρτες (Fuzzy Cognitive Maps), και ένα αλγόριθμο πρόγνωσης καιρού βασισμένος σε τεχνικές μηχανικής μάθησης.

Το καινοτόμο εργαλείο πρόκειται να φέρει επιπλέον θετικές επιπτώσεις στην οικονομία και την κοινωνία όπως (α) Προσφορά βέλτιστης διασύνδεσης του τομέα των υδάτων μέσω των συστημάτων αφαλάτωσης με τον ενεργειακό τομέα, (β) Αύξηση της συμμετοχής των αγροτών στη διαχείριση των υδάτων και στην εξοικονόμηση της ενέργειας, και (γ) Ικανοποίηση στους αγρότες λόγω του χαμηλότερου κόστους του νερού για άρδευση.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία αυτή συγχρηματοδοτείται από την Ελλάδα και την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού, Εκπαίδευση και Δια βίου Μάθηση 2014-2020» και το Πρόγραμμα με κωδικό ΕΔΒΜ103, με τίτλο «Υποστήριξη ερευνητών με έμφαση στην νέοι ερευνητές - κύκλος 'Β», στο πλαίσιο του έργου «Ανάπτυξη και Επαλήθευση Υπολογιστικού Εργαλείου Σχεδιασμού Μονάδων Αφαλάτωσης Αντίστροφης Όσμωσης με Φωτοβολταϊκά για Άρδευση», με κωδικό ΟΠΣ (MIS) 5048478.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] P. Drechsel, G. Danso, M. Qadir, Wastewater use in agriculture: challenges in assessing costs and benefits, Wastewater, Springer, 2015, pp. 139–152.

[2] K. Schacht, Y. Chen, J. Tarchitzky, B. Marschner, The use of treated wastewater for irrigation as a component of integrated water resources management: reducing environmental implications on soil and groundwater by evaluating site-specific soil sensitivities, Integrated Water Resources Management: Concept, Research and Implementation, Springer, 2016, pp. 459–470.

[3] Y. Wada, L. Beek, M.F. Bierkens, Non sustainable groundwater sustaining irrigation: a global assessment, Water Resources Research, 48 (2012).

[4] R.S. Ayers, D.W. Westcot, Water quality for agriculture, FAO Irrig. Drain. Paper 29, FAO, Rome, 1985.

[5] S. Grattan, Irrigation Water Salinity and Crop Production, UCANR Publications, 2002.

[6] U. Yermiyahu, A. Tal, A. Ben-Gal, A. Bar-Tal, J. Tarchitzky, O. Lahav, Environmental science - rethinking desalinated water quality and agriculture, Science 318 (2007) 920–921.

[7] V. Martínez-Alvarez, B. Martin-Gorriz, M. Soto-García, Seawater desalination for crop irrigation—a review of current experiences and revealed key issues, Desalination 381 (2016) 58–70.

[8] K.P. Lee, T.C. Arnot, D. Mattia, A review of reverse osmosis membrane materials for desalination—development to date and future potential, Journal of Membrane Science, 370 (2011) 1-22.

[9] L.F. Greenlee, D.F. Lawler, B.D. Freeman, B. Marrot, P. Moulin, Reverse osmosis desalination: water sources, technology, and today's challenges, Water research, 43 (2009) 2317-2348.

[10] E.S. Mohamed, G. Papadakis, Advances of Renewable Energy Powered Desalination, Handbook of Clean Energy Systems, (2015).

[11] E. Dimitriou, E.S. Mohamed, G. Kyriakarakos, G. Papadakis. Experimental investigation of the performance of a reverse osmosis desalination unit under full- and part-load operation. Desalination and Water Treatment, 12 (2015) 1-9.

[12] E. Dimitriou, E.S. Mohamed, C. Karavas, G. Papadakis, Experimental comparison of the performance of two reverse osmosis desalination units equipped with different energy recovery devices, Desalination and Water Treatment, 55 (2015) 3019-3026.

[13] Dewson, R. (2008). Sql server management studio. Beginning SQL Server 2008 for Developers: From Novice to Professional, 25-50.

[14] Rahman, Mahmudur, AHM Saiful Islam, Shah Yaser Maqnoon Nadvi, and Rashedur M. Rahman. "Comparative study of ANFIS and ARIMA model for weather forecasting in Dhaka." In 2013 International Conference on Informatics, Electronics and Vision (ICIEV), pp. 1-6. IEEE, 2013.

[15] Jaihuni, M., Basak, J. K., Khan, F., Okyere, F. G., Arulmozhi, E., Bhujel, A., ... & Kim, H. T. (2020). A Partially Amended Hybrid Bi-GRU—ARIMA Model (PAHM) for Predicting Solar Irradiance in Short and Very-Short Terms. Energies, 13(2), 435.

[16] C.-S. Karavas, K.G. Arvanitis, G. Kyriakarakos, D.D. Piromalis, G. Papadakis, A novel autonomous PV powered desalination system based on a DC microgrid concept incorporating short-term energy storage, Solar Energy, 159 (2018) 947-961.

[17] C.-S. Karavas, G. Kyriakarakos, K.G. Arvanitis, G. Papadakis, A multi-agent decentralized energy management system based on distributed intelligence for the design and control of autonomous polygeneration microgrids, Energy Conversion and Management, 103 (2015) 166-179.

[18] C.-S. Karavas, K. Arvanitis, G. Papadakis, A Game Theory Approach to Multi-Agent Decentralized Energy Management of Autonomous Polygeneration Microgrids, Energies, 10 (2017) 1756.

ΑΥΞΗΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΗΣ ΓΕΝΗΤΡΙΑΣ ΜΕΣΩ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΡΟΗΣ ΦΙΛΜ ΝΕΡΟΥ

Ιωάννα Χρυσαφούδη[1]*, Γεώργιος Μπάνης[1], Πολυχρόνης Παττακός[1], Σπυρίδων Κουτρούμπας[1], Δημήτριος Κοσσυβάκης[1], Παναγιώτης Τσαραμπάρης[1], Νικόλαος Στεφανάκης[1], Ευάγγελος Χριστοφόρου[1]

[1] Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 15780, Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου
e-mail: chrysafoudi@hotmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών γεννητριών αποτελεί μια μέθοδο μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια. Κατά τη μετατροπή αυτή, μέρος της ενέργειας δαπανάται για την αύξηση της θερμοκρασίας του Φ/Β και τη μείωση της ενεργειακής του απόδοσης. Αυτή η ανεπιθύμητη συνέπεια μπορεί να αποφευχθεί με την χρήση ενός συστήματος ψύξης. Η μοντελοποίηση και η προσομοίωση παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη και στο σχεδιασμό φωτοβολταϊκών συστημάτων. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η θεωρητική διερεύνηση της απαγωγής θερμότητας από φωτοβολταϊκή γεννήτρια μέσω επιφανειακής ροής φιλμ νερού. Το σύστημα που μελετήθηκε αποτελείται από τμήμα φωτοβολταϊκού και διάταξη ψεκασμού νερού. Το νερό ψύχει ενεργητικά την εμπρόσθια επιφάνεια της γεννήτριας με σκοπό την αύξηση της απόδοσης της. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν σε τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες περιβάλλοντος (22, 32, 42°C) και με τρείς διαφορετικές εντάσεις ηλιακής ακτινοβολίας (Heat Flux) (600, 800, 1000W/m^2) και παρατηρείται η θερμοκρασιακή διακύμανση του φωτοβολταϊκού με και χωρίς το σύστημα ψύξης. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων δείχνουν πως το ρευστό απάγει θερμότητα και μειώνει αισθητά τη θερμοκρασία της φωτοβολταϊκής γεννήτριας και η μέγιστη πτώση της θερμοκρασίας παρατηρείται σε συνθήκες με αμφότερα υψηλότερη θερμοκρασία και ένταση ηλιακής ακτινοβολίας.

Λέξεις Κλειδιά: Φωτοβολταϊκά, Ψύξη φωτοβολταϊκών, Ενεργητική ψύξη, Επιφανειακή ροή φιλμ νερού, Υπολογιστική ρευστομηχανική

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στις σύγχρονες κοινωνίες, καταναλώνονται υπέρογκες ποσότητες ενέργειας για την κάλυψη καθημερινών ανθρώπινων αναγκών όπως οι μετακινήσεις, η φωταγώγηση και η θέρμανση. Η συνεχής βελτίωση του βιοτικού επιπέδου οδηγεί αναπόφευκτα στην αύξηση της ενεργειακής ζήτησης. Γίνεται σαφές πως η παγκόσμια οικονομική ανάπτυξη είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την παραγωγή και τα μέσα παραγωγής ενέργειας. Επιπλέον, η καύση συμβατικών ορυκτών καυσίμων και προϊόντων τους αποτελεί την πιο κοινή διαδικασία παραγωγής ενέργειας κάθε μορφής [1].

Η συνεχής ανθρώπινη εκμετάλλευση των φυσικών πόρων του πλανήτη για την παραγωγή ενέργειας έχει ως αποτέλεσμα την εξάντληση τους. Ακόμη, οι φυσικοί πόροι αναπληρώνονται πολύ αργά καθώς χρειάζονται εκατομμύρια έτη για την ολοκλήρωση των γεωλογικών διεργασιών από όπου προκύπτουν. Τούτο καθιστά αναγκαία την εύρεση νέων μορφών ενέργειας, περισσότερο ήπιων και φιλικών προς το περιβάλλον. Η φύση διαθέτει ένα ευρύ φάσμα Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), οι οποίες βασίζονται εξ ολοκλήρου στις φυσικές διεργασίες και θεωρούνται πρακτικά ανεξάντλητες. Στις συγκεκριμένες μορφές ενέργειας περιλαμβάνονται: ο ήλιος, ο άνεμος, το νερό, η βιομάζα και η γεωθερμία.

Η ηλιακή ενέργεια μπορεί να αξιοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κυρίως από δύο τύπους τεχνολογίας, οι οποίοι είναι οι ηλιακοί συλλέκτες και οι φωτοβολταϊκές γεννήτριες [2]. Στους ηλιακούς συλλέκτες, η ηλιακή ακτινοβολία θερμαίνει ρευστά για τη παραγωγή ατμού με σκοπό τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω τουρμπίνας ατμού. Στα φωτοβολταϊκά, η ηλιακή ακτινοβολία μετατρέπεται άμεσα σε ηλεκτρική ενέργεια. Ο πιο συνήθης ημιαγωγός στα φωτοβολταϊκά είναι το πυρίτιο. Σήμερα, ο τυπικός βαθμός απόδοσης των φωτοβολταϊκών πυριτίου (μονοκρυσταλλικού ή πολυκρυσταλλικού τύπου) κυμαίνεται στο 15–19%, ο οποίος συγκρινόμενος με την απόδοση άλλων ενεργειακών συστημάτων (συμβατικών, αιολικών, υδροηλεκτρικών κλπ) είναι σχετικά χαμηλός.

Οι ημιαγωγοί παρουσιάζουν ευαισθησία στις μεταβολές της θερμοκρασίας με αποτέλεσμα η αύξηση της θερμοκρασίας να επιδρά στην απόδοση των φωτοβολταϊκών γεννητριών με τη σχέση των δυο αυτών μεγεθών να είναι αντιστρόφως ανάλογη. Είναι χαρακτηριστικό ότι για την περίπτωση φωτοβολταϊκών γεννητριών πυριτίου η μείωση της απόδοσης είναι της τάξης του 0,35–0,8% για κάθε αύξηση της θερμοκρασίας κατά 1°C [3]. Οι ιδανικές συνθήκες λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού είναι σε θερμοκρασία 25^{o}C και ένταση ηλιακής ακτινοβολίας 1000W/m^2 [4]. Με τη χρήση συστημάτων ψύξης των φωτοβολταϊκών σε συνθήκες υψηλής ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας περιβάλλοντος, μπορεί να επιτευχθεί η μείωση της θερμοκρασίας τους και κατά συνέπεια η αύξηση της απόδοση τους. Για την απαγωγή της θερμότητας από τα φωτοβολταϊκά κατάλληλα συστήματα ψύξης νερού μπορούν να χρησιμοποιηθούν.

Οι K.S. Matthew και συνεργάτες, μελέτησαν ένα σύστημα ψύξης με τη χρήση νερού από μια δεξαμενή με παγάκια προκειμένου να παραμείνει η θερμοκρασία του νερού όσο πιο χαμηλά γίνεται. Με τη ροή του νερού μεταφέρεται η θερμότητα του φωτοβολταϊκού στο ρευστό και μειωνόταν η θερμοκρασία του. Η ηλεκτρική συμπεριφορά του φωτοβολταϊκού βελτιώθηκε κατά 4,6% [5]. Οι O.Saad και M.Musad πραγματοποιήσαν μια σειρά πειραμάτων, χρησιμοποιώντας νερό για την αύξηση της απόδοσης. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων, δείχνουν πως για τις ώρες με την υψηλότερη ηλιοφάνεια η απόδοση μπορεί να αυξηθεί έως και 15% [6]. Οι L.W. Zhe και συνεργάτες, πραγματοποίησαν προσομοίωση ψύξης φωτοβολταϊκού πάνελ μέσω υπολογιστικής ρευστομηχανικής μελετώντας την επίδραση της θερμοκρασίας του νερού στην απόδοση [7]. Οι D.J.Kim και συνεργάτες εφάρμοσαν ένα κλειστό σύστημα ψύξης για να ξεπεράσουν τα προβλήματα υπερθέρμανσης του φωτοβολταϊκού αυξάνοντας την έξοδο (output) του φωτοβολταϊκού κατά 11,6% [8]. Οι B.Sutanto και Y.S. Indartono πραγματοποίησαν με τη χρήση της υπολογιστικής ρευστομηχανικής σύστημα προσομοίωσης ψύξης πλωτών φωτοβολταϊκών με ανακυκλοφορία του νερού μέσω θερμοσίφωνα [9]. Το σύστημα αυτό βασίζεται σε παθητική ψύξη με σκοπό τη μείωση της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού. Οι H.G.Teo και συνεργάτες πραγματοποίησαν προσομοίωση και πειράματα για να μελετήσουν την απόδοση ψύξης παράλληλης σειράς αγωγών αέρα που συνδέονται στο πίσω μέρος της φωτοβολταϊκής μονάδας. Ως αποτέλεσμα, η ηλιακή μονάδα πέτυχε υψηλότερη απόδοση 12% –14% με ψύξη σε σύγκριση με την απόδοση 8% –9% χωρίς ψύξη [10].

Στη παρούσα εργασία, πραγματοποιήθηκε προσομοίωση τμήματος φωτοβολταικού πάνελ χωρίς και με τη χρήση συστήματος ψύξης. Το ρευστό το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την απαγωγή θερμότητας είναι το νερό, το οποίο ρέει στην εμπρόσθια επιφάνεια του φωτοβολταϊκού. Σκοπός της εργασία είναι η σύγκριση της πτώσης θερμοκρασίας σε διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες χωρίς και με το σύστημα ψύξης. Το τρισδιάστατο μοντέλο του φωτοβολταϊκού και του συστήματος ψύξης

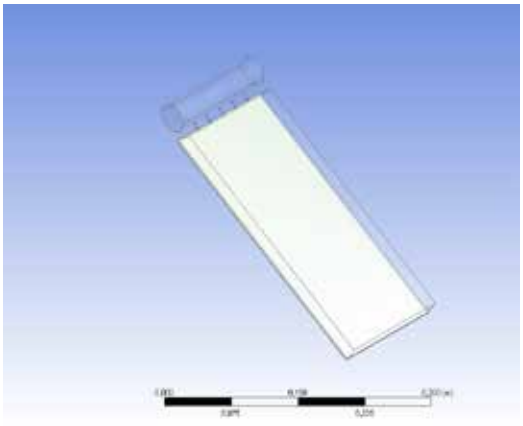
αναπτύχθηκε με τη χρήση ANSYS CFX και η σύγκριση έγινε με τα δεδομένα που λήφθηκαν μέσω του Steady-State Thermal.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1. CFD modelling

2.1.1. Γεωμετρία

Η σχεδίαση πραγματοποιήθηκε στο ANSYS Design Modeler και η γεωμετρία που χρησιμοποιήθηκε στη μοντελοποίηση φαίνεται στην Εικόνα 1. Η γεωμετρία αποτελείται από τμήμα του φωτοβολταϊκού σε κλίση 32°, το εσωτερικό των σωλήνων νερού και τον όγκο ελέγχου που ρέει το νερό όπου εξέρχεται από τα μπεκ και τον αέρα. Το μήκος του τμήματος του φωτοβολταικού είναι 30cm, το πλάτος 13 cm και το ύψος του όγκου ελέγχου 2cm. Ο όγκος ελέγχου αποτελεί τη γεωμετρία που συνυπάρχει ο ατμοσφαιρικός αέρας και το νερό. Δημιουργήθηκε ένας κεντρικός σωλήνας παροχής νερού και 5 σωλήνες μικρότερης διαμέτρου (μπεκ), οι οποίοι τροφοδοτούν τη διάταξη με νερό.

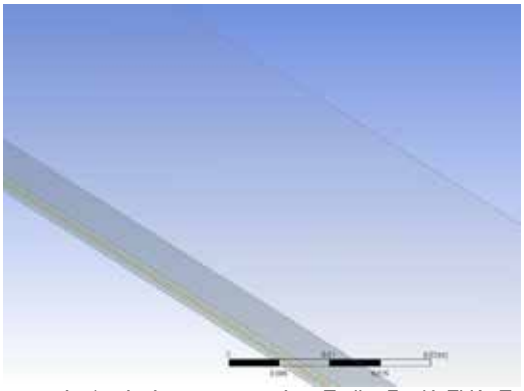


Εικόνα 1: Γεωμετρία τμήματος φωτοβολταϊκού

Το εσωτερικό του φωτοβολταϊκού κατασκευάστηκε από τις στρώσεις υλικών που φαίνονται στον Πίνακα 1. Απαραίτητος ήταν ο ορισμός των ιδιοτήτων των υλικών κάθε στρώσης στη βιβλιοθήκη υλικών του ANSYS καθώς τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν δεν ήταν προκαθορισμένα. Τα υλικά από τα οποία αποτελούνται οι στρώσεις είναι το προστατευτικό γυαλί, το EVA (Συμπολυμερές Αιθυλενίου-οξικού βινυλίου), το πυρίτιο και το Tedlar (Πολυβινυλοχλωρίδιο). Με τη σειρά με την οποία αναφέρονται παρουσιάζονται και στην Εικόνα 2.

Πίνακας 1: Ιδιότητες υλικών και διαστάσεις κάθε στρώματος στο φωτοβολταϊκό [11]

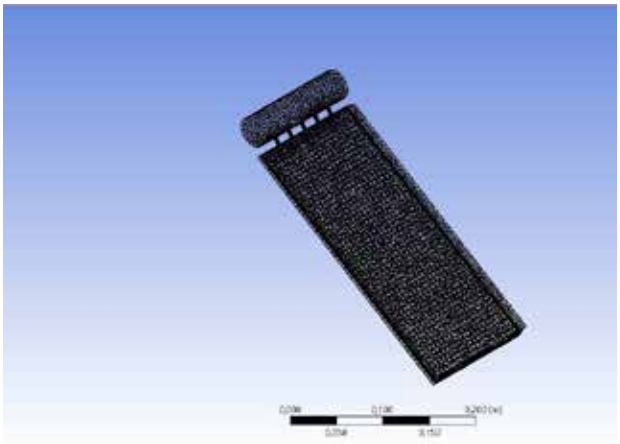
Υλικό	Πυκνότητα (Kg/m^3)	Θερμική αγωγιμότητα (W/mK)	Ειδική θερμοχωρητικότητα (J/kg.K)	Πάχος (mm)
Γυαλί	2450	2	500	3
EVA	950	0,311	2090	0,5
Πυρίτιο	2330	130	677	0,3
Tedlar	1200	0,15	1250	0,5



Εικόνα 2:Στρώματα γεωμετρίας(από κάτω προς τα πάνω Tedlar,Γυαλί, EVA, Πυρίτιο, Όγκος ελέγχου)

2.1.2. Πλεγματοποίηση

Μετά την ολοκληρωμένη τρισδιάστατη σχεδίαση του τμήματος του φωτοβολταϊκού συστήματος πρέπει να δημιουργηθεί το πλέγμα επίλυσης. Η διακριτοποίηση του υπολογιστικού χώρου έγινε στο ANSYS MESH, με σκοπό να κατασκευαστεί όσο το δυνατόν πιο δομημένο πλέγμα. Έγινε τοπική πύκνωση (inflation) στη διεπιφάνεια μεταξύ του στρώματος του νερού και της γυάλινης πλάκας.



Εικόνα 3:Κατασκευή πλέγματος

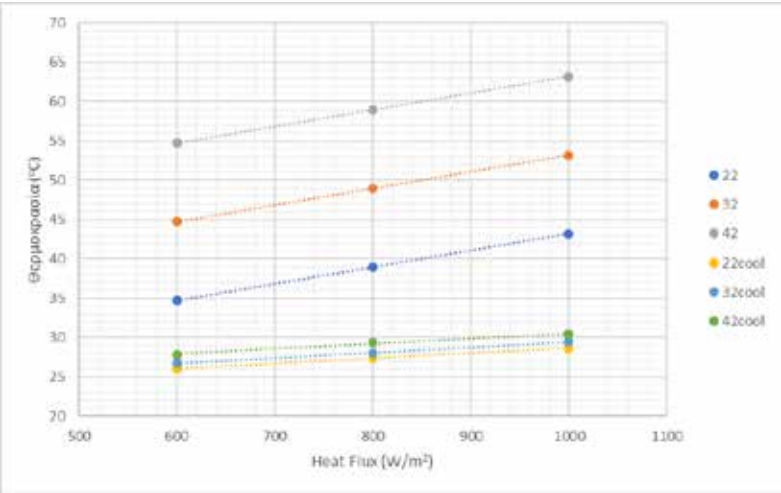
2.1.3. Οριακές συνθήκες

Η κατακερματισμένη πλέον γεωμετρία εισάγεται στο πακέτο Fluid Flow (CFX). Αρχικά είναι απαραίτητο να οριστούν τα τμήματα (Domain) που είναι στερεά (γυάλινη πλάκα, EVA, Πυρίτιο, Tedlar) και τα τμήματα που είναι ρευστά (εσωτερικό κεντρικού σωλήνα, εσωτερικό 5 μικρότερων σωλήνων και ο όγκος ελέγχου νερού-αέρα). Η παροχή του νερού εφαρμόστηκε στην αριστερή επιφάνεια του κεντρικού σωλήνα με σταθερή ταχύτητα 1,44 m/s και θερμοκρασία νερού 22 °C. Η έξοδος ορίστηκε στο κάτω άκρο του όγκου ελέγχου. Υπολογίστηκε ο αριθμός Reynolds, ο οποίος αντιστοιχεί σε τυρβώδη ροή και επιλέχθηκε το μοντέλο τύρβης k-ε. Τέλος πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για θερμοκρασίες περιβάλλοντος 22, 32 και 42^{o}C με εντάσεις ηλιακής ακτινοβολίας (Heat Flux) 600, 800 και 1000W/m^{2}.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του συστήματος ψύξης του τμήματος του φωτοβολταϊκού. Πέρα από τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν στο CFX, με τις ίδιες περιβαλλοντικές συνθήκες πραγματοποιήθηκαν και στο Steady-State Thermal, όπου μελετήθηκε μόνο το τμήμα του φωτοβολταϊκού, χωρίς το σύστημα ψύξης.

Υπάρχει δυνατότητα μελέτης της διακύμανσης της θερμοκρασίας σε κάθε στρώμα του τμήματος του φωτοβολταϊκού ξεχωριστά. Βάσει των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από το υπολογιστικό πακέτο του CFX και του Steady-State Thermal είναι απαραίτητο να γίνει σύγκριση τους προκειμένου να διαπιστωθεί η αποτελεσματικότητα του συστήματος ψύξης. Με τη χάραξη μιας κοινής γραφικής παράστασης μπορεί να γίνει αυτή η αξιολόγηση. Στην παρακάτω γραφική παράσταση επιλέχθηκαν οι μέγιστες θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο εσωτερικό στρώμα του πυριτίου, δηλαδή του ημιαγωγού. Οι τιμές που έχουν ληφθεί από την ψύξη του φωτοβολταϊκού πάνελ έχουν ονομαστεί ως cool, ενώ οι τιμές χωρίς το σύστημα ψύξης έχουν απλά το όνομα της εξωτερικής θερμοκρασίας. Παρατηρείται μεγάλη θερμοκρασιακή διαφορά όταν υπάρχει και όταν δεν υπάρχει το σύστημα ψύξης και ιδιαίτερά όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι 42ºC. Για τη μέγιστη απόδοση είναι ζητούμενο να διατηρούνται οι θερμοκρασίες σε χαμηλές τιμές. Στη συνέχεια κατασκευάζεται ο πίνακας 2 με τις διαφορές των μέγιστων θερμοκρασιών του πυριτίου με σύστημα και χωρίς σύστημα ψύξης.



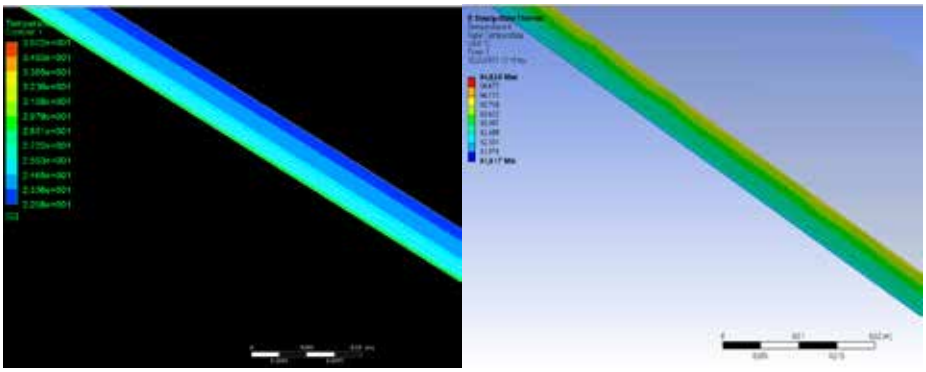
Εικόνα 4: Διάγραμμα θερμοκρασίας συναρτήσει ροής θερμότητας

Πίνακας 2: Διαφορά θερμοκρασιών με ψύξη και χωρίς

Θερμοκρασία Περιβάλλοντος (ºC)	22	32	42
Heat Flux (W/m²)	Διαφορά	Θερμοκρασίας	(ºC)
600	8,7	17,97	26,89
800	11,58	20,93	29,53
1000	14,53	23,72	32,77

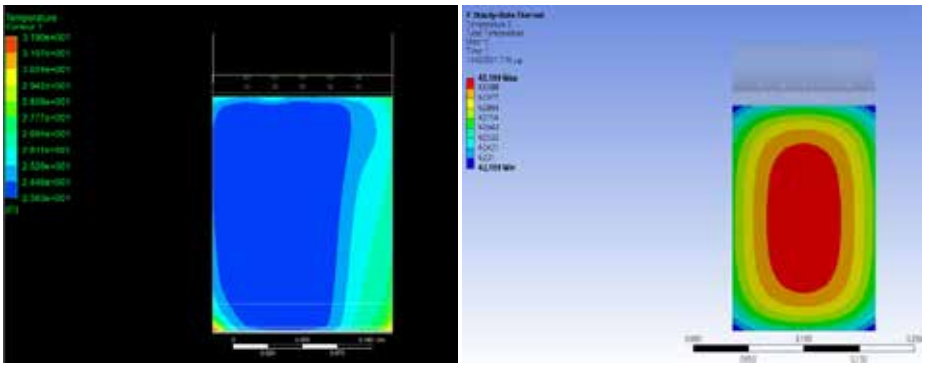
Στην εικόνα 5 παρουσιάζονται οι θερμοκρασιακές διακυμάνσεις του τμήματος του φωτοβολταϊκού σε όλα τα στρώμα του, για θερμοκρασία περιβάλλοντος 42°C και έντασης ηλιακής ακτινοβολίας 1000W/m². Στην αριστερά εικόνα φαίνεται πως το νερό απάγει τη θερμότητα και ότι το σώμα ψύχεται πιο έντονα στα πάνω στρώματα. Στη δεξιά εικόνα φαίνεται πως αναπτύσσονται πολύ πιο υψηλές

θερμοκρασίες καθώς δεν υπάρχει το σύστημα ψύξης. Οι υψηλότερες τιμές συναντώνται στο πάνω μέρος της γυάλινης πλάκας.



Εικόνα 5: Κατανομή θερμοκρασίας σε όλες τις στρώσεις του φωτοβολταϊκού (αριστερά με ψύξη, δεξιά χωρίς ψύξη)

Στην εικόνα 6 παρουσιάζονται οι θερμοκρασιακές διακυμάνσεις του τμήματος του φωτοβολταϊκού στην επιφάνεια του στρώματος του πυριτίου για θερμοκρασία περιβάλλοντος 42°C και ένταση ηλιακής ακτινοβολίας 1000W/m^2. Στην αριστερή εικόνα παρατηρείται ανομοιομορφία στην κατανομή της θερμοκρασίας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το νερό εξέρχεται από τα κάθε μπεκ με διαφορετική ταχύτητα και έχει σαν αποτέλεσμα στην δεξιά πλευρά του φωτοβολταικού να υπάρχει λιγότερη παροχή νερού και συνεπώς μικρότερη απαγωγή θερμότητας. Στη δεξιά εικόνα, οι υψηλότερες τιμές παρατηρούνται στο κέντρο του φωτοβολταϊκού και φθίνουν προς τα έξω.



Εικόνα 6: Κατανομή θερμοκρασίας στο στρώμα του πυριτίου του φωτοβολταϊκού (αριστερά με ψύξη, δεξιά χωρίς ψύξη)

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το τρισδιάστατο θερμικό μοντέλο τμήματος φωτοβολταϊκού πάνελ, με τη χρήση και χωρίς συστήματος ψύξης, έχει αναλυθεί με τη χρήση του λογισμικού ANSYS CFX και Steady-State Thermal. Κύριος στόχος είναι ο προσδιορισμός της θερμοκρασιακής κατανομής του φωτοβολταϊκού και η επίδρασή του νερού του συστήματος ψύξης. Ορίζοντας περιβαλλοντικές συνθήκες καθώς και συνθήκες λειτουργείας, η κατανομή της θερμοκρασίας χωρίς το σύστημα ψύξης είναι υψηλότερη από εκείνη που προκύπτει με την εφαρμογή του συστήματος ψύξης. Το βασικότερο συμπέρασμα που προκύπτει από τη διερεύνηση της ψύξης φωτοβολταϊκού συστήματος είναι ότι παρουσιάζεται μεγάλη πτώση της θερμοκρασίας του συστήματος. Το υλικό στο οποίο δίνεται μεγαλύτερη βαρύτητα είναι το πυρίτιο καθώς από την θερμοκρασία του εξαρτάται και η απόδοση του πάνελ. Ακόμα και όταν η εξωτερική θερμοκρασία είναι 42ºC και υπάρχει μεγάλη τιμή έντασης ηλιακής ακτινοβολίας, η θερμοκρασία του πυριτίου δεν ξεπερνά

τους 30,43ºC. Στις περιπτώσεις που εξετάστηκαν είναι φανερό και λογικό ότι οι πιο χαμηλές θερμοκρασίες του πάνελ προκύπτουν όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος και η ένταση ηλιακής ακτινοβολίας είναι χαμηλές. Από τη σύγκριση των θερμοκρασιών του πυριτίου με ψύξη και χωρίς προκύπτει ότι η θερμοκρασία ελαττώνεται αρκετούς βαθμούς. Η μέγιστη διαφορά θερμοκρασίας (32,77ºC) προκύπτει όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι 42ºC και η ένταση ηλιακής ακτινοβολίας 1000W/m^2. Μια τέτοια πτώση θερμοκρασίας συμβάλει στην αύξηση της απόδοσης του φωτοβολταϊκού.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία υλοποιήθηκε στο πλαίσιο της Δράσης «Ενίσχυση Επιχειρήσεων για ερευνητικά έργα» και συγχρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση και εθνικούς πόρους μέσω του Ε.Π. ΔΥΤΙΚΗ ΕΛΛΑΔΑ 2014-2020 (κωδικός έργου: ΔΕΡ7-0019983)»

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Twidell J., and Tony W., 2015, “Renewable energy resources”. Routledge.

[2] Khan, J. and Arsalan, M.H., 2016. Solar power technologies for sustainable electricity generation–A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *55*, pp.414-425.

[3] Dash, P.K, 2015. Effect of Temperature on Power Output from Different Commercially available Photovoltaic Modules, *International Journal of Engineering Research and Applications, Vol 5, Issue1(Part 1)*, pp 148-151.

[4] Skoplaki, E.J.A.P. and Palyvos, J.A., 2009. Operating temperature of photovoltaic modules: A survey of pertinent correlations. *Renewable energy*, *34*(1), pp.23-29.

[5] Smith, M.K., Selbak, H., Wamser, C.C., Day, N.U., Krieske, M., Sailor, D.J. and Rosenstiel, T.N., 2014. Water cooling method to improve the performance of field-mounted, insulated, and concentrating photovoltaic modules. *Journal of Solar Energy Engineering*, *136*(3).

[6] Odeh, S. and Behnia, M., 2009. Improving photovoltaic module efficiency using water cooling. *Heat Transfer Engineering*, *30*(6), pp.499-505.

[7] Zhe, L.W., Yusoff, M.I., Razak, A.A., Misrun, M.I., Ibrahim, S., Fahmi, M.I. and Rosmi, A.S., 2019. Effect of Water Cooling Temperature on Photovoltaic Panel Performance by Using Computational Fluid Dynamics (CFD). *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, *1*, pp.133-46.

[8] Kim, D.J., Kim, D.H., Bhattarai, S. and Oh, J.H., 2011. Simulation and model validation of the surface cooling system for improving the power of a photovoltaic module. *Journal of Solar energy engineering*, *133*(4).

[9] Sutanto, B. and Indartono, Y.S., 2019, January. Computational fluid dynamic (CFD) modelling of floating photovoltaic cooling system with loop thermosiphon. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2062, No. 1, p. 020011). AIP Publishing LLC.

[10] Teo, H.G., Lee, P.S. and Hawlader, M.N.A., 2012. An active cooling system for photovoltaic modules. applied energy, 90(1), pp.309-315.

[11] Senthil Kumar, R., Puja Priyadharshini, N. and Natarajan, E., 2015. Experimental and computational fluid dynamics (CFD) study of glazed three dimensional PV/T Solar panel with air cooling. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 787, pp. 102-106). Trans Tech Publications Ltd.

ΑΝΑΓΚΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ: ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ ΚΑΙ ΤΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ

Νικόλαος Κατσούλας*, Αικατερίνη Μπαξεβάνου, Δημήτριος Φείδαρος,

Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, ΠΘ, 38446 Φυτόκο, Νέα Ιωνία Μαγνησίας
e-mail: nkatsoul@uth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Μια λύση στο πρόβλημα της μείωσης της διαθέσιμης φωτοσυνθετικά ενεργού ακτινοβολίας (PAR) μέσα σε θερμοκήπια καλυμμένα με συμβατικά αδιαφανή φωτοβολταϊκά (PV) είναι η χρήση ημιδιαφανών φωτοβολταϊκών. Ένα ερώτημα που τίθεται είναι σε τι ποσοστό μπορεί να καλύπτει το ημιδιαφανές φωτοβολταϊκό το θερμοκήπιο ώστε να μην προκαλεί προβλήματα στην ανάπτυξη των φυτών. Το παρόν άρθρο αξιολογεί, μέσω προσομοιώσεων, την επίδραση της ενσωμάτωσης ημιδιαφανών οργανικών φωτοβολταϊκών (Organic PhotoVoltaics-OPV) στο κάλυμμα της οροφής ενός τοξωτού θερμοκηπίου. Η αξιολόγηση γίνεται συναρτήσει της διαθέσιμης και πρακτικά αξιοποιήσιμης ηλιακής ακτινοβολίας για φωτοσύνθεση (PAR) εντός του θερμοκηπίου. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι η προσομοίωση της μετάδοσης της ηλιακής ακτινοβολίας μέσω του καλύμματος και της κατανομής στης στο εσωτερικό του θερμοκηπίου με υπολογιστική ρευστόδυναμική (CFD), χρησιμοποιώντας το μοντέλο Discrete Ordinates (DO). Στην παρούσα εργασία εξετάστηκε η τομή δύο διαστάσεων (2Δ) ενός τροποποιημένου τοξωτού θερμοκηπίου πλάτους 8 m. Εξετάστηκαν τρεις συνδυασμοί OPV / καλύμματος που δίνουν περατότητα σε κάθετα προσπίπτουσα ακτινοβολία στο φάσμα της PAR ίση με 30%, 45% και 60%, κάτι που καθορίζει και το ποσοστό κάλυψης με OPV. Για το λόγο αυτό προσομοιώθηκε η μετάδοση ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια οκτώ ενδεικτικών ηλιακών ημερών στη διάρκεια του έτους. Τα αποτελέσματα περιλαμβάνουν τη διαθέσιμη PAR εντός του θερμοκηπίου στο επίπεδο των φυτών και του ρυθμού φωτοσύνθεσης των καλλιεργειών. Οι τιμές αυτές συγκρίνονται με τα αποτελέσματα ενός καλύμματος πολυαιθυλενίου (PE) χωρίς OPV για τις ίδιες εξωτερικές κλιματικές συνθήκες. Παράλληλα, υπολογίστηκε η ετήσια παραγωγή ενέργειας από τα OPV για τις τρεις εξεταζόμενες περιπτώσεις. Η μείωση που παρατηρήθηκε στη μέση διαθέσιμη ημερήσια PAR για τις περιπτώσεις με περατότητα στην κάθετα προσπίπτουσα PAR 30%, 45% και 60% σε σύγκριση με την περίπτωση του PE χωρίς OPV, είναι 77%, 66% και 52%, αντίστοιχα, ενώ η αντίστοιχη μείωση στο μέσο ημερήσιο ρυθμό φωτοσύνθεσης είναι 33%, 21% και 12%. Τέλος, η ετήσια παραγωγή ισχύος από τα OPV, ανά μονάδα μήκους θερμοκηπίου, για τις περιπτώσεις με περατότητα στην κάθετα προσπίπτουσα PAR 30%, 45% και 60%, ήταν 323, 242 και 158 kWh/(m·y), αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα αυτής της εργασίας θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν περαιτέρω για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού του θερμοκηπίου για τη μεγιστοποίηση της PAR σε επίπεδο καλλιέργειας.

Λέξεις-κλειδιά: *φωτοσυνθετικά ενεργός ακτινοβολία, παραγωγή ενέργειας, υπολογιστική ρευστοδυναμική, ημιδιαφανή φωτοβολταϊκά, ρυθμός φωτοσύνθεσης*

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η χρήση φωτοβολταϊκών για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών ενός θερμοκηπίου απαιτεί κατάληψη πιθανόν παραγωγικής γεωργικής γης για την εγκατάστασή τους [1]. Μια λύση σε αυτό το πρόβλημα θα μπορούσε να είναι η τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών (ΦΒ) πάνω στο κάλυμμα των θερμοκηπίων. Ωστόσο αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει σε μείωση της διαθέσιμης φωτοσυνθετικά ενεργούς ακτινοβολίας (photosynthetically active radiation - PAR) στο επίπεδο των φυτών, εμποδίζοντας την ανάπτυξη των φυτών και τροποποιώντας και άλλες παραμέτρους του μικροκλίματος μέσα στο θερμοκήπιο (θερμοκρασία, πεδίο πιέσεων, ταχύτητας του αέρα κλπ), οι οποίες επηρεάζονται από την περατότητα του καλύμματος. Αυτό θα μπορούσε να αντιμετωπιστεί με τη χρήση ημιδιάφανων ΦΒ σε μορφή φιλμ τα οποία αφενός μεν δεν επιβαρύνουν τη στατικότητα του θερμοκηπίου αφετέρου δε επιτρέπουν σημαντικές ποσότητες φυσικού φωτός να εισέλθουν στο θερμοκήπιο, καθώς δεν είναι αδιαφανή όπως τα συνήθη ΦΒ πλαίσια. Ωστόσο, περιορίζουν και αυτά την είσοδο της PAR και τροποποιούν το εσωτερικό μικροκλίμα με πολλούς μηχανισμούς (λιγότερη ποσότητα διαθέσιμης PAR στο επίπεδο των φυτών, μικρότερη μετάδοση θερμότητας μέσω του καλύμματος, μεταβολή του θερμικού και ροϊκού πεδίου μέσα στο θερμοκήπιο κ.α.).

Το ζήτημα της ενσωμάτωσης ΦΒ στο κάλυμμα θερμοκηπίων έχει απασχολήσει ευρέως την επιστημονική κοινότητα τα τελευταία χρόνια με έρευνες σχετικά με τα: (α) σε ποιο βαθμό είναι σε θέση να καλύψουν τις ενεργειακές ανάγκες του θερμοκηπίου και β) σε ποιο βαθμό επηρεάζουν την ανάπτυξη των φυτών. Η πλειονότητα αυτών των ξεκινούν με πειράματα ή μετρήσεις πεδίου, την ισχύ των οποίων προσπαθούν να επεκτείνουν μέσω ανάπτυξης αναλυτικών μοντέλων βασισμένων στις μετρήσεις.

Ένα σχετικό ζήτημα που έχει διερευνηθεί είναι πως η γεωμετρία του καλύμματος του θερμοκηπίου επηρεάζει την απόδοση των ΦΒ. Στην εργασία [2] μετρήθηκε η απόδοση τεσσάρων ΦΒ κυψελών άμορφης σιλικόνης και αναπτύχθηκε ένα αναλυτικό μοντέλο. Τα εξεταζόμενα ΦΒ ήταν τοποθετημένα σε ένα Γοτθικού τύπου θερμοκηπίου με προσανατολισμό Βοράς-Νότος. Οι έρευνες που περιγράφονται στην εργασία [3] επικεντρώνουν στη δυνατότητα των ενσωματωμένων στην οροφή ΦΒ να καλύψουν την ενεργειακή ζήτηση για τη ρύθμιση του εσωτερικού μικροκλίματος ενός θερμοκηπίου κρεμμυδιών. Στην εργασία αυτή μετρήθηκε η παραγόμενη ενέργεια και η ηλιακή ακτινοβολία μέσα σε θερμοκήπιο με κάλυψη της οροφής κατά 12.9% από ΦΒ και παράλληλα αναπτύσσεται ένα αναλυτικό μοντέλο για την πρόβλεψη της ηλιακής ακτινοβολίας σε συγκεκριμένες θέσεις μέσα στο θερμοκήπιο κατά τη διάρκεια της ημέρας. Στην εργασία [4] παρουσιάζονται μετρήσεις σχετικά με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, τη θερμοκρασία και τη διαθέσιμη PAR μέσα σε πειραματική διάταξη στην οποία τα ΦΒ προκαλούν σκίαση κατά 20% και αναπτύσσεται ένα αναλυτικό μοντέλο προκειμένου τα συμπεράσματα από τις μετρήσεις να γενικευτούν. Στην εργασία [5] ερευνάται η παραγωγή ενέργειας από ΦΒ διπλής όψεως τα οποία καλύπτουν το 37% της επιφάνειας ενός θερμοκηπίου.

Ένα άλλο ζήτημα που έχει διερευνηθεί είναι η επίδραση των ΦΒ στο εσωτερικό μικρόκλιμα ενός θερμοκηπίου. Σύμφωνα με μετρήσεις πεδίου σε θερμοκήπιο για τομάτες και λάχανα [1], η τοποθέτηση ημιδιαφανών ΦΒ σε απόσταση 8 cm πάνω από δίρριχτη οροφή, καλύπτοντας το 20% της επιφάνειας, προκαλεί μείωση της ηλιακής ακτινοβολίας κατά 35-40% και μείωση της θερμοκρασίας κατά 1-3ºC. Στην εργασία [6] εξετάζεται η επίδραση της αντικατάστασης του 50% μιας δίρριχτης οροφής θερμοκηπίου με μονοκρυσταλλικά ΦΒ, στη θερμοκρασία και την ηλιακή ακτινοβολία μέσα σε αυτό. Στην εργασία [7] εξετάζεται, μέσω μετρήσεων πεδίου, η επίδραση ενσωματωμένων ΦΒ στο ρυθμό εξατμισιοδιαπνοής και συνεπώς στη διαχείριση νερού του θερμοκηπίου. Προκύπτει [1, 3, 4] ότι η επίδραση της ενσωμάτωσης ΦΒ στην οροφή ενός θερμοκηπίου εξαρτάται και από την καλλιέργεια μέσα σε αυτό, με την καλλιέργεια τομάτας να είναι λιγότερο ευάλωτη από την καλλιέργεια κρεμμυδιών.

Ο υπολογισμός της διαθέσιμης PAR μέσα σε ένα θερμοκήπιο κατά τη διάρκεια μιας ηλιακής μέρας απαιτεί εκτεταμένους και δύσκολους υπολογισμούς οι οποίοι γίνονται ακόμα πιο απαιτητικοί στην περίπτωση μιας τοξωτής οροφής. Για το λόγο αυτό η πλειονότητα των σχετικών ερευνητικών εργασιών αφορά είτε την απόδοση των ΦΒ [8] είτε το εσωτερικό μικροκλίμα σε θερμοκήπια με δίρριχτη οροφή [9]. Όταν ασχολούνται με θερμοκήπια με τοξωτή οροφή, συνήθως υιοθετούν απλοποιημένες παραδοχές σε ότι αφορά τη γεωμετρία της οροφής [10]. Αυτοί οι υπολογισμοί όμως μπορούν να γίνουν με αριθμητικές

μεθόδους όπως είναι η υπολογιστική ρευστομηχανική (computational fluid dynamics – CFD) [11], η οποία επιτρέπει λεπτομερή προσομοίωση ακόμα και τοξωτής οροφής .

Η παρούσα εργασία εξετάζει την επίδραση της χρήσης ημιδιάφανων ΦΒ ενσωματωμένων στο κάλυμμα ενός θερμοκηπίου στο εσωτερικό μικροκλίμα και στις παραμέτρους που επηρεάζουν την ανάπτυξη των φυτών με αριθμητική προσομοίωση του μικροκλίματος. Συγκεκριμένα, εξετάζονται 3 επίπεδα πυκνότητας ΦΒ για τα οποία υπολογίζονται η διαθέσιμη PAR στο επίπεδο των φυτών καθώς και ο αντίστοιχος ρυθμός φωτοσύνθεσης. Για λόγους σύγκρισης γίνονται υπολογισμοί και για 'γυμνό' κάλυμμα δηλ. οροφή με μηδενική κάλυψη ΦΒ. Στόχος της εργασίας είναι να προσδιοριστεί το επίπεδο κάλυψης οροφής από ΦΒ, και συνεπώς και η εγκατεστημένη ισχύς, ανά μονάδα επιφάνειας οροφής, η οποία επιτρέπει φυσιολογική ανάπτυξη των φυτών, καθώς και ο ρυθμός μείωσης των παραγόντων ανάπτυξης που προκύπτει από την ενσωμάτωση ΦΒ. Για το λόγο αυτό αναπτύσσεται ένα CFD μοντέλο που μελετά το εσωτερικό μικροκλίμα και την κατανομή της ακτινοβολίας σε μια 2Δ γεωμετρία ενός θερμοκηπίου με τοξωτή οροφή κατά τη διάρκεια 8 τυπικών ηλιακών ημερών του έτους. Τέλος, υπολογίζεται η παραγωγή ενέργειας από τα ΦΒ που είναι ενσωματωμένα στην οροφή.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Οι προσομοιώσεις του μικροκλίματος έγιναν χρησιμοποιώντας ένα CFD μοντέλο που αναπτύχθηκε από τους συγγραφείς [11-13].

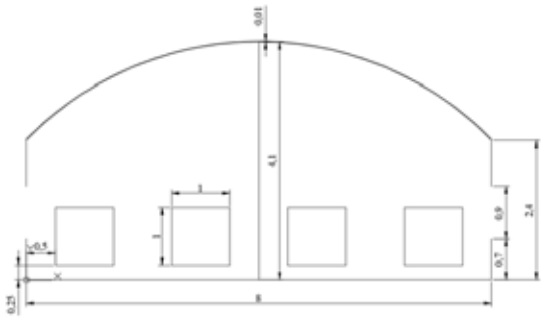
2.1. Μοντέλα και παραδοχές

Η ροή μέσα στο θερμοκήπιο θεωρείται 2Δ, μη-μόνιμη, ασυμπίεστη και τυρβώδης. Τα φαινόμενα μεταφοράς που αναπτύσσονται περιγράφονται από τις Reynolds-averaged Navier–Stokes (RANS) εξισώσεις [14]. Η εξίσωση της ενέργειας επιλύεται και μέσα στην περιοχή του στερεού όπου και γίνεται εξίσωση Fourier. Η τύρβη προσομοιώνεται μέσω του μοντέλου k-ε υψηλού Re με συναρτήσεις τοίχου. Η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στο κάλυμμα, η εκπεμπόμενη θερμική ακτινοβολία και η μετάδοση ακτινοβολίας μέσα στον υπολογιστικό χώρο προσομοιώνονται με το μοντέλο διακριτών κατευθύνσεων - Discrete Ordinates (DO) [15]. Τα φυτά θεωρούνται πορώδη υλικά μέσω της προσθήκης ενός όρου καταβόθρας στην εξίσωση της συνέχειας [11]. Το σύστημα των μερικών διαφορικών εξισώσεων επιλύεται με την μέθοδο των πεπερασμένων όγκων.

Η ταχύτητα του αέρα στο αριστερό άνοιγμα του θερμοκηπίου θεωρείται σταθερή κατά τη διάρκεια της ηλιακής ημέρας με κατακόρυφη κατανομή που αντιστοιχεί σε πλήρως αναπτυγμένη τυρβώδη ροή και μέση τιμή που λαμβάνεται από τοπικά κλιματικά δεδομένα θεωρώντας συντελεστή παροχής των ανοιγμάτων ίσο με 0.6 και επίπεδο τύρβης 3%. Η θερμοκρασία στην είσοδο θεωρείται ότι ακολουθεί ημιτονοειδή μεταβολή κατά τη διάρκεια της ημέρας [11]. Σε κάθε χρονική στιγμή της ημέρας υπολογίζεται η προσπίπτουσα ακτινοβολία (συνολική, άμεση και διάχυτη) σε οριζόντιο επίπεδο. Στη συνέχεια υπολογίζεται η κάθετα προσπίπτουσα ακτινοβολία σε κάθε υπολογιστικό κελί του καλύμματος σύμφωνα με την κλίση του τμήματος.

2.2. Γεωμετρία προσομοίωσης

Ο υπολογιστικός domain της προσομοίωσης συμπίπτει με τα όρια μιας τομής του τοξωτού θερμοκηπίου όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 1. Ο κύριος άξονας του θερμοκηπίου θεωρείται ότι έχει προσανατολισμό Ανατολή-Δύση. Το εξεταζόμενο θερμοκήπιο έχει συνολικό μήκος 20 , πλάτος 8 m ύψος πλευρικών 2.4 m και μέγιστο ύψος οροφής 4.1 m [11-13]. Μέσα σε αυτό βρίσκονται 4 διπλές σειρές φυτά τομάτας. Ο αερισμός του θερμοκηπίου είναι φυσικός και γίνεται μέσω δύο σειρών πλευρικών ανοιγμάτων. Εφόσον το μήκος του θερμοκηπίου είναι αρκετά μεγάλο σε σχέση με το πλάτος είναι ασφαλές να θεωρήσουμε αντιπροσωπευτική μια 2Δ τομή. Εξετάστηκαν δύο γεωμετρίες. Η πρώτη αντιστοιχεί σε θερινούς μήνες κατά τους οποίους τα πλευρικά ανοίγματα είναι πλήρως ανοιχτά (ύψος ανοίγματος 0.9 m) και η δεύτερη αντιστοιχεί σε χειμερινούς μήνες όταν τα ανοίγματα είναι μερικώς ανοιγμένα (ύψος ανοίγματος 0.2 m).



Σχήμα 1. Εξεταζόμενη γεωμετρία θερμοκηπίου

2.3. Αρχικές και οριακές συνθήκες

Η εξωτερική επιφάνεια του καλύμματος θεωρείται ημιδιάφανος τοίχος στον οποίο επιβάλλεται μικτή οριακή συνθήκη (μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία και συναγωγή). Η επιφάνεια αυτή είναι θερμικά και οπτικά συζευγμένη με στερεό ημιαδιάφανο υλικό (που αντιστοιχεί στο πάχος του καλύμματος) το οποίο επιτρέπει τη μετάδοση θερμότητας και ακτινοβολίας ανάλογα με τις οπτικές και θερμικές ιδιότητές του. Η εσωτερική επιφάνεια του καλύμματος είναι επίσης ημιδιάφανος τοίχος θερμικά και οπτικά συζευγμένη από τη μια πλευρά με το ημιδιάφανο στερεό υλικό και από την άλλη με τον αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Οι πλαϊνοί τοίχοι θεωρούνται ισόθερμες επιφάνειες με θερμοκρασία ίση με την εξωτερική θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Το έδαφος θεωρείται αδιαβατικός τοίχος. Η οριακή συνθήκη τοίχου αντιστοιχεί σε συνθήκες μη-εισχώρησης και μη-ολίσθησης. Η καλλιέργεια τομάτας θεωρείται πορώδες υλικό το οποίο εισάγει όρο καταβόθρας στην εξίσωση συνέχειας ενώ συμμετέχει και στη μετάδοση θερμότητας. Προκειμένου να ληφθούν υπόψη οι οπτικές ιδιότητες της καλλιέργειας μεταβάλλονται τοπικά οι οπτικές ιδιότητες του συμμετέχοντος στο πορώδες υλικό ρευστού (αέρα). Τέλος ένας όρος πηγής προστίθεται στην εξίσωση της ενέργειας ο οποίος αντιστοιχεί στη θερμική ακτινοβολία από το φυτό. Ο αέρας θεωρείται ότι εισέρχεται από το αριστερό άνοιγμα όπου επιβάλλεται συνθήκη εισόδου και εγκαταλείπει το υπολογιστικό πεδίο από το δεξί άνοιγμα όπου εφαρμόζεται συνθήκη εξόδου με γνωστή και σταθερή την πίεση ίση με την ατμοσφαιρική πίεση.

Η θερμοκρασία στο υπολογιστικό πεδίο ξεκινά από τιμή ίση με τη θερμοκρασία της εξωτερικής ατμόσφαιρας κατά την ανατολή. Η αρχική ταχύτητα του αέρα και η αρχικές τιμές των παραμέτρων της τύρβης μέσα στο υπολογιστικό πεδίο θεωρούνται ίσες με τις τιμές αντίστοιχες τιμές εισόδου του αέρα.

2.4. Πλέγμα και αριθμητικές λεπτομέρειες

Ο αλγόριθμος SIMPLE [14] χρησιμοποιείται για τη σύζευξη εξισώσεων πίεσης – ταχυτήτων. Οι όροι συναγωγής των εξισώσεων ορμής και ακτινοβολίας διακριτοποιούνται χρησιμοποιώντας ένα δεύτερης τάξης ανάντι σχήμα (SOU) [16], ενώ κεντρικές διαφορές χρησιμοποιούνται για τη διακριτοποίηση των όρων διάχυσης. Για τους όρους συναγωγής του μοντέλου τύρβης και της εξίσωσης διατήρησης της ενέργειας χρησιμοποιείται το σχήμα QUICK [17] και σχήμα SOU για την εξίσωση ακτινοβολίας. Για τη χρονική διακριτοποίηση πάλι ένα 2ης τάξης ανάντι σχήμα χρησιμοποιείται. Το κριτήριο σύγκλισης είναι 10^{-5} για τη συνέχεια, τη διατήρηση της ορμής και τις εξισώσεις τύρβης, 10^{-8} για την εξίσωση διατήρησης της ενέργειας και 10^{-6} για τις εξισώσεις ακτινοβολίας. Οι εξισώσεις ακτινοβολίας του μοντέλου DO επιλύονται για τέσσερα (4) φάσματα μήκους κύματος λ = 0.1–0.4–0.76–1.4–1000 μm. Το υπολογιστικό πεδίο διακριτοποιείται σε 19372 κελιά με τρόπο ώστε η αδιάστατη απόσταση y+ κοντά στα στερεά όρια να μένει μεταξύ 30 και 40. Το χρονικό βήμα είναι 60 s. Η έναρξη της προσομοίωσης αντιστοιχεί στη χρονική στιγμή της ανατολής του ηλίου κατά την εξεταζόμενη ημέρα και τελειώνει με τη δύση του ηλίου. Η αρχικοποίηση του πεδίου γίνεται από προηγούμενη λύση για συνθήκες μόνιμες.

2.5. Υλικά

2.5.1. Ημι-διάφανου φωτοβολταϊκού

Το ημι-διάφανο φωτοβολταϊκό αποτελείται από εναλλασσόμενες λωρίδες εκ των οποίων η μία περιέχει τα στοιχεία του ημιαγωγού (δομή I) και η άλλη είναι διάφανη (δομή II) έχοντας διαφορετικές οπτικές ιδιότητες η κάθε μια. Όταν επικολλάται πάνω σε 'γυμνό' κάλυμμα πολυαιθυλενίου πάχους 150μm δημιουργούνται τρεις συνδυασμοί: α) κάλυμμα+ δομή I, β) κάλυμμα + δομή II, γ) 'γυμνό' κάλυμμα.

Οι οπτικές ιδιότητες των δομών I και II λαμβάνονται από την εργασία [18], όπου επίσης παρουσιάζονται και οι οπτικές ιδιότητες του φύλλου πολυαιθυλενίου. Οι οπτικές ιδιότητες των (ολική περατότητα, τ, ολική απορρόφηση, α, και ανάκλαση, ρ_ συνδυασμών υπολογίζονται με βάση τις ακόλουθες σχέσεις [19]:

$$\tau_t = \frac{\tau_{t1} x \tau_{t2}}{1 - \rho_{t1} x \rho_{t2}} \quad (1)$$

$$\rho_t = \rho_{t1} + \frac{\tau_t x \rho_{t2} x \tau_{t1}}{\tau_{t2}} \quad (2)$$

$$\alpha_t = 1 - \rho_t - \tau_t \quad (3)$$

Όπου ο δείκτης t αντιστοιχεί στον όλο συνδυασμό δομη/κάλυμμα με το t_1 να αντιστοιχεί στη δομή και το t_2 στο κάλυμμα.

2.5.2. Ιδιότητες των υπολοίπων υλικών

Τα ενσωματωμένα ΦΒ δεν αναμένεται να τροποποιήσουν τις θερμοφυσικές ιδιότητες του καλύμματος πολυαιθυλενίου (PE) με πυκνότητα ρ = 950 kg m^{-3}, θερμική αγωγιμότητα k = 0.38 W m^{-1} K^{-1}, και ειδική θερμοχωρητικότητα Cp = 1900 J kg^{-1} K^{-1}. Οι ιδιότητες των υπολοίπων υλικών δίνονται στον πίνακα 1.

Πίνακας 1. Θερμοφυσικές και οπτικές ιδιότητες των υπολοίπων υλικών

Ιδιότητα	Έδαφος	Τομάτα στερεό τμήμα	Τομάτα ρευστό τμήμα [20]	Αέρας
Συντελεστής απορρόφησης, α_s [1/m]	10,000/10,000/ 10,000/10,000	1.23	3.075/3.075/7.5/7.5	0.000582/0.00058 /0.0015/0.0015
Συντ. διάθλασης, n	1.92/1.82/2.03/2.03	2.77	2.69/2.69/1.58/1.58	1.009
Πυκνότητα, ρ [kg m^{-3}]	1300	700	Boussinesq (1.225)	Boussinesq (1.225)
Θερμική αγωγιμότητα, k, [W m^{-1} K^{-1}]	1	0.173	0.0242	0.0242
Συντελεστής εκπομπής	0.92	0.5	0.00343	0.9
Συντελεστής σκέδασης	−10	0.46	1.7894×10^{-5}	0.15
Ειδ.θερμοχωρητικότητα, Cp [J kg^{-1} K^{-1}]	800	2130	1006	1.7894×10^{-5}

Οι οπτικές ιδιότητες δίνονται για τα τέσσερα φάσματα μήκους κύματος που εξετάζονται. Το πορώδες στην τομάτα είναι 40%. Τα πλευρικά τοιχώματα του θερμοκηπίου έχουν τις ίδιες θερμοφυσικές ιδιότητες με το κάλυμμα αλλά θεωρούνται αδιάφανα. Οι οπτικές ιδιότητες του αέρα μέσα στο θερμοκήπιο έχουν υπολογιστεί για μίγμα αέρα/υδρατμών που αντιστοιχεί σε σχετική υγρασία HR 65% στους 25ºC [21, 22].

2.6. Παραμετρική μελέτη

Στην παραμετρική διερεύνηση προσομοιώθηκαν 8 χαρακτηριστικές ημέρες. Τα κλιματικά δεδομένα για κάθε εξεταζόμενη ημέρα δίνονται στην πίνακα 2. Τα κλιματικά δεδομένα ελήφθησαν από την ΤΟΤΕΕ 20701-3/2010 [23]. Το εξεταζόμενο θερμοκήπιο είναι εγκατεστημένο στο Βελεστίνο με φ = 39° 23.4′ και λ = 22° 45′. Για τις ημέρες με μέση εξωτερική θερμοκρασία ημέρας μικρότερη από 22ºC χρησιμοποιείται η 'χειμερινή' γεωμετρία (μικρά ανοίγματα) ενώ για τις άλλες ημέρες χρησιμοποιείται η θερινή γεωμετρία.

Για κάθε ημέρα γίναν 4 προσομοιώσεις για τους 3 εξεταζόμενους συνδυασμούς OPV/κάλυμμα, οι οποίοι αντιστοιχούν σε περατότητα σε κάθετα προσπίπτουσα ακτινοβολία στο φάσμα της PAR ίση με 30%, 45% και 60% και για την περίπτωση του 'γυμνού' καλύμματος η οποία αντιστοιχεί σε περατότητα σε κάθετα προσπίπτουσα ακτινοβολία ίση με 89%. Οι εξεταζόμενοι συνδυασμοί OPV/κάλυμμα παρουσιάζονται στον πίνακα 3. Στην τελευταία στήλη δίνεται η αντίστοιχη εγκατεστημένη ΦΒ ισχύς ανά μέτρο μήκους θερμοκηπίου για συνολικό μήκος του τόξου της τομής της οροφής 8.93 m.

Πίνακας 2. Κλιματικά δεδομένα παραμετρικής μελέτης.

Ημέρα	Μέση ημερήσια θερμοκρασία [°C]	Μέση μηνιαία ταχύτητα ανέμου [m s^{-1}]	Μέση μηνιαία ελάχιστη θερμοκρασία [°C]	Μέση μηνιαία μέγιστη θερμοκρασία [°C]	Μέση μηνιαία ολική ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο [kWh m^{-2}]	Μέση μηνιαία διάχυτη ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο [kWh m^{-2}]
6 Φεβρουαρίου	9.1	2.9	3.5	12.3	74.3	30.9
21 Μαρτίου	11.3	2.7	4.9	14.4	112.5	49.1
6 Μαΐου	20.9	2.4	12.2	24	189.7	82.1
21 Ιουνίου	25.9	2.8	16.4	29	212.7	86.1
6 Αυγούστου	27.7	2.8	18.7	30.8	195.1	73.5
21 Σεπτεμβρίου	23.7	2.6	15.7	27.1	146.8	54.7
6 Νοεμβρίου	13.5	2.3	8.2	16.8	63.1	24.8
21 Δεκεμβρίου	9.4	2.7	4.5	12.5	51.5	20.5

Πίνακας 3. Εξεταζόμενοι συνδυασμοί OPV/κάλυμμα

PAR περατότητα σε κάθετα προσπίπτουσα ακτινοβολία	OPV/PE Κάλυμμα [%]	Δομή I/PE κάλυμμα [%]	Δομή II/PE κάλυμμα [%]	'Γυμνό' PE κάλυμμα [%]	Εγκατεστημένη ισχύς ΦΒ [W/m]
$\tau_{n,PAR}$ = 30%	96	75	21	4	278
$\tau_{n,PAR}$ = 45%	72	56	16	28	209
$\tau_{n,PAR}$ = 60%	47	37	10	53	136
$\tau_{n,PAR}$ = 89%	0	0	0	100	0

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων δίνονται με τη μορφή διαθέσιμης PAR και ρυθμού φωτοσύνθεσης. Ο ρυθμός φωτοσύνθεσης, P (σε μmol (CO_2) m^{-2} s^{-1}) υπολογίστηκε από:

$$P=\frac{\alpha I+P_{max}-\sqrt{(\alpha I+P_{max})^2-4\theta\alpha I P_{max}}}{2\theta} \quad (4)$$

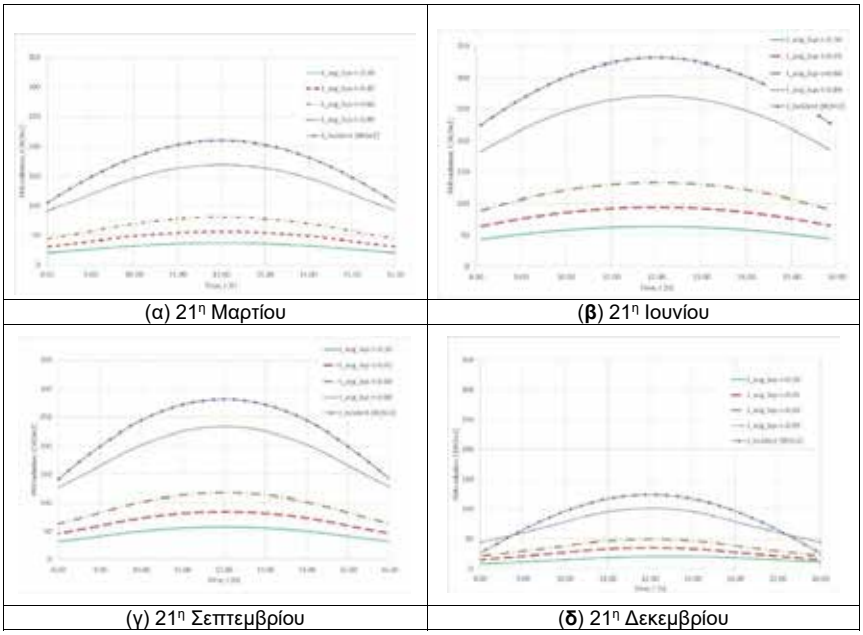
όπου α, ο φωτοπεριορισμός στην απόδοση φωτονίων (~0.5 μmol (CO_2) μmol^{-1} (photons)), I, η προσπίπτουσα PAR ακτινοβολία σε μmol (photons) m^{-2} s^{-1} (στο φάσμα της PAR 1 W m^{-2} ~ 2 μmol m^{-2} s^{-1}), Pmax, ο μέγιστος ρυθμός φωτοσύνθεσης (λαμβάνεται ίσος με 30 μmol CO_2 m^{-2} s^{-1}), και θ, μια σταθερά κλιμάκωσης για καμπυλότητα (λαμβάνεται ίση με 0.7, αδιάστατο).

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

3.1. Μέση PAR στο επίπεδο των φυτών

Στο Σχήμα 2 δίνεται η ημερήσια μεταβολή της PAR, σε οριζόντιο επίπεδο 10 cm πάνω από το επίπεδο των φυτών, ενδεικτικά για τις ισημερίες και τα ηλιοστάσια. Η παρουσία του καλύμματος μειώνει πολύ λίγο την PAR στο επίπεδο των φυτών και επιτρέπει σημαντικές ποσότητες της τάξης των 100 W/m^2 το

Δεκέμβριο και 270 W/m^2 τον Ιούνιο, αντιθέτως η παρουσία των φωτοβολταϊκών επηρεάζει σημαντικά τα επίπεδα αυτής. Να σημειωθεί ότι σε κάθε χρονική στιγμή δίνεται η μέση τιμή σε όλο το επίπεδο. Συνεπώς υπάρχουν περιοχές με αρκετά υψηλότερη ακτινοβολία και περιοχές που βρίσκονται στη σκιά των πλευρικών ανοιγμάτων. Επίσης σημαντικό ρόλο παίζει η γεωμετρία του τοξωτού, κάθε τμήμα του οποίου έχει διαφορετική κλίση από τα υπόλοιπα, τροποποιώντας ανάλογα την ακτινοβολία που διέρχεται από εκεί.



(α) 21η Μαρτίου | (**β**) 21η Ιουνίου

(γ) 21η Σεπτεμβρίου | (**δ**) 21η Δεκεμβρίου

Σχήμα 2. Μέση PAR στο επίπεδο των φυτών για 4 ενδεικτικές μέρες. Πράσινη συνεχής γραμμή: τη,PAR = 30%, κόκκινη διακεκομμένη γραμμή: τη,PAR = 45%, πράσινη διακεκομμένη γραμμή με στιγμές: τη,PAR = 60%, μαύρη γραμμή με τελείες: τη,PAR = 89%—'γυμνό' κάλυμμα, και κυανή συνεχής γραμμή με ομοιόχρωμους κύκλους: PAR προσπίπτουσα ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο σε ανοιχτό πεδίο.

Στον Πίνακα 4 δίνεται η ημερήσια ηλιακή ενέργεια PAR στο επίπεδο των φυτών για τους εξεταζόμενους συνδυασμούς ΦΒ/κάλυμμα. Οι τιμές στην παρένθεση αντιστοιχούν στη μέση ημερήσια περατότητα σε PAR.

Οι συνήθεις καλλιέργειες στα θερμοκήπια είναι λαχανικά με μέσες απαιτήσεις σε θερμοκρασία (τομάτα, πιπεριά, αγγούρι, πεπόνι, καρπούζι, πράσινα φασολάκια, μελιτζάνα). Ο στόχος είναι να αυξηθεί ο χρόνος κατά τον οποίο είναι εφικτή η καλλιέργεια σε ανοιχτό πεδίο. Η καλλιέργεια της τομάτας απαιτεί υψηλά επίπεδα ακτινοβολίας, υπάρχουν όμως άλλες καλλιέργειες οι οποίες δεν έχουν ανάγκη από τόσο ηλιακό φως για να αναπτυχθούν. Για τις τομάτες ένα κάτω όριο ανεκτής PAR είναι τα 200 W m^{-2}. Φυσικά είναι δύσκολο να προσδιοριστούν βέλτιστα επίπεδα ακτινοβολίας δεδομένου ότι η παραγωγικότητα εξαρτάται και από άλλες παραμέτρους όπως είναι η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία και η συγκέντρωση CO_2 [22]. Από τα αποτελέσματα του σχήματος 3 προκύπτει ότι η PAR ακτινοβολία μέσα στο θερμοκήπιο για την περίπτωση του γυμνού καλύμματος είναι πάνω από το όριο των 200 W m^{-2} από τον Απρίλιο μέχρι το Σεπτέμβριο ενώ σε όλες τις περιπτώσεις στις οποίες εξετάζεται ενσωμάτωση ημιδιάφανων ΦΒ η PAR ακτινοβολία είναι πάντα κάτω του ορίου.

Εκτός από την ένταση της ακτινοβολίας, σημαντικό ρόλο παίζει και η χρονική διάρκεια της περιόδου φωτισμού. Έτσι, επιλέγεται να εξεταστεί και η συνολική PAR ηλιακή ενέργεια ολοκληρώνοντας την

ακτινοβολία στη διάρκεια της ηλιακής ημέρας. Επιπλέον ρόλο παίζει και το κλάσμα της διάχυτης προς την συνολική ακτινοβολία εφόσον η διάχυτη ακτινοβολία οδηγεί σε υψηλότερη αποδοτικότητα στη χρήση ακτινοβολίας. Τα κάτω όρια απαιτούμενης συνολικής ηλιακής ενέργειας για τα ανωτέρω λαχανικά είναι περίπου 8.5 MJ m^{-2} d^{-1} το οποίο αντιστοιχεί σε περίπου 4.05 MJ m^{-2} d^{-1} PAR [24].

Πίνακας 4. Συνολική PAR ηλιακή ενέργεια στο επίπεδο των φυτών για τους εξεταζόμενους συνδυασμούς ΦΒ/κάλυμμα και μέση PAR περατότητα.

Ημέρα	**Ενέργεια PAR στο επίπεδο των φυτών [MJ $m^{-2}d^{-1}$] και μέση PAR περατότητα του θερμοκηπίου**			
	$\tau_{n,PAR}$ = 30%	**$\tau_{n,PAR}$ = 45%**	**$\tau_{n,PAR}$ = 60%**	**$\tau_{n,PAR}$ = 89%**
6 Φεβρουαρίου	0.84 (0.19)	1.25 (0.28)	2.13 (0.46)	4.48 (0.88)
21 Μαρτίου	1.08 (0.18)	1.64 (0.27)	2.33 (0.38)	4.92 (0.81)
6 Μαίου	1.84 (0.18)	2.66 (0.27)	3.79 (0.39)	8.25 (0.81)
21 Ιουνίου	2.20 (0.19)	3.28 (0.29)	4.59 (0.40)	9.38 (0.82)
6 Αυγούστου	2.09 (0.20)	3.09 (0.29)	4.29 (0.41)	8.64 (0.82)
21 Σεπτεμβρίου	1.67 (0.20)	2.45 (0.30)	3.40 (0.42)	6.79 (0.83)
6 Νοεμβρίου	0.71 (0.20)	1.05 (0.30)	1.46 (0.42)	2.96 (0.85)
21 Δεκεμβρίου	0.50 (0.18)	0.82 (0.30)	1.14 (0.42)	2.34 (0.87)

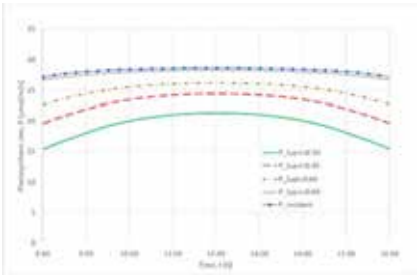
Η ενσωμάτωση ΦΒ στο κάλυμμα η οποία οδηγεί σε περατότητα της κάθετα προσπίπτουσας ακτινοβολίας 60% στο PAR φάσμα οδηγεί σε μείωση της ημερήσιας ηλιακής ενέργειας PAR κατά 52% σε σχέση με το γυμνό κάλυμμα. Αντίστοιχα οι περιπτώσεις ενσωμάτωσης ΦΒ με περατότητα της κάθετα προσπίπτουσας PAR 45% και 30% οδηγούν σε μείωση κατά 66% αι 77% αντίστοιχα, σύμφωνα με τον πίνακα 4. Λαμβάνοντας υπόψη το όριο των 4 MJ m^{-2} d^{-1} ο συνδυασμός ΦΒ/κάλυμμα με PAR περατότητα σε κάθετα προσπίπτουσα ακτινοβολία 60% ικανοποιεί αυτό το όριο από Μάιο μέχρι Σεπτέμβριο. Οι άλλοι δύο συνδυασμοί δίνουν συνολική PAR ενέργεια κάτω του ορίου σε όλο το έτος.

Ένα άλλο σημαντικό εύρημα που παρουσιάζεται στον πίνακα 4 είναι ότι ενώ για το γυμνό κάλυμμα η μέση ημερήσια περατότητα σε PAR είναι 87% δηλ. πολύ κοντά στην τιμή για κάθετα προσπίπτουσα ακτινοβολία (89%) δε συμβαίνει το ίδιο και για τις άλλες περιπτώσεις. Στην περίπτωση της περατότητας σε κάθετα προσπίπτουσα ακτινοβολία 60% η συνολική μέση ημερήσια περατότητα είναι της τάξης του 41% ενώ στις περιπτώσεις κάθετα προσπίπτουσας ακτινοβολίας 45% και 30% οι μέσες ημερήσιες PAR περατότητες γίνονται 29% και 19% αντίστοιχα.

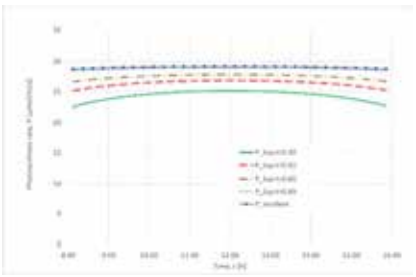
Η διαφορά ανάμεσα στην περατότητα σε κάθετη προσπίπτουσα PAR ακτινοβολία και στη μέση ημερήσια περατότητα της PAR είναι 36%, 35%, 31% και 6 για κάθετη PAR 30%, 45%, 60% και 89% αντίστοιχα. Αυτή η μη γραμμικότητα οφείλεται αφενός μεν στη λογαριθμική σχέση που συνδέει το συντελεστή περατότητας (extinction coefficient) με τη διαδρομή του φωτός [16] και αφετέρου στο γεγονός ότι η μέση περατότητα είναι αποτέλεσμα και των ανακλάσεων εντός του θερμοκηπίου. Αυτή η διαφορά μειώνεται από τους εαρινούς προς τους χειμερινούς μήνες σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις κάτι που είναι σε συμφωνία με μετρήσεις [6] που έδειξαν ότι η μικρότερη διαφορά παρατηρείται το Δεκέμβριο και αυξάνεται το υπόλοιπο έτος με μέγιστο τον Ιούνιο και τον Ιούλιο. Πρακτικά η συνολική περατότητα του καλύμματος είναι μικρότερη από την ονομαστική τιμή που δίνουν οι κατασκευαστές για κάθετα προσπίπτουσα ακτινοβολία λόγω σκίασης των δομικών στοιχείων, σκόνης και της γωνίας πρόσπτωσης των ηλιακών ακτινών.

3.3 Μέσος ρυθμός φωτοσύνθεσης σε επίπεδο φυτού

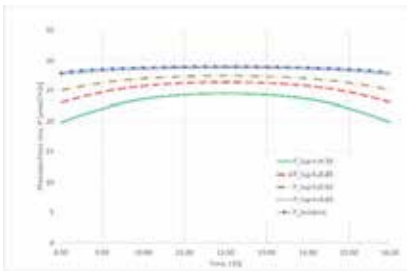
Στο Σχήμα 3 δίνεται η μεταβολή του μέσου ρυθμού φωτοσύνθεσης κατά τη διάρκεια της ηλιακής μέρας σε επίπεδο 10 cm πάνω από τα φυτά για τις ισημερίες και τα ηλιοστάσια. Και σε αυτό το σχήμα σε κάθε γράφημα δίνονται πέντε (5) γραμμές οι οποίες αντιστοιχούν σε (i) τη,PAR = 30% (πράσινη συνεχής γραμμή), (ii) τη,PAR = 45% (κόκκινη διακεκομμένη γραμμή), (iii) τη,PAR = 60% (πράσινη διακεκομμένη γραμμή με στιγμές), (iv) τη,PAR = 89%—'γυμνό' κάλυμμα (μαύρη γραμμή με τελείες), και (v) PAR προσπίπτουσα ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο σε ανοιχτό πεδίο (κυανή συνεχής γραμμή με ομοιόχρωμους κύκλους). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι σε αυτή την προσομοίωση τα πλαϊνά θεωρούνται αδιάφανα και η ακτινοβολία εισέρχεται στο χώρο του θερμοκηπίου μόνο μέσω της τοξωτής οροφής.



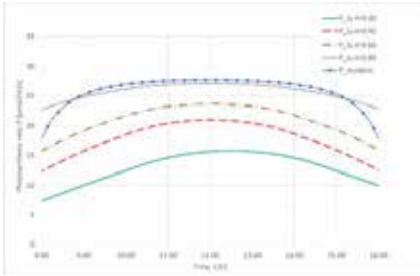
(α) 21η Μαρτίου



(β) 21η Ιουνίου



(γ) 21η Σεπτεμβρίου



(δ) 21η Δεκεμβρίου

Σχήμα 3. Μέσος ρυθμός φωτοσύνθεσης στο επίπεδο των φυτών σε ενδεικτικές μέρες

Στον πίνακα 10 δίνεται ο μέσος ημερήσιος ρυθμός φωτοσύνθεσης στο επίπεδο του φυτού για τις εξεταζόμενες ημέρες και τους εξεταζόμενους συνδυασμούς καλύμματος/ΦΒ σε μmol m^{-2} d^{-1} και αθροιστικά κατά τη διάρκεια όλης της ημέρας (x10^3 μmol m^{-2} d^{-1}).

Πίνακας 5. Ημερήσιος ρυθμός φωτοσύνθεσης στο επίπεδο των φυτών

Ημέρα	Μέσος ημερήσιος [σε μmol $m^{-2}d^{-1}$] και ημερήσιος αθροιστικός [στην παρένθεση, σε 10^3 μmol $m^{-2}d^{-1}$] Ρυθμός Φωτοσύνθεσης			
	$\tau_{n,PAR}$ = 30%	$\tau_{n,PAR}$ = 45%	$\tau_{n,PAR}$ = 60%	$\tau_{n,PAR}$ = 89%
6 Φεβρουαρίου	17.71 (580)	21.45 (713)	24.04 (851)	26.74 (962)
21 Μαρτίου	19.41 (717)	22.95 (870)	25.15 (977)	27.83 (1122)
6 Μαίου	23.20 (996)	25.63 (1073)	27.02 (1178)	28.64 (1358)
21 Ιουνίου	24.29 (1071)	26.30 (1197)	27.43 (1275)	28.80 (1373)
6 Αυγούστου	24.06 (1045)	26.10 (1174)	27.28 (1256)	28.70 (1363)
21 Σεπτεμβρίου	23.09 (877)	25.41 (990)	26.78 (1062)	28.46 (1157)
6 Νοεμβρίου	16.04 (523)	19.85 (655)	22.63 (756)	26.53 (910)
21 Δεκεμβρίου	13.09 (399)	17.97 (549)	21.05 (647)	25.74 (801)

Η μέση ετήσια τιμή του μέσου ρυθμού φωτοσύνθεσης για τις εξεταζόμενες περιπτώσεις συνδυασμών καλύμματος/ΦΒ που αντιστοιχούν σε περατότητα σε κάθετα προσπίπτουσα ακτινοβολία στο PAR φάσμα 30%, 45%, 60% και 89% αντίστοιχα είναι 18.1, 21.2, 23.7 και 27.1 αντίστοιχα. Συνεπώς η μείωση του μέσου ρυθμού φωτοσύνθεσης από την ενσωμάτωση των ΦΒ για τις περιπτώσεις της κάθετης PAR

περατότητας 30%, 45% και 60% σε σύγκριση με το γυμνό κάλυμμα είναι 33%, 21% και 12% αντίστοιχα. Παρόμοια είναι τα αποτελέσματα και για την αθροιστική ημερήσια τιμή του ρυθμού φωτοσύνθεσης.

Σύμφωνα με βιβλιογραφική έρευνα μείωση της ακτινοβολίας κατά 1% οδηγεί σε μείωση της παραγωγής τομάτας από 0.6 έως 1.1% [25] ή σύμφωνα με τους παραγωγούς από 0.7 έως 1%. Δεν είναι εύκολο να διερευνηθεί με ακρίβεια η μείωση του κέρδους. Σκίαση της καλλιέργειας όταν η διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία είναι υψηλή μειώνει ελάχιστα τη φωτοσύνθεσης στα ανώτερα φύλλα. Όμως σκίαση όταν ήδη η διαθέσιμη ακτινοβολία είναι χαμηλή είναι δυνατό να επηρεάσει δυσμενώς τα κατώτερα φύλλα. Συνεπώς η σκίαση αποτελεί πρόβλημα στις περιόδους χαμηλής ηλιακής ακτινοβολίας. Σύμφωνα με μετρήσεις [26] μείωση της PAR κατά 57% και 34% οδηγεί σε μείωση της ανάπτυξης των φυτών κατά 31% και 19% αντίστοιχα. Άρα αυξάνεται το ποσοστό αξιοποίησης της ακτινοβολίας λόγω προσαρμογής του μεταβολισμού των φυτών. Σημαντική σκίαση μπορεί να μειώσει την παραγωγή τομάτας [27]. Όμως μικρή και μέση σκίαση δεν επιδρά στο τελικό κέρδος ενώ μπορεί να βελτιώσει την παραγωγή σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας και ηλιακής ακτινοβολίας [28]. Έχει βρεθεί ότι σκίαση της τάξης του 9.8% με ΦΒ δε μειώνει την ετήσια παραγωγή τομάτας [29]. Τέλος υπάρχουν και άλλες καλλιέργειες οι οποίες δε χρειάζονται τόσο υψηλές ποσότητες ηλιακής ακτινοβολίας. Σε καλλιέργεια φράουλας και βατόμουρου οι παράμετροι που καθορίζουν την ποιότητα του προϊόντος δεν επηρεάζονται από τη σκίαση με ΦΒ [30]. Σε καλλιέργεια πιπεριάς με κάλυψη της οροφής κατά 20% επίσης δεν παρατηρήθηκε επίπτωση στην ποιότητα του προϊόντος [31].

3.4. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Στον υπολογισμό της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΦΒ ενσωματωμένα στην οροφή τοξωτού θερμοκηπίου εμφανίζονται δύο προκλήσεις. Η πρώτη αφορά τη γεωμετρία της τοξωτής οροφής δεδομένου ότι κάθε σημείο αυτής έχει διαφορετική κλίση. Έτσι η απόδοση ενός πλαισίου θα καθορίζεται κάθε χρονική στιγμή από το ΦΒ κελί με τη δυσμενέστερη κλίση, ανάλογα με τη συνδεσμολογία των κελιών στο πλαίσιο. Γι' αυτό επιλέγονται στενόμακρα πλαίσια (0.15x0.82 m) τα οποία διατάσσονται κατά μήκος του άξονα του θερμοκηπίου με αποτέλεσμα η γωνία κλίσης από τη μία άκρη του πλαισίου μέχρι την άλλη να διαφέρει μόνο κατά 1.54ο, επιτρέποντας τον υπολογισμό για μια μέση γωνία κλίσης. Τα χαρακτηριστικά του εξεταζόμενου ΦΒ είναι V_{oc} = 6V, I_{sc} = 1A, V_{mp} = 4.3V, I_{mp} = 0.9A.

Η δεύτερη πρόκληση αφορά την επιλογή του αντιστροφέα λόγω του χαμηλού V_{mp} και της χαμηλής παραγόμενης ισχύος ανά πλαίσιο κάτι που καθιστά δύσκολη τη συνεργασία με την πλειοψηφία των υπαρχόντων αντιστροφέων (ελάχιστη τάση εισόδου 250 V, ή και υψηλότερο). Για να αντιμετωπιστεί αυτό επιλέχθηκε μίνι – αντιστροφέας με τάση εισόδου 3 W και ελάχιστη MPP τάση 28 V και με κατάλληλη διασύνδεση των πλαισίων. Υπολογίστηκε η ετήσια παραγωγή ενέργειας από τα ενσωματωμένα ΦΒ ανά μέτρο μήκους διατομής του θερμοκηπίου και παρουσιάζεται στον πίνακα 6 για τους τρεις εξεταζόμενους συνδυασμούς μαζί με την εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας και τη μείωση εκπομπών CO_2.

Πίνακας 6. Ετήσια παραγωγή ενέργειας ανά μέτρο μήκους θερμοκηπίου της εξεταζόμενης διατομής

PAR περατότητα σε κάθετη ακτινοβολία , τ_n [-]	30%	45%	60%
Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας [kWh m^{-1} y^{-1}]	323	242	158
Εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας [kWh m^{-1} y^{-1}]	937	702	458
Μείωση εκπομπής CO_2 [kg m^{-1} y^{-1}]	319	239	156

Τελικά το περιβαλλοντικό αποτύπωμα ΦΒ ενσωματωμένων σε τοξωτό θερμοκήπιο εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως είναι ο τύπος της καλλιέργειας, η στρατηγική λειτουργίας και το μέγεθος του θερμοκηπίου που επηρεάζουν τις ενεργειακές του ανάγκες και η διαθέσιμη επιφάνεια του καλύμματος.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι συνδυασμοί διαφορετικών πυκνοτήτων ημιδιαφανών φωτοβολταϊκών ενσωματωμένων στην οροφή θερμοκηπίου που εξετάστηκαν αντιστοιχούν σε περατότητα σε κάθετη προσπίπτουσα ακτινοβολία PAR 30%, 45% και 60% και συγκρίθηκαν με τη λειτουργία 'γυμνού' καλύμματος, δηλ. καλύμματος μόνο από φύλλο πολυαιθυλενίου χωρίς ενσωμάτωση ΦΒ το οποίο σε κάθετα προσπίπτουσα ακτινοβολία στο φάσμα της PAR έχει περατότητα 89%. Θεωρώντας ως κάτω ανεκτό όριο διαθέσιμης ημερήσιας PAR

για αρκετές καλλιέργειες τα 4 m^{-2} d^{-1} προέκυψε ότι μόνο ο συνδυασμός ΦΒ/κάλυμμα που αντιστοιχεί σε περατότητα κάθετα προσπίπτουσας PAR 60% ήταν σε θέση να ικανοποιήσει αυτή την απαίτηση μεταξύ Μαΐου – Σεπτεμβρίου. Ο συνδυασμός αυτός αντιστοιχεί σε κάλυψη της οροφής του θερμοκηπίου κατά 47% από τα εξεταζόμενα ημιδιάφανα ΦΒ. Οι υπόλοιποι συνδυασμοί διατηρούν την διαθέσιμη ημερήσια PAR κάτω από αυτό το όριο κατά τη διάρκεια όλου του έτους. Η μείωση της διαθέσιμης ημερήσιας PAR που προκαλούν οι συνδυασμοί που αντιστοιχούν σε περατότητα της κάθετα προσπίπτουσας PAR 30%, 45% και 60% σε σχέση με το γυμνό φύλλο πολυαιθυλενίου είναι 77%, 66% και 52% αντίστοιχα ενώ οι μειώσεις του μέσου ημερήσιου ρυθμού φωτοσύνθεσης είναι 33%, 21% και 12% αντίστοιχα. Τέλος η ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τη διατομή του θερμοκηπίου ανά μέτρο μήκους θερμοκηπίου για περατότητα κάθετα προσπίπτουσας ακτινοβολίας 30%, 45% και 60% είναι 323, 242 και 158 kWh m^{-1} y^{-1}, αντίστοιχα. Τα στοιχεία αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο σχεδιασμό θερμοκηπίων με στόχο τη μεγιστοποίηση της PAR στο επίπεδο των φυτών παράλληλα με κάλυψη των αναγκών τους σε ηλεκτρική ενέργεια.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία υλοποιήθηκε στο πλαίσιο της Δράσης ΕΡΕΥΝΩ – ΔΗΜΙΟΥΡΓΩ - ΚΑΙΝΟΤΟΜΩ και συγχρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση και εθνικούς πόρους μέσω του Ε.Π. Ανταγωνιστικότητα, Επιχειρηματικότητα & Καινοτομία (ΕΠΑνΕΚ) (κωδικός έργου:Τ1ΕΔΚ-01701).

Βιβλιογραφία

[1] Hassanien, R.H.E., Li, M. and Yin, F., 2018, “The integration of semi-transparent photovoltaics on greenhouse roof for energy and plant production”, *Renew. Energy*, *121*, pp. 377–388.

[2] Yano, A., Furue, A., Kadowaki, M., Tanaka, T., Hiraki, E., Miyamoto, M., Ishizu, F. and Noda, S.,2009, “Electrical energy generated by photovoltaic modules mounted inside the roof of a north-south oriented greenhouse”, *Biosyst. Eng. 103*, pp.228–238.

[3] Kadowaki, M., Yano, A., Ishizu, F., Tanaka T. and Noda, S., 2012, “Effects of greenhouse photovoltaic array shading on Welsh onion growth”, *Biosyst. Eng., 111*, pp.290–297.

[4] Trypanagnostopoulos, G., Kavga, A., Souliotis, M. and Tripanagnostopoulos, Y., 2017, “Greenhouse performance results for roof installed photovoltaics”, *Renew. Energy*, *111*, pp.724–731.

[5] Yano, A., Onoe, M. and Nakata, J., 2014, “Prototype semi-transparent photovoltaic modules for greenhouse roof applications”, *Biosyst. Eng.*, *122*, pp.62–73.

[6] Cossu, M., Murgia, L., Ledda, L., Deligios, P.A., Sirigu, A., Chessa, F. and Pazzona, A., 2014, “Solar radiation distribution inside a greenhouse with south-oriented photovoltaic roofs and effects on crop productivity”, *Appl. Energy*, *133*, pp.89–100.

[7] Marrou, H., Dufour, L. and Wery, J., 2013, “How does a shelter of solar panels influence water flows in a soilecrop system?”, *Eur. J. Agron.*, *50*, pp.38–51.

[8] Friman Peretz, M. et al., 2019 “Testing organic photovoltaic modules for application as greenhouse cover or shading element”. *Biosyst. Eng., 184*, pp.24–36.

[9] Teranaka, K., Ikeda, T. and Doi, M., 2018, “Simulation of seasonal changes in radiant flux energy in a greenhouse installed with light-transmitting organic photovoltaics”, *Acta Hortic.1208*, pp.339–346.

[10] Okada, K., Yehia, I., Teitel M. and Kacira, M., 2018, “Crop production and energy generation in a greenhouse integrated with semi-transparent organic PV film”, *Acta Hortic.1227, pp.* 231–239.

[11] Baxevanou, C., Fidaros, D., Bartzanas, T. and, Kittas, C., 2018, “Yearly numerical evaluation of greenhouse cover materials” *Comput. Electron. Agric*, *149*, pp.54–70.

[12] Baxevanou, C., Fidaros, D., Bartzanas T.and Kittas, C., 2010, "Numerical simulation of solar radiation, air flow and temperature distribution in a naturally ventilated tunnel greenhouse", *Agric. Eng. Int. CIGR J.*, *12*, pp.48–67.

[13] Fidaros, D., Baxevanou, C., Bartzanas Th.,and Kittas, C., 2010, "Numerical simulation of thermal behavior of a ventilated arc greenhouse during a solar day", *Renew. Energy*, *35*, 1380–1386.

[14] Ferziger, J.H., Peric, M., 1996 *Computational Methods for Fluid Dynamics*; Springer: London, UK

[15] Kim, S.H. and Huh, K.Y., 2000, "A new angular discretization scheme of the finite volume method for 3-D radiative heat transfer in absorbing, emitting and anisotropically scattering media", *Int. J. Heat Mass Tran., 43*, 1233–1242.

[16] Tamamidis, P. and Assanis, D.N., 1993, "Evaluation of various high order accuracy schemes with and without flux limiters", *Intl. J. Numer. Methods Fluids*, *16*, pp.931–948.

[17] Leonard, B.P., 1979, "A stable and accurate convective modelling procedure based on quadratic upstream interpolation". *Comput. Methods Appl. Mech., 19*, pp.59–98.

[18] Baxevanou, C., Fidaros, D., Katsoulas, N., Mekeridis, E., Varlamis, Chr.,Zachariadis, A. and Logothetidis, St., 2020, "Simulation of Radiation and Crop Activity in a Greenhouse Covered with Semitransparent Organic Photovoltaics", Appl. Sci., 10, 2550

[19] Duffie, J.A. and Beckman, W.A., 2006, "*Solar Engineering of Thermal Processes"*, 3rd ed.; Wiley: New Jersey, USA.

[20] Kichah, A., Bournet, P.E. and Migeon, C., 2012, "Measurement and CFD simulations of the transpiration and leaf temperatures of an Impatients pot plant crop in a greenhouse", *Biosyst. Eng.*, *112*, pp.22–34.

[21] Mehra, R., 2003, "Application of refractive index mixing rules in binary systems of hexadecane and heptadecane with n-alkanols at different temperatures", *J. Chem. Sci.*, *115*, pp.147–154.

[22] Stanghellini, C., Van't Ooster, B. and Heuvelink, E., 2019, "*Greenhouse Horticulture: Technology for Optimal Crop Production",* Wageningen Academic Publishers: Wageningen, pp. 311.

[23] ΤΟΤΕΕ 20701-3/2010, Κλιματικά Δεδομένα Ελληνικών Περιοχών

[24] Nisen, A, et al., 1988, Cultures protégées en climat Mediterraneen. *FAO*, *90*, 317 p, Rome.

[25] Marcelis, L.F.M., Broekhuijsen, A.G.M., Meinen, E., Nijs, E.M. and Raaphorst, M.G.M., 2006, "Quantification of the growth response to light quantity of greenhouse grown crops. *Acta Hortic.*, *711*, pp.97–103.

[26] Kläring, H.P., Krumbein, A., 2013 "The effect of constraining the intensity of solar radiation on the photosynthesis, growth, yield and product quality of tomato", *J. Agron. Crop Sci.*, *199*, pp.351–359.

[27] Lorenzo, P., García, M., Sánchez-Guerrero, M., Medrano, E., Caparros, I. and Giménez, M., 2006, "Influence of mobile shading on yield, crop transpiration & WUE", *Acta Hortic*, *719*, pp.471–478.

[28] Ezzaeri, K., et al., 2018, "The effect of photovoltaic panels on the microclimate and on the tomato production under photovoltaic canarian greenhouses", *Sol. Energy*, *173*, pp.1126–1134.

[29] Aroca-Delgado, R., Pérez-Alonso, J., Callejón-Ferre, A.J.and Díaz-Pérez, M., 2019, "Morphology, yield and quality of greenhouse tomato cultivation with flexible photovoltaic rooftop panels (Almería-Spain)", *Sci. Hortic.*, *257*, pp.108768.

[30] Blando, F., Gerardi, C., Renna, M., Castellano, S. and Serio, F., 2018, "Characterisation of bioactive compounds in berries from plants grown under innov. PV greenhouses", *J. Berry Res.*, *8*, 55–69.

[31] Kavga, A., Strati, I.F., Sinanoglou, V.J., Fotakis, C., Sotiroudis, G., Christodoulou, P. and Zoumpoulakis, P., 2019, "Evaluating the experimental cultivation of peppers in low energy-demand greenhouses. An interdisciplinary study", *J. Sci. Food Agric.*, *99*, 781–789.

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΕ ΑΠΟΜΟΝΩΜΕΝΟ ΝΗΣΙ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ. Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΓΩΝΙΩΝ ΚΛΙΣΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΥ

Κ. Χριστόπουλος[1*], Μ. Κωστόπουλος[1], Γ. Σπυρόπουλος[1], Ι.Κ. Καλδέλλης[1]

[1]Εργαστήριο Ήπιων Μορφών Ενέργειας & Προστασίας Περιβάλλοντος, Πα.Δ.Α.
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής
Τ.Θ. 41046, Αθήνα 12201, k.christop@uniwa.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην προτεινόμενη εργασία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα λεπτομερούς καταγραφής, μελέτης και σύγκρισης της ετήσιας ενεργειακής απόδοσης δύο φωτοβολταϊκών (Φ/Β) συστημάτων εγκατεστημένων στο απομονωμένο, μη διασυνδεδεμένο νησί της Τήλου. Τα δύο υπό μελέτη συστήματα είναι παρόμοιας τεχνολογίας και εγκαταστάθηκαν παράλληλα την άνοιξη του 2019 σε δύο κτήρια του νησιού, είναι διασυνδεδεμένα με το τοπικό ηλεκτρικό δίκτυο μέσω ενεργειακού συμψηφισμού (net metering), ενώ διαφοροποιούνται μεταξύ τους στις επιλεγμένες γωνίες κλίσης και προσανατολισμού των Φ/Β πλαισίων.

Το πρώτο σύστημα, ονομαστικής ισχύος περίπου 5kW$_p$, βρίσκεται εγκατεστημένο σε δώμα δημοτικού κτηρίου στον οικισμό Λιβάδια, πολύ κοντά στην ακτή και το δημοτικό παραλιακό πεζόδρομο του λιμανιού. Λόγω έντονων προβλημάτων σκίασης από παρακείμενα εμπόδια, αλλά και λαμβάνοντας υπόψιν την ελαχιστοποίηση της ενδεχόμενης οπτικής όχλησης, που θα μπορούσε να προκαλέσει λόγω θέσης η εγκατάσταση στο κέντρο του οικισμού, χρησιμοποιήθηκαν μικρή γωνία κλίσης και διαφορετικός προσανατολισμός από τον πλέον ενδεδειγμένο για εγκαταστάσεις στην εν λόγω περιοχή. Το αναμενόμενο αποτέλεσμα ήταν η μερική μείωση της συνολικής παραγωγής και κατά συνέπεια της εξερχόμενης προς το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Το δεύτερο προς σύγκριση σύστημα, με ονομαστική ισχύ περίπου 3,5kW$_p$, βρίσκεται στον παρακείμενο οικισμό Μεγάλο Χωριό, εγκατεστημένο σε οικιακό δώμα. Δεδομένου ότι στην περίπτωση αυτή δεν υπήρχαν αντίστοιχα προβλήματα και περιορισμοί τοποθέτησης, επιλέχθηκαν οι θεωρητικά βέλτιστες γωνίες κλίσης και προσανατολισμού, καθιστώντας τη συγκεκριμένη εγκατάσταση πρότυπη και κατάλληλη για συγκρίσεις με άλλες εγκαταστάσεις.

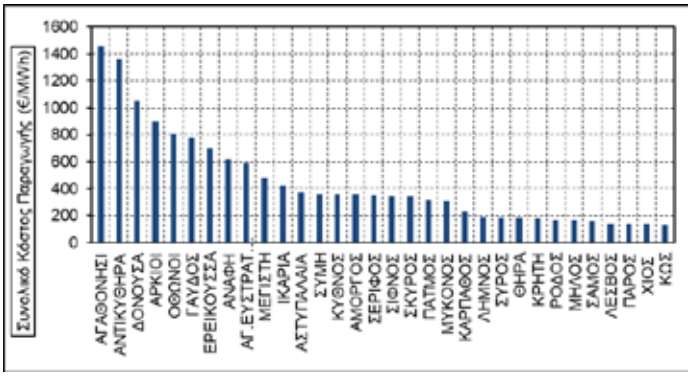
Η ενεργειακή σύγκριση πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας πραγματικά δεδομένα που περιγράφουν με 15-λεπτο και ωριαίο βήμα την παραγωγή των δύο εγκαταστάσεων για ένα ολόκληρο έτος λειτουργίας. Λόγω της διαφορετικής ονομαστικής εγκατεστημένης ισχύος των δύο συστημάτων, για την παραπάνω σύγκριση χρησιμοποιούνται ανηγμένες τιμές παραγωγής ενέργειας (kWh$_e$/kW$_p$). Υπό αυτό το πρίσμα, πραγματοποιείται λεπτομερής σύγκριση σε ημερήσιο, εβδομαδιαίο, μηνιαίο και ετήσιο επίπεδο, καλύπτοντας τις περιπτώσεις διαφοροποίησης της λειτουργίας των δύο Φ/Β συστημάτων στις διαδοχικές περιόδους του έτους.

Να τονισθεί ότι παρά τις διαφορές που καταγράφονται, η ενεργειακή παραγωγή και των δύο Φ/Β εγκαταστάσεων είναι ικανοποιητική ξεπερνώντας και τις αρχικά εκτιμώμενες τιμές. Ακολούθως, τα αποτελέσματα της συγκριτικής ενεργειακής συμπεριφοράς των εν λόγω Φ/Β εγκαταστάσεων, βασισμένα σε πραγματικές ετήσιες μετρήσεις, είναι ιδιαίτερα κατατοπιστικά επισημαίνοντας και το θεωρητικά υποστηριζόμενο σημαντικό ρόλο που παίζουν στις Φ/Β εγκαταστάσεις οι γωνίες κλίσης και προσανατολισμού. Επιπρόσθετα, γίνεται σαφές, ότι τα προβλήματα σκίασης και ενδεχόμενης οπτικής όχλησης, που είναι απαραίτητο να λαμβάνονται υπόψιν, είναι πιθανόν να έχουν σημαντική επίδραση στην απόδοση των εγκαταστάσεων. Τέλος, με βάση τα αποτελέσματα της σύγκρισης σε εποχιακό επίπεδο, ενισχύεται και με τη χρήση συστηματικών μετρήσεων η κατανόηση της διαφορετικής επίδρασης των γωνιών κλίσης και προσανατολισμού των Φ/Β στις διάφορες περιόδους του έτους.

Λέξεις Κλειδιά: *Σκίαση Πλαισίων, Συντελεστής Φορτίου, Net Metering, Αυτόνομο Νησιωτικό Δίκτυο*

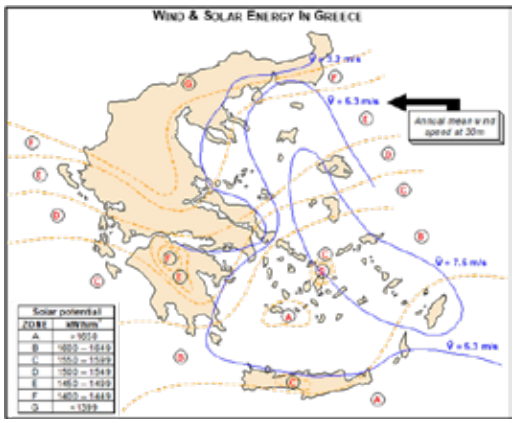
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η Ευρωπαϊκή πλευρά της ΝΑ Μεσογείου, γνωστή και ως Αιγαίο Πέλαγος, αποτελείται από έναν αξιοσημείωτο αριθμό απομακρυσμένων νησιών, τα οποία δεν είναι διασυνδεδεμένα (ΜΔΝ) με το σταθερό ηπειρωτικό ηλεκτρικό δίκτυο της Ελλάδας. Για την κάλυψη των αναγκών στα ΜΔΝ της εν λόγω ευρύτερης περιοχής η Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ) [1] χρησιμοποιεί πάνω από τριάντα αυτόνομους θερμικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (ΑΣΠ) [2]. Σύμφωνα και με τη Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ) [3] και το Διαχειριστή του Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΔΕΔΔΗΕ) [4], η ονομαστική ισχύς των σταθμών ποικίλει από 150kW έως αρκετά MW. Πιο συγκεκριμένα, 19 σταθμοί είναι μικρής κλίμακας και καλύπτουν ζήτηση έως και 10MW, 11 είναι εγκαταστάσεις μέσης κλίμακας της τάξης των 10 έως και 100MW, ενώ 2 μεγάλοι ΑΣΠ καλύπτουν ζήτησης ηλεκτρική ισχύος μεγαλύτερη από 100MW ο καθένας. Επειδή οι μονάδες αυτές για να λειτουργήσουν απαιτούν μεγάλες ποσότητες είτε ελαφρού (ντίζελ) είτε βαρέος (μαζούτ) πετρελαίου, το κόστος της παραγόμενης ενέργειας των θερμικών σταθμών αγγίζει σε αρκετές περιπτώσεις μικρών νησιών τα 1000€/MWh$_e$ (Εικόνα 1), ενώ μία μέση τιμή του κόστους βρίσκεται μεταξύ 250 και 300€/MWh$_e$, δηλαδή περίπου πενταπλάσια του αντίστοιχου κόστους στην Ηπειρωτική Ελλάδα [5].



Εικόνα 1: Κόστος ηλεκτροπαραγωγής στους ΑΣΠ του Αιγαίου Πελάγους, 2017

Από την άλλη μεριά, είναι γεγονός πως η μεγάλη πλειοψηφία των απομακρυσμένων νησιών του Αιγαίου χαρακτηρίζεται από πολύ υψηλό ηλιακό, αλλά και αξιοσημείωτο αιολικό δυναμικό. Σύμφωνα με μετρήσεις της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (ΕΜΥ) [6] του Κέντρου Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ) [7] και άλλων τοπικών υπηρεσιών, το σχετικό ηλιακό δυναμικό κυμαίνεται μεταξύ 1500 και 1850kWh/m^2 στο οριζόντιο επίπεδο, ενώ η μέση ταχύτητα του ανέμου βρίσκεται μεταξύ 7 και 9.5m/s (Εικόνα 2).



Εικόνα 2: Ηλιακό και αιολικό δυναμικό στην Ελλάδα [8]

Υπό αυτό το πρίσμα, είναι προφανές πως υπάρχει δυνατότητα αξιοποίησης σε μεγάλο βαθμό των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας των ΜΔΝ του Αιγαίου, που ως τώρα βασίζονται κυρίως στο πετρέλαιο, ιδιαίτερα με τη χρήση μικρών αιολικών και ηλιακών σταθμών παραγωγής. Παρόλα τα αποδεδειγμένα και δημοσιοποιημένα από πολλούς ερευνητές [9], [10], [11], [12], [13] τα τελευταία τριάντα χρόνια, οφέλη των ενεργειακών λύσεων που βασίζονται στην αξιοποίηση των ΑΠΕ, η συμμετοχή τους στο ενεργειακό μείγμα των ΜΔΝ παραμένει φτωχή, μη καταφέρνοντας να ξεπεράσει το ποσοστό του 20% τα τελευταία δέκα χρόνια. Επίσης, επισημαίνεται πως, με βάση στοιχεία του ΔΕΔΔΗΕ, η πλειοψηφία των εγκαταστάσεων ΑΠΕ αποτελούνται κυρίως από αιολικές εγκαταστάσεις, ενώ τα Φ/Β κατέχουν ένα μερίδιο της τάξης του 25% στη συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ στα ΜΔΝ [14].

Συνεπώς παρά τη σταθερή βελτίωση της ανταγωνιστικότητας των Φ/Β, η ανάπτυξη νέων Φ/Β εγκαταστάσεων είναι ακόμα περιορισμένη, κυρίως λόγω προβλημάτων σταθερότητας του τοπικού ηλεκτρικού δικτύου, όπως αναφέρεται σε σχετικές έρευνες [15], [16]. Τα τελευταία χρόνια βέβαια το ελληνικό κράτος εισήγαγε, με τον Ν. 4203/2013 που ολοκληρώθηκε το 2014 με σχετική υπουργική απόφαση, τη μέθοδο του ενεργειακού συμψηφισμού (Net Metering) στον τομέα των Φ/Β, λαμβάνοντας υπόψιν την ανάγκη για αναθέρμανση του ενδιαφέροντος της τοπικής αγοράς για Φ/Β εγκαταστάσεις. Με τη συγκριμένη αυτή μέθοδο, ο αυτοπαραγωγός έχει τη δυνατότητα να συμψηφίσει την ηλεκτρική κατανάλωσή του με την Φ/Β παραγωγή, χρησιμοποιώντας το δίκτυο ως αποθηκευτικό σύστημα [17]. Η διαθέσιμη παραγωγή ενέργειας καταναλώνεται απευθείας εφόσον υπάρχει ζήτηση, ενώ περνάει στο δίκτυο σε περίπτωση περίσσειας. Τέλος, αν η Φ/Β παραγωγή δεν επαρκεί για να καλύψει τη ζήτηση, ο αυτοπαραγωγός καταναλώνει ηλεκτρική ενέργεια από το τοπικό δίκτυο, ενώ το τελικό ισοζύγιο προκύπτει σε ετήσια βάση. Με το τρόπο αυτό, και με την ορθή διαστασιολόγηση του Φ/Β συστήματος, υπάρχει δυνατότητα πλήρους κάλυψης της ετήσιας ζήτησης ενός τυπικού καταναλωτή.

Στο πλαίσιο αυτό, το εργαστήριο Ήπιων Μορφών Ενέργειας & Προστασίας του Περιβάλλοντος (ΗΜΕ & ΠΡΟΠΕ) [18] εγκατέστησε για ερευνητικούς σκοπούς τον πρώτο ηλιακό σταθμό φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων στο ΜΔΝ της Τήλου, ο οποίος αποτελείται από ένα μικρό Φ/Β σταθμό και έναν σταθμό φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων με στόχο την προσφορά πράσινης και δωρεάν ενέργειας στην τοπική κοινωνία [8], [14]. Λόγω έντονων προβλημάτων σκίασης από παρακείμενα εμπόδια, αλλά και λαμβάνοντας υπόψιν την ελαχιστοποίηση της ενδεχόμενης οπτικής όχλησης, που θα μπορούσε να προκαλέσει λόγω θέσης η εγκατάσταση στο κέντρο του οικισμού, χρησιμοποιήθηκαν μικρότερη της βέλτιστης γωνία κλίσης και διαφορετικός προσανατολισμός από τον πλέον ενδεδειγμένο για εγκαταστάσεις στην εν λόγω περιοχή. Το αναμενόμενο αποτέλεσμα ήταν η μερική μείωση της συνολικής παραγωγής και κατά συνέπεια της εξερχόμενης προς το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Για το λόγο αυτό, στην παρούσα εργασία γίνεται προσπάθεια καταγραφής των ενεργειακών αυτών απωλειών σε σχέση με την περίπτωση όπου το σύστημα ήταν τοποθετημένο σε βέλτιστες γωνίες κλίσης και προσανατολισμού. Η μελέτη αυτή επιτυγχάνεται μέσω καταγραφής και σύγκρισης πραγματικών δεδομένων παραγωγής του εν λόγω συστήματος με ένα δεύτερο Φ/Β σύστημα παρόμοιας τεχνολογίας στο οποίο έχουν επιλεχθεί βέλτιστες γωνίες, καθιστώντας σαφές, ότι τα προβλήματα σκίασης και ενδεχόμενης οπτικής όχλησης, που είναι απαραίτητο να λαμβάνονται υπόψιν, είναι πιθανόν να έχουν σημαντική επίδραση στην απόδοση των εγκαταστάσεων.

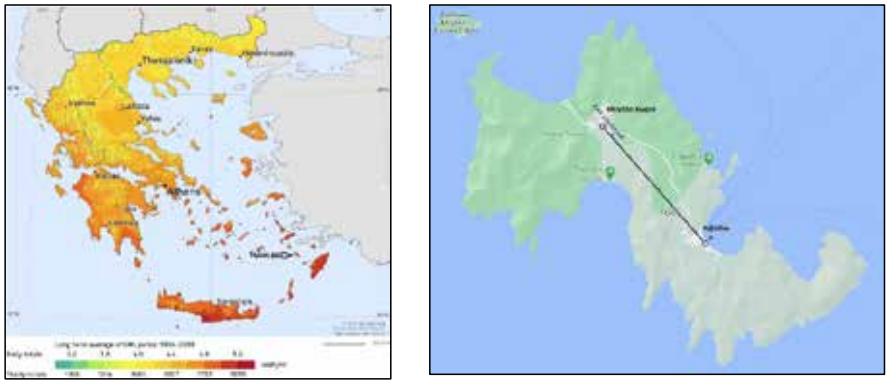
2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η παραπάνω σύγκριση πραγματοποιείται βασιζόμενη στην ετήσια καταγραφή της λειτουργίας των δύο Φ/Β συστημάτων με αναγωγή των αποτελεσμάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ως προς την ονομαστική ισχύ του κάθε συστήματος (kWh_e/kW_p). Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται τα μεγέθη της ανηγμένης παραγωγής ενέργειας ($E_{specif.}$) και του συντελεστή φορτίου (Capacity Factor, CF) των εγκαταστάσεων. Με βάση τα διαθέσιμα αποτελέσματα της σύγκρισης ανά εποχή του έτους, ενισχύεται η κατανόηση της διαφορετικής επίδρασης των γωνιών κλίσης και προσανατολισμού των Φ/Β στις διάφορες περιόδους του έτους.

2.1. Τοποθεσία εγκαταστάσεων

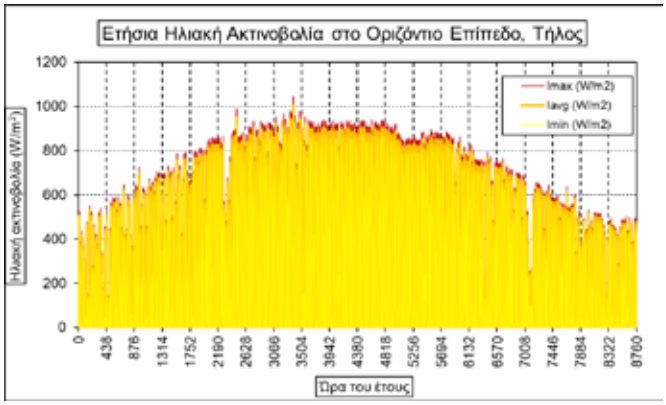
Το νησιωτικό σύμπλεγμα των Δωδεκανήσων βρίσκεται στη ΝΑ Μεσόγειο και όπως όλα τα νησιά του Αιγαίου Πελάγους παρουσιάζει υψηλό ηλιακό δυναμικό. Ένα από τα πιο απομακρυσμένα νησιά του συμπλέγματος, ευρισκόμενο στα ΒΑ της Ρόδου (Εικόνα 3α) είναι η Τήλος, στην οποία βρίσκονται εγκατεστημένα εδώ και δύο χρόνια τα υπό μελέτη Φ/Β συστήματα. Το πρώτο σύστημα που βρίσκεται στον οικισμό Λιβάδια, αποτελεί δωρεά του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής (ΠαΔΑ) [19] προς το Δήμο Τήλου [20], ενώ η μελέτη και εγκατάστασή του πραγματοποιήθηκε από το προσωπικό του εργαστηρίου

ΗΜΕ & ΠΡΟΠΕ στα πλαίσια της διαχρονικής ερευνητικής μελέτης του εργαστηρίου στην περιοχή [21]. Το δεύτερο σύστημα, έχει εγκατασταθεί, με το σχεδιασμό και την επίβλεψη του Εργαστηρίου, την ίδια χρονική περίοδο σε οικιακό δώμα, περίπου 5 χλμ. ΒΔ, στα όρια του οικισμού Μεγάλο Χωριό, που βρίσκεται σε σχετικά ίδιο υψόμετρο με τον οικισμό Λιβάδια (Εικόνα 3β).



Εικόνα 3α: Το νησί της Τήλου στο χάρτη της Ελλάδας, μαζί με την ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο στην ευρύτερη περιοχή [22]. Εικόνα 3β: Οι τοποθεσίες των υπό μελέτη εγκαταστάσεων στο νησί της Τήλου [23].

Λαμβάνοντας υπόψιν τις μακροχρόνιες μετρήσεις της ηλιακής ακτινοβολίας (Εικόνα 4) στην περιοχή εκ μέρους του εργαστηρίου ΗΜΕ & ΠΡΟΠΕ το ετήσιο ηλιακό δυναμικό σε οριζόντιο επίπεδο είναι σχεδόν 1750kWh/m^2, στοιχείο που επιβεβαιώνεται και από τα δεδομένα της Εικόνας 3α.



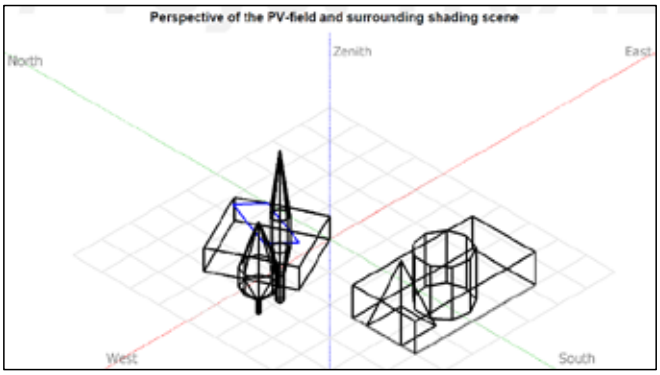
Εικόνα 4: Δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας στο νησί της Τήλου

2.2. Περιγραφή εγκαταστάσεων

Όπως προαναφέρθηκε, τα δύο υπό μελέτη συστήματα βασίζονται σε παρόμοιας τεχνολογίας Φ/Β πλαίσια και εγκαταστάθηκαν παράλληλα την άνοιξη του 2019, οπότε και είναι διασυνδεδεμένα με το τοπικό ηλεκτρικό δίκτυο μέσω ενεργειακού συμψηφισμού (Net Metering). Στο σύστημα των Λιβαδιών, η εγκατάσταση έγινε σε δώμα δημοτικού κτηρίου, κοντά στην ακτή και το δημοτικό παραλιακό πεζόδρομο του λιμανιού του νησιού, Εικόνα 5. Ο σταθμός, αποτελείται από 17 Φ/Β πλαίσια των 290W$_p$, ονομαστικού βαθμού απόδοσης 17.72% (σε STC) [24], παρέχοντας τελικά συνολική ονομαστική ισχύ 4.93kW$_p$. Οι επιλεγμένες γωνίες κλίσεως και αζιμούθιου είναι στις 15^0 και -70^0 (ΑΝΑ) αντίστοιχα, εξ' αιτίας των προβλημάτων σκίασης και προς αποφυγή ενδεχόμενης οπτικής όχλησης, όπως αναφέρεται και σε πρόσφατη έρευνα [14]. Αξίζει να αναφερθεί πως οι παραπάνω γωνίες επιλέχθηκαν κατόπιν θεωρητικής διερεύνησης της αναμενόμενης παραγωγής για διάφορες γωνίες κλίσης και

προσανατολισμού με την βοήθεια υπολογιστικού κώδικα του Εργαστηρίου [25] σε σύγκριση και με εμπορικά διαθέσιμα λογισμικά [26], [27], λαμβάνοντας πάντα υπόψιν την ελαχιστοποίηση της οπτικής όχλησης καθώς και τον περιορισμό της σκίασης από παρακείμενα εμπόδια (Εικόνα 6). Είναι τέλος απαραίτητο να επισημανθεί ότι ο αριθμός των εγκατεστημένων πλαισίων είναι ο μέγιστος δυνατός, λόγω του περιορισμένου διαθέσιμου χώρου στο δώμα του κτηρίου.

Εικόνα 5: Εγκατεστημένα Φ/Β Συστήματα (α) στα Λιβάδια και (β) στο Μεγάλο Χωριό της Τήλου



Εικόνα 6: Προοπτική του χώρου εγκατάστασης στα Λιβάδια και των παρακείμενων εμποδίων [27]

Το δεύτερο προς σύγκριση σύστημα, βρίσκεται στον οικισμό του Μεγάλου Χωριού, εγκατεστημένο σε οικιακό δώμα, Εικόνα 5. Αποτελείται από 12 Φ/Β πλαίσια [28] των 280W_p, σχεδόν ίδιας τεχνολογίας και ονομαστικού βαθμού απόδοσης (17,11%), με συνολική ονομαστική ισχύ 3.36kW_p. Κατά την εγκατάσταση επιλέχθηκαν οι θεωρητικά βέλτιστες γωνίες κλίσης και προσανατολισμού, καθιστώντας τη συγκεκριμένη εγκατάσταση πρότυπη και κατάλληλη για συγκρίσεις με άλλες εγκαταστάσεις.

Και τα δύο Φ/Β συστήματα αποτελούνται από μία σειρά (string) των 17 και 12 Φ/Β πλαισίων αντίστοιχα, ενώ η ενέργεια εγχέεται προς ιδιοκατανάλωση ή προς το τοπικό δίκτυο μέσω εμπορικών μονοφασικών αντιστροφέων τάσης της ίδιας εταιρίας και παρόμοιας τεχνολογίας [29], [30], με ονομαστική ισχύ 5.0 και 3.6 kW αντίστοιχα. Είναι απαραίτητο να αναφερθεί πως οι αντίστοιχοι βαθμοί απόδοσης των αντιστροφέων λόγω των συνθηκών λειτουργίας τους είναι ουσιαστικά συγκρίσιμοι (97.0% και 98.4% αντίστοιχα), οπότε σε συνδυασμό τους με τα Φ/Β πλαίσια, δίνουν τελικά ίδια αποτελέσματα σε επίπεδο ολικού βαθμού απόδοσης, κάνοντας έτσι πιο αντιπροσωπευτική τη σύγκριση των δύο εγκαταστάσεων. Τέλος, οι κατασκευαστές των αντιστροφέων παρέχουν ειδικό λογισμικό που καταγράφει την εξερχόμενη ισχύ σε 15-λεπτο, ωριαίο, ημερήσιο και ετήσιο βήμα.

2.3. Μέθοδος σύγκρισης

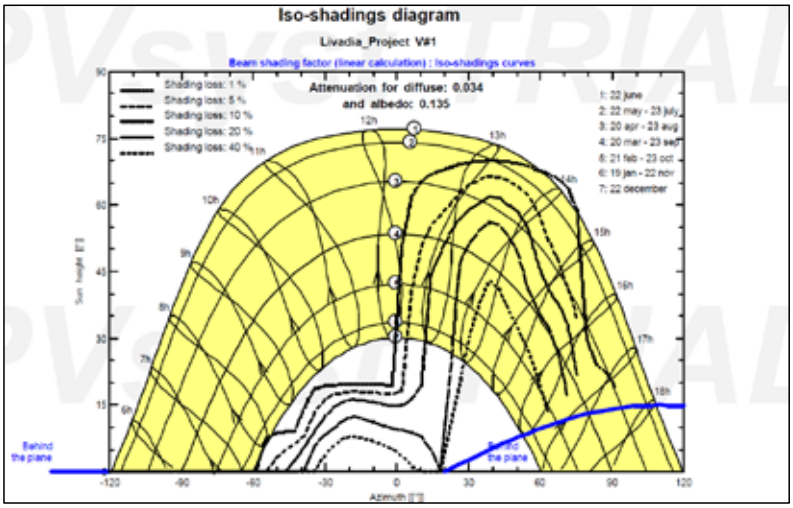
Όπως ειπώθηκε παραπάνω, τα δύο συστήματα, λόγω διαφορετικής ονομαστικής ισχύος, θα πρέπει να συγκριθούν με βάση την ανηγμένη ενεργειακή παραγωγή $E_{specif.}$ που εκφράζει την παραγωγή ενέργειας ανά εγκατεστημένη μονάδα ισχύος (kWh_e/kW_p) μιας εγκατάστασης σε καθορισμένο (κοινό) χρονικό διάστημα και προκύπτει από το πηλίκο της πραγματικής παραγωγής E_i (kWh_e) στο διάστημα αυτό προς την ονομαστική ισχύ $P_{nominal}$ (kW_p) της εγκατάστασης:

$$E_{specif.,i} = \frac{E_i}{P_{nominal}} \qquad (1)$$

Αντίστοιχα, ο συντελεστής φορτίου «CF» μίας Φ/Β εγκατάστασης ορίζεται ως ο λόγος της πραγματικής ενεργειακής παραγωγής E_i (kWh) σε ορισμένο χρονικό διάστημα Δt (h), προς την αντίστοιχη μέγιστη θεωρητική ενεργειακή παραγωγή στο διάστημα αυτό, η οποία είναι ίση με την ονομαστική ισχύ $P_{nominal}$ (kW_p) επί το χρονικό διάστημα μελέτης. Ο συντελεστής φορτίου, αποτελεί έναν αντιπροσωπευτικό συντελεστή αξιοποίησης της εγκατάστασης σε δεδομένο χρονικό ορίζοντα.

$$CF = \frac{E_i}{P_{nominal} \cdot \Delta t} \qquad (2)$$

Στο διάγραμμα σκίασης της Εικόνας 7 παρατηρούμε την εποχιακή μεταβολή της σκίασης όπως προέκυψε και από τη χωροθέτηση της Εικόνας 6 για το σύστημα των Λιβαδιών. Είναι προφανές πως εκτός των απωλειών λόγω των μη βέλτιστων γωνιών των πλαισίων, θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν και οι απώλειες σκίασης που υπάρχουν, κυρίως κατά τη φθινοπωρινή και χειμερινή περίοδο.



Εικόνα 7: Διάγραμμα σκίασης εγκατάστασης Λιβαδιών [26].

Με βάση τα παραπάνω, η σύγκριση θα γίνει σε διάφορες χρονικά περιόδους. Αρχικά εξετάζεται η συμπεριφορά των δύο εγκαταστάσεων κατά τη διάρκεια ενός έτους λειτουργίας σε πραγματικές τιμές παραγωγής ενέργειας, από το Μάρτιο του 2019 έως και το Φεβρουάριο του 2020. Στη συνέχεια, με τη βοήθεια των σχέσεων (1) και (2) πραγματοποιείται σύγκριση αποτελεσμάτων σε ανηγμένα μεγέθη, διαδικασία που θα καταδείξει την «αρνητική» επίδραση των μη βέλτιστων γωνιών κλίσης και προσανατολισμού του συστήματος των Λιβαδιών στην παραγόμενη ενέργεια, σε σχέση πάντα με τις αντίστοιχες μετρήσεις της Φ/Β εγκατάστασης στο Μεγάλο Χωριό. Για το σκοπό αυτό θα χρησιμοποιηθούν ετήσια, μηνιαία και ημερήσια προφίλ παραγωγής, ενώ θα δοθεί ιδιαίτερη προσοχή ώστε να προκύψει ο διαχωρισμός των επιδράσεων αυτών ανάλογα με το βαθμό συμμετοχής τους, ώστε να προκύψει η επίδραση των μη βέλτιστων γωνιών στην απόδοση του συστήματος στα Λιβάδια.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

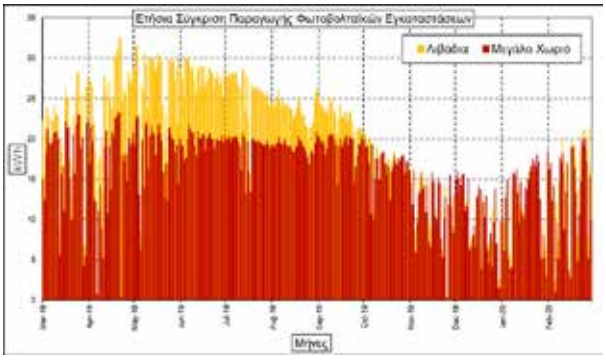
Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επεξεργασία των δεδομένων των δύο εγκαταστάσεων. Αναλυτικότερα, παρουσιάζεται η ενεργειακή συμπεριφορά τους για κάθε μήνα του έτους σε επίπεδο πραγματικής παραγωγής «E_i» σε (kWh_e), ανηγμένης παραγωγής «$E_{specif.,i}$» σε (kWh_e/kW_p), καθώς και συντελεστή φορτίου «CF». Από τον πίνακα προκύπτει αρχικά πως ο αποδοτικότερος μήνας και για τις δύο εγκαταστάσεις ήταν ο Ιούνιος, όπου μεγιστοποιούνται τα μεγέθη της μηνιαίας ανηγμένης παραγωγής στα επίπεδα του 169.5 kWh_e/kW_p για τα Λιβάδια και 176.8 kWh_e/kW_p για το Μεγάλο Χωριό, και του συντελεστή φορτίου σε επίπεδα 23.5% και 24.6% αντίστοιχα.

Πίνακας 1: Σύγκριση λειτουργίας μηνιαίων τιμών ενεργειακής παραγωγής, ανηγμένης ενεργειακής παραγωγής και συντελεστή φορτίου

Μήνας	***Παραγωγή (E_i) (kWh_e)***		***Ανηγμένη Παραγωγή ($E_{specif.,\ i}$) (kWh_e/kW_p)***		***Συντελεστής Φορτίου (CF) (%)***	
Εγκατάσταση (kW_p)	**Λιβάδια (4.97)**	**Μ. Χωριό (3.36)**	**Λιβάδια (4.97)**	**Μ. Χωριό (3.36)**	**Λιβάδια (4.97)**	**Μ. Χωριό (3.36)**
Μάρτιος '19	647	542	131.2	161.4	17.6%	21.7%
Απρίλιος '19	715	522	145.1	155.2	20.2%	21.6%
Μάϊος '19	837	572	169.7	170.2	22.8%	22.9%
Ιούνιος '19	**836**	**594**	**169.5**	**176.8**	**23.5%**	**24.6%**
Ιούλιος '19	804	591	163.1	176.0	21.9%	23.7%
Αύγουστος '19	735	593	149.0	176.4	20.0%	23.7%
Σεπτέμβριος '19	679	576	137.7	171.5	19.1%	23.8%
Οκτώβριος '19	544	517	110.4	153.8	14.8%	20.7%
Νοέμβριος '19	352	344	71.4	102.5	9.9%	14.2%
Δεκέμβριος '19	306	312	62.0	92.9	8.3%	12.5%
Ιανουάριος '20	355	379	72.0	112.8	9.7%	15.2%
Φεβρουάριος '20	432	378	87.5	112.6	12.6%	16.2%
Σύνολο (1 έτος):	**7264**	**5920**	**1473.5**	**1762.1**	**-**	**-**
Μέση τιμή:	605	493	**122.8**	**146.8**	**16.7%**	**20.1%**

3.1. Σύγκριση πραγματικής ενεργειακής παραγωγής εγκαταστάσεων

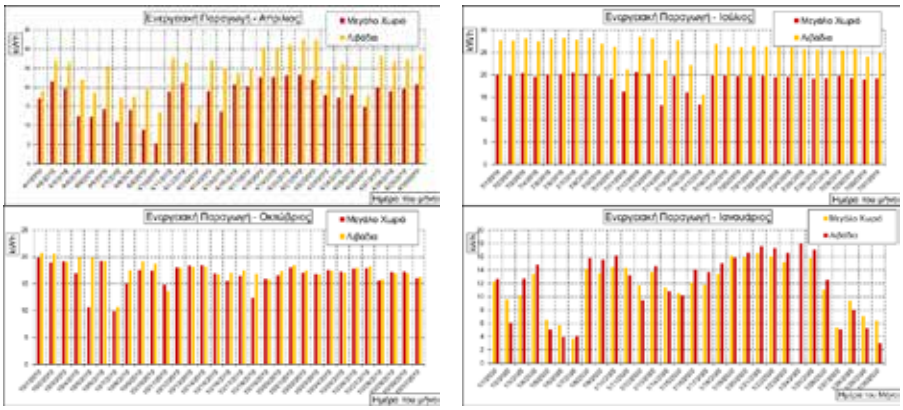
Αξιοποιώντας τις πειραματικές μετρήσεις των δύο εγκαταστάσεων στον Πίνακα 1 παρουσιάζεται η συνολική μηνιαία ενεργειακή παραγωγή σε (kWh_e), όπου η υπεροχή του μεγαλύτερου Φ/Β συστήματος σε απόλυτες τιμές είναι σαφής. Αντίστοιχα, η συνολική ετήσια παραχθείσα ενέργεια της εγκατάστασης των Λιβαδιών ήταν λίγο μεγαλύτερη από 7.2MWh_e, ενώ για το ίδιο χρονικό διάστημα η μικρότερη εγκατάσταση στο Μεγάλο Χωριό προσεγγίζει τις 6MWh_e. Από την άλλη πλευρά όμως, η υπεροχή αυτή στην ενεργειακή παραγωγή είναι δυσανάλογη της αντίστοιχης ονομαστικής ισχύος. Η αναντιστοιχία αυτή προκύπτει αν παρατηρήσει κανείς τη διαφορά στις μέσες τιμές των μεγεθών $E_{specif.,\ i}$ και CF, όπου φαίνεται καθαρά ότι καθ' όλη τη διάρκεια του έτους το σύστημα του Μεγάλου Χωριού ($E_{specif.month_av,\ M.Ch.}$ =146.8 kWh_e/kW_p, CF=20.1%) λειτουργούσε αποδοτικότερα σε σχέση με την εγκατάσταση των Λιβαδιών ($E_{specif.month_av,\ Liv.}$ =122.8 kWh_e/kW_p, CF=16.7%), γεγονός που θα αναλυθεί και στη συνέχεια.



Εικόνα 8: Ημερήσια ενεργειακή παραγωγή (kWh_e) ενός έτους των δύο Φ/Β εγκαταστάσεων

Κατά συνέπεια, με την ίδια λογική στην Εικόνα 8 είναι ευδιάκριτη η διαφορά στην εγκατεστημένη ονομαστική ισχύ μεταξύ των δύο Φ/Β συστημάτων. Το συγκεκριμένο διάγραμμα περιγράφει την ετήσια σύγκριση της ενεργειακής παραγωγής των δύο εγκαταστάσεων και αφορά την ημερήσια παραγωγή στο διάστημα του υπό μελέτη έτους, κατά τη διάρκεια του οποίου η εγκατάσταση των 4.93kW_p (Λιβάδια) φαίνεται να υπερτερεί όπως είναι φυσικό σε επίπεδο παραγωγής. Ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια της εαρινής και θερινής περιόδου διακρίνεται ξεκάθαρα η ιδιαίτερα αυξημένη ενεργειακή παραγωγή του συστήματος,

η οποία μειώνεται σημαντικά στη φθινοπωρινή και χειμερινή περίοδο του έτους. Αντιθέτως, το σύστημα των 3.36kW$_p$, αν και εμφανίζει αντίστοιχα αυξημένη παραγωγή την εαρινή και θερινή περίοδο, παρουσιάζει σαφώς μια πιο ομαλή μετάβαση μεταξύ των διαφορετικών εποχών του έτους. Ειδικότερα κατά τη διάρκεια της φθινοπωρινής και χειμερινής περιόδου η παραγωγικότητα της μικρότερης εγκατάστασης ελαττώνεται σαφώς λιγότερο από την αντίστοιχη του μεγαλύτερου συστήματος, παρά την κατά σχεδόν 1.5 kW$_p$ μικρότερη εγκατεστημένη ισχύ. Πράγματι εάν κάποιος παρατηρήσει τις τιμές παραγωγής του Πίνακα 1, θα δει ότι κατά τους μήνες Νοέμβριο, Δεκέμβριο και Ιανουάριο οι μηνιαίες παραγωγές των δύο Φ/Β συστημάτων σχεδόν εξισώνονται. Για την καλύτερη αποτύπωση της σύγκρισης στην Εικόνα 9 παρατίθενται ενδεικτικοί μήνες για κάθε εποχή του έτους.



Εικόνα 9: Μηνιαία ενεργειακή παραγωγή (kWh$_e$) ενός έτους των δύο Φ/Β εγκαταστάσεων

Πιο συγκεκριμένα, στην Εικόνα 9 μπορεί κάποιος να διαπιστώσει την εποχιακή επίδραση που έχει στην ενεργειακή παραγωγή η μη βέλτιστη κλίση των φωτοβολταϊκών της εγκατάσταση των Λιβαδιών, καθώς τους μήνες Απρίλιο και Ιούλιο όπου το ηλιακό ύψος είναι ακόμα μεγάλο, δηλαδή μεταξύ 54^0 και 78^0 για περιοχές με γεωγραφικά πλάτη ίσα με αυτά της Τήλου [31], υπερτερεί (λόγω μεγέθους) έναντι της μικρότερης εγκατάστασης. Αντιθέτως, κατά τους ενδεικτικούς μήνες της φθινοπωρινής και χειμερινής περιόδου, όπου το ηλιακό ύψος μειώνεται μεταξύ 30^0 και 54^0, παρατηρείται ότι η ενέργεια που παράγεται από τις δύο εγκαταστάσεις είναι σε συγκρίσιμα επίπεδα παρά τη διαφορά τους σε εγκατεστημένη ονομαστική ισχύ, γεγονός που επιβεβαιώνουν και οι μετρήσεις του Πίνακα 1.

3.2. Σύγκριση ανηγμένης ενεργειακής παραγωγής και συντελεστή φορτίου εγκαταστάσεων

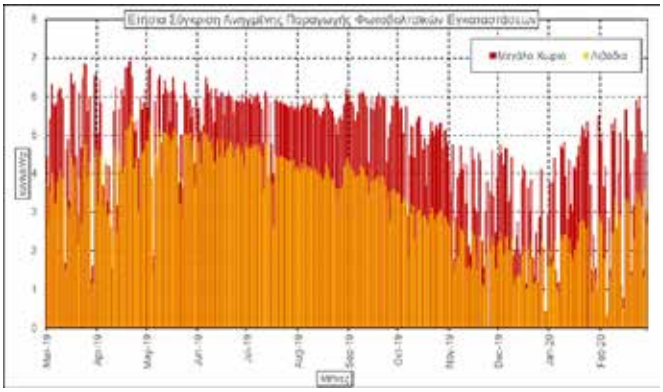
Χρησιμοποιώντας τα αντίστοιχα διαγράμματα που αφορούν στην ανηγμένη παραγωγή ενέργειας των δύο συστημάτων, όπως αυτά προέκυψαν από την επεξεργασία των μετρήσεων, τα αποτελέσματα που προκύπτουν σχετικά με την ενεργειακή τους συμπεριφορά επιβεβαιώνουν και πειραματικά τη σημασία της χρησιμοποίησης βέλτιστων γωνιών κλίσης και προσανατολισμού στις Φ/Β εγκαταστάσεις. Πιο συγκεκριμένα, από την ανάλυση των δύο διανομών της Εικόνας 10 προκύπτει σαφώς ότι καθ' όλη την διάρκεια του έτους η εγκατάσταση του Μεγάλου Χωριού λειτουργεί αποδοτικότερα αναφορικά με την ανηγμένη ενεργειακή παραγωγή.

Από τα στοιχεία του Πίνακα 1 προκύπτει ότι η ετήσια ανηγμένη παραγωγή ανά εγκατεστημένο kW$_p$ είναι ίση με 1762 kWh$_e$/kW$_p$ ($E_{specif.,annual_M.Ch.}$) για την Φ/Β εγκατάσταση των 3.36kW$_p$, ενώ την ίδια χρονική περίοδο η εγκατάσταση των 4.93kW$_p$ παρήγαγε 1474 kWh$_e$/kW$_p$ ($E_{specif.,annual_Liv.}$). Η διαφορά αυτή αποδίδεται αφενός σε απώλειες λόγω σκίασης ($\Delta E_{specif.,shading}$), αφετέρου στη μη βέλτιστη κλίση και προσανατολισμό της εγκατάστασης των Λιβαδίων ($\Delta E_{specif.,\ tilt\&azimuth}$). Αντίστοιχα, η ποσοστιαία διαφορά προκύπτει ως προς την ανηγμένη παραγωγή του Μεγάλου Χωριού ($E_{specif.,annual_M.Ch.}$) ως:

$$\Delta E_{specif.,annual} = \Delta E_{specif.shading} + \Delta E_{specif.tilt\&azimuth} = \frac{E_{specif.,annual_M.Ch.} - E_{specif.,annual_Liv.}}{E_{specif.,annual_M.Ch.}} = 16.4\% \quad (3)$$

Αξιοποιώντας το διάγραμμα σκίασης που απεικονίζεται στην Εικόνα 7, είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι η σκίαση των Φ/Β πλαισίων στα Λιβάδια ξεκινάει ανεξαρτήτως εποχής μετά τις 12:00μ.μ και ιδιαίτερα τους χειμερινούς μήνες συνεχίζει να επιβαρύνει την παραγωγή έως και τη δύση του ήλιου. Για την

ακρίβεια, η σκίαση επιβαρύνει την ενεργειακή παραγωγή των πλαισίων μέχρι ο ήλιος να πάρει θέση πίσω από ένα μικρό ύψωμα που βρίσκεται ΔΒΔ της θέσης εγκατάστασης.



Εικόνα 10: Ανηγμένη ημερήσια ενεργειακή παραγωγή (kWh_e/kW_p) ενός έτους των δύο Φ/Β εγκαταστάσεων

Οι απώλειες σκίασης ως ποσοστό ενέργειας που δεν παράχθηκε κατά τη διάρκεια του έτους εκτιμάται, σύμφωνα με υφιστάμενο λογισμικό [27] που χρησιμοποιήθηκε, στο σύνολό τους (δηλαδή ως έλλειμα ακτινοβολίας, ηλεκτρικών αστοχιών και σκίαση ορίζοντα) περίπου ίσο με 6%. Συνεπώς, σύμφωνα με την εξίσωση (3), υπολείπεται ένα έλλειμα ενέργειας της τάξης του 10%, που αφορά την επίδραση της μη βέλτιστης γωνίας κλίσης και προσανατολισμού. Σύμφωνα πάντα με τα αποτελέσματα της θεωρητικής ανάλυσης τα κέρδη λόγω κλίσης 15^0 για το σύστημα των Λιβαδιών σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο είναι 1.8%, τη στιγμή που το αντίστοιχο ποσοστό στο σύστημα του Μεγάλου Χωριού (για κλίση 30^0) είναι 9.9%. Η διαφορά αυτή οδηγεί σε μια πρώτη εκτίμηση των απωλειών λόγω κλίσης $\Delta E_{specif.,tilt}$ της τάξης του 8% του Φ/Β συστήματος στα Λιβάδια σε σχέση με το αντίστοιχο στο Μεγάλο Χωριό. Βάσει των ανωτέρω μπορεί κανείς να καταλήξει στην εκτίμηση ότι το μέγεθος $\Delta E_{specif.,tilt\&azimuth}$ διαχωρίζεται σε απώλειες κλίσης $\Delta E_{specif.,tilt}$ ίσες με περίπου 8% και απώλειες προσανατολισμού ίσες με 2.3% βάσει της εξίσωσης (4) που ακολουθεί:

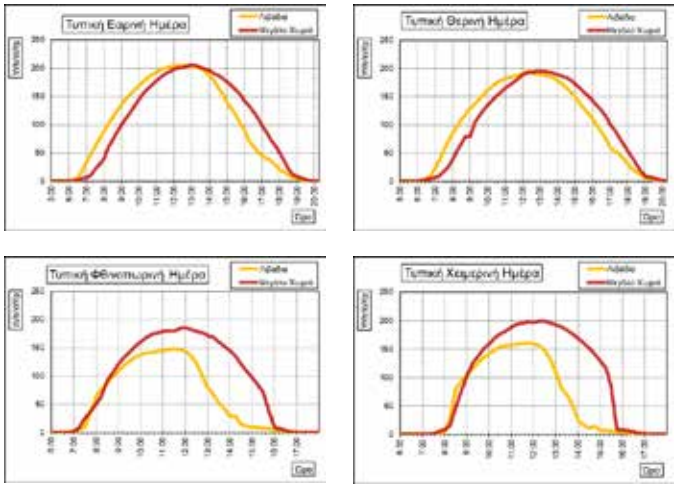
$$\Delta E_{specif.azimuth} = \Delta E_{specif.tilt\&azimuth} - \Delta E_{specif.tilt} = 2.3\% \qquad (4)$$

Στη συνέχεια, αξιοποιώντας τις εκτεταμένες μετρήσεις που συλλέχθηκαν από τα δύο συστήματα, γίνεται μια προσπάθεια εντοπισμού και κατανόησης των διαφορών αυτών αναλύοντας την ημερήσια ανηγμένη παραγωγή των δύο Φ/Β συστημάτων για επιλεγμένες ημέρες μέσα στο έτος, με σκοπό την κατά το δυνατόν κάλυψη όλων των εποχών. Έτσι στην Εικόνα 11 έχουν επιλεγεί 4 ημέρες, καθεμία από τις οποίες έχει οριστεί ως τυπική για κάθε εποχή, με βασικό κριτήριο επιλογής τους την πλήρη ηλιοφάνεια.

Ξεκινώντας από τη θερινή ημέρα, σε γενικές γραμμές οι δύο εγκαταστάσεις εμφανίζουν την ίδια ημερήσια ανηγμένη παραγωγή σύμφωνα με το σχήμα, καθώς δεν καταγράφεται επίδραση σκίασης, ενώ απουσιάζει και οποιαδήποτε διαφορά παραγωγής λόγω διαφορετικής κλίσης των πλαισίων. Συνεπώς, η μόνη διαφορά που καταγράφεται κατά τη λειτουργία των δύο Φ/Β εγκαταστάσεων οφείλεται στο γεγονός ότι η εγκατάσταση των Λιβαδιών, που είναι στραμμένη 70^0 πιο ανατολικά σε σχέση με την άλλη, λειτουργεί αποδοτικότερα τις πρωινές ώρες, χάνοντας όμως αντίστοιχη παραγωγή ενέργειας τις απογευματινές ώρες. Προκύπτει λοιπόν ότι το ισοζύγιο «πρωινά κέρδη – απογευματινές απώλειες» σε μία τυπική θερινή ημέρα μεταξύ των δύο εγκαταστάσεων είναι πρακτικά μηδενικό. Παρόμοια παρουσιάζεται η κατάσταση και κατά τη διάρκεια της τυπικής εαρινής ημέρας. Στο αντίστοιχο διάγραμμα της Εικόνας 11, παρατηρείται μία μικρή αύξηση των απωλειών λόγω σκίασης και προσανατολισμού τις απογευματινές ώρες για τη Φ/Β εγκατάσταση στα Λιβάδια, τη στιγμή που κατά τις πρωινές ώρες εμφανίζεται μια παρόμοια διαφοροποίηση με τη θερινή περίοδο. Η γενική εικόνα σύγκρισης των δύο εγκαταστάσεων αναφορικά με την ενεργειακή τους συμπεριφορά για άνοιξη και καλοκαίρι παραμένει σχετικά ίδια [32].

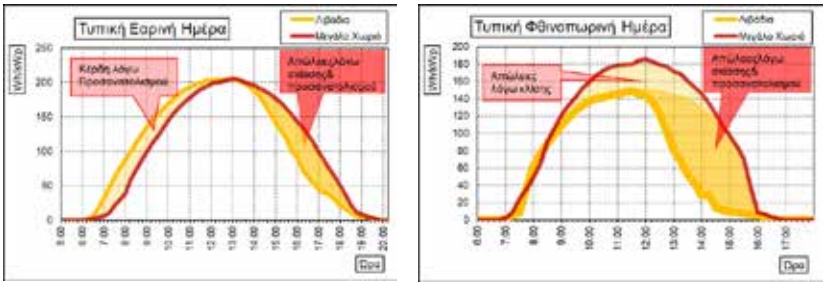
Αντιθέτως, δεν καταγράφεται το ίδιο στα δύο διαγράμματα που αφορούν τη χειμερινή και τη φθινοπωρινή ημέρα. Είναι προφανές πως κατά τη συγκεκριμένη περίοδο οι απώλειες του Φ/Β συστήματος των Λιβαδιών αυξάνονται. Να σημειωθεί ότι επιλέχθηκε φθινοπωρινή ημέρα χαμηλότερης ηλιοφάνειας από την αντίστοιχη χειμερινή στην προσπάθεια να χρησιμοποιηθούν μετρήσεις ημερών με

πλήρη ηλιοφάνεια. Πιο συγκεκριμένα, και στα δύο σχήματα φθινοπωρινής και χειμερινής τυπικής ημέρας παρατηρείται μείωση των ενεργειακών κερδών λόγω του κατά 70^0 ανατολικού προσανατολισμού των Φ/Β πλαισίων στα Λιβάδια, αν και οι καμπύλες που αντιπροσωπεύουν τις λειτουργίες των δύο εγκαταστάσεων συμβαδίζουν τις πρώτες ώρες, δηλαδή μέχρι τις 9:00 π.μ.



Εικόνα 11: Τυπικές ημέρες σύγκρισης των δύο Φ/Β εγκαταστάσεων

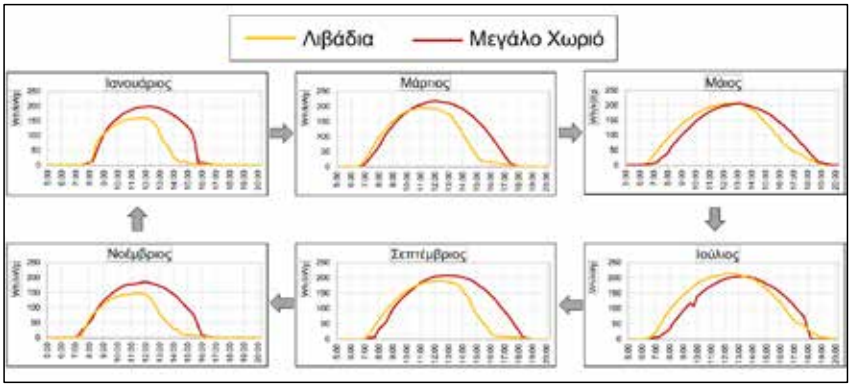
Στη συνέχεια, παρουσιάζεται αρκετά μεγάλη απόκλιση της ανηγμένης ενεργειακής παραγωγής των δύο εγκαταστάσεων από τις 9:00 έως τις 12:00 περίπου. Η απόκλιση αυτή αποδίδεται στη μη βέλτιστη κλίση των Φ/Β πλαισίων στα Λιβάδια, με αποτέλεσμα τη μειωμένη ενεργειακή παραγωγή το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα για το φθινόπωρο και το χειμώνα. Επίσης, επειδή όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, σύμφωνα με το διάγραμμα σκίασης της Εικόνας 7, η σκίαση αρχίζει να είναι εμφανής στο συγκεκριμένο σύστημα μετά τις μεσημεριανές ώρες, είναι λογικό η έντονη μείωση των καμπυλών παραγωγής τις μεσημεριανές και απογευματινές ώρες για την εγκατάσταση στα Λιβάδια να αποδίδεται κατά ένα ποσοστό στο συγκριμένο παράγοντα. Σε συνδυασμό μάλιστα με τον προσανατολισμό των Φ/Β πλαισίων στη συγκεκριμένη εγκατάσταση, η πτώση της ενεργειακής παραγωγής εντείνεται, με τα αποτελέσματα να είναι εμφανή τις μετα-μεσημεριανές και απογευματινές ώρες. Οι εν λόγω διαφοροποιήσεις στην ενεργειακή συμπεριφορά των δύο Φ/Β συστημάτων, έχουν αποδοθεί και σχηματικά στα δύο διαγράμματα της Εικόνας 12, όπου για πλήρη κατανόηση περιλαμβάνονται τα αποτελέσματα για τις δύο τυπικές ημέρες Φθινοπώρου και Άνοιξης.



Εικόνα 12: Απώλειες λόγω μη βέλτιστων γωνιών κλίσης & προσανατολισμού και απώλειες σκίασης στις δύο Φ/Β εγκαταστάσεις.

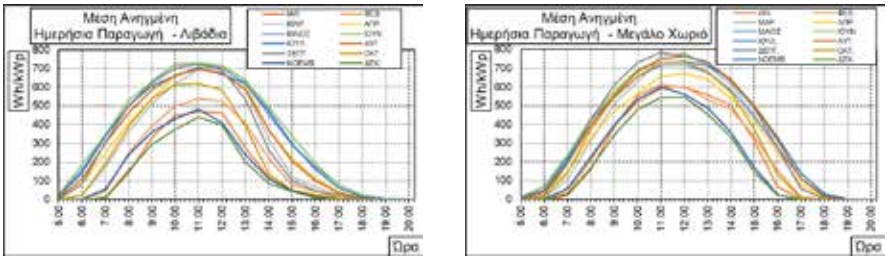
4. ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Συνοψίζοντας, στην Εικόνα 13, παρατίθεται η ανά δύο μήνες αλλαγή συσχετισμού των καμπυλών ανηγμένης ενεργειακής απόδοσης των δύο εγκαταστάσεων μέσα στο έτος. Με τον τρόπο αυτό είναι ακόμα πιο ξεκάθαρο πως επηρεάζεται η ενεργειακή συμπεριφορά μιας Φ/Β εγκατάστασης λόγω χρησιμοποίησης μη βέλτιστων γωνιών κλίσης και προσανατολισμού, σε συνδυασμό πάντα με την εμφάνιση σκιάσεων. Συνεπώς, ξεκινώντας από το μήνα Ιανουάριο και παρατηρώντας τα διαγράμματα μέχρι τον Ιούλιο, μπορεί να καταγράψει κανείς τον περιορισμό της διαφοράς στη μέγιστη παραγωγή (μεταξύ 12:00 και 13:00), δηλαδή τη μείωση του μεγέθους $\Delta E_{specif.,tilt}$, που συνδέεται με τη μη βέλτιστη κλίση των Φ/Β πλαισίων στην περιοχή των Λιβαδιών. Ταυτόχρονα, είναι ευδιάκριτη και η ελαφρά μετατόπιση της ενεργειακής παραγωγής ,που αφορά την εγκατάσταση των Λιβαδιών, προς τα αριστερά, λόγω του επιλεγμένου προσανατολισμού των πλαισίων, που είναι κατά 70^0 στραμμένος ανατολικά σε σχέση με το νότιο προσανατολισμό της εγκατάστασης του Μεγάλου Χωριού. Ειδικότερα κατά την περίοδο Μάιος-Ιούλιος επαληθεύεται το παραπάνω σχόλιο για μηδενικό ισοζύγιο πρωινού κέρδους - απωλειών απογεύματος μεταξύ των δύο υπό σύγκριση Φ/Β εγκαταστάσεων. Στη συνέχεια και κατά τους μήνες Ιούλιο έως Ιανουάριο, οι όροι αντιστρέφονται οπότε και αυξάνεται η διαφορά της ανηγμένης ενεργειακής παραγωγής μεταξύ της εγκατάστασης του Μεγάλου Χωριού και αυτής των Λιβαδιών.



Εικόνα 13: Ετήσια διαφοροποίηση καμπυλών ανηγμένης ημερήσιας ενεργειακής παραγωγής τυπικών ημερών των δύο Φ/Β εγκαταστάσεων.

Τέλος, στα δύο σχήματα της Εικόνας 14 παρουσιάζεται η μέση μηνιαία μεταβολή (για όλους τους μήνες του έτους) της ημερήσιας ανηγμένης παραγωγής με ωριαίο βήμα για τις δύο εγκαταστάσεις με σκοπό να καταστούν εμφανείς οι επιπτώσεις στην ενεργειακή παραγωγή των Λιβαδιών λόγω της αναγκαστικής επιλογής των μη βέλτιστων γωνιών τοποθέτησης των Φ/Β πλαισίων καθώς και οι επίδραση της σκίασης από παρακείμενα εμπόδια στο συγκεκριμένο χώρο εγκατάστασης [33]. Οι ημερήσιες διανομές των δύο σχημάτων ανηγμένης ενεργειακής παραγωγής έχουν προκύψει από τις μέσες ωριαίες τιμές κάθε ημέρας του μήνα, παρέχοντας μια γενική εικόνα της συμπεριφοράς των δύο συστημάτων σε μηνιαία βάση.



Εικόνα 14: Μέση ημερήσια ανηγμένη ενεργειακή παραγωγή των δύο Φ/Β εγκαταστάσεων

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάσθηκαν τα αποτελέσματα λεπτομερούς καταγραφής, ανάλυσης και σύγκρισης της ετήσιας ενεργειακής παραγωγής δύο παρόμοιων φωτοβολταϊκών συστημάτων που εγκατέστησε στις θέσεις Λιβάδια και Μεγάλο Χωριό το εργαστήριο ΗΜΕ & ΠΡΟΠΕ στο απομακρυσμένο και μη διασυνδεδεμένο νησί της Τήλου. Τα δύο υπό μελέτη συστήματα τέθηκαν σε λειτουργία την άνοιξη του 2019 σε δύο κτήρια του νησιού, είναι διασυνδεδεμένα με το τοπικό ηλεκτρικό δίκτυο μέσω ενεργειακού συμψηφισμού (net metering), αλλά διαφοροποιούνται μεταξύ τους στις επιλεγμένες γωνίες κλίσης και προσανατολισμού των Φ/Β πλαισίων καθώς και στην ύπαρξη προβλημάτων σκίασης στην εγκατάσταση στα Λιβάδια.

Από τη συστηματική εξέταση των διαθέσιμων μετρήσεων είναι προφανής η ενεργειακή υπεροχή του συστήματος του Μεγάλου Χωριού, στο οποίο έχουν χρησιμοποιηθεί οι βέλτιστες για την περιοχή της Τήλου γωνίες κλίσης (30^0) και αζιμούθιου (0^0). Αξίζει να τονισθεί ότι η αυξημένη ανηγμένη ενεργειακή παραγωγή στο Μεγάλο Χωρίο έναντι της παραγωγής στα Λιβάδια προκύπτει κυρίως από την αποδοτικότερη λειτουργία των Φ/Β πλαισίων στο Μεγάλο Χωριό κατά τους χειμερινούς και φθινοπωρινούς μήνες. Ειδικότερα, όπως φάνηκε και στην Εικόνα 14, το εύρος των μέγιστων τιμών της μέσης ημερήσιας ανηγμένης ενεργειακής παραγωγής στην εγκατάσταση των Λιβαδιών είναι μεγαλύτερο και κυμαίνεται σε χαμηλότερες τιμές (~450Wh_e/kW_p έως ~720 Wh_e/kW_p) σε σχέση με τα αντίστοιχο εύρος της εγκατάστασης του Μεγάλου Χωριού (~550 Wh_e/kW_p έως ~790 Wh_e/kW_p).

Ολοκληρώνοντας, να τονισθεί ότι παρά τις διαφορές που καταγράφονται, η επιβεβαιωμένη και πειραματικά ενεργειακή παραγωγή και των δύο Φ/Β εγκαταστάσεων είναι ικανοποιητική ξεπερνώντας και τις αρχικά εκτιμώμενες τιμές. Επιπλέον, τα αποτελέσματα της συγκριτικής ενεργειακής συμπεριφοράς των υπό μελέτη Φ/Β εγκαταστάσεων, βασισμένα σε πραγματικές ετήσιες μετρήσεις, είναι ιδιαίτερα κατατοπιστικά επιβεβαιώνοντας και το θεωρητικά υποστηριζόμενο σημαντικό ρόλο που παίζουν στις Φ/Β εγκαταστάσεις οι γωνίες κλίσης και προσανατολισμού. Επιπρόσθετα, γίνεται σαφές, ότι τα προβλήματα σκίασης και αποφυγής ενδεχόμενης οπτικής όχλησης, που είναι απαραίτητο να λαμβάνονται υπόψιν, είναι πιθανόν να έχουν σημαντική επίδραση στην απόδοση των εγκαταστάσεων. Τέλος, με βάση τα αποτελέσματα της σύγκρισης σε εποχιακό επίπεδο, ενισχύεται και με τη χρήση συστηματικών μετρήσεων η κατανόηση της διαφορετικής επίδρασης των γωνιών κλίσης και προσανατολισμού των Φ/Β κατά τις διάφορες περιόδους του έτους.

Κλείνοντας, πρέπει να αναφερθεί πως η επιλογή των συγκεκριμένων γωνιών κλίσης και προσανατολισμού στην περιοχή των Λιβαδιών ήταν αποτέλεσμα της ιδιαιτερότητας της εγκατάστασης, που λόγω θέσης δεν επέτρεπε την καλύτερη τοποθέτηση των Φ/Β πλαισίων. Έτσι, λαμβάνοντας υπόψιν τα αποτελέσματα της εργασίας, θα έλεγε κανείς ότι λόγω των υφιστάμενων περιορισμών η εγκατάσταση υποβαθμίζεται μεν κατά περίπου 20% παραγωγικά, αλλά δεν παύει να αποδίδει ικανοποιητική ενεργειακή παραγωγή (περίπου 1500 kWh_e/kW_p) και εντός του αστικού ιστού, ξεπερνώντας και τις αρχικά εκτιμώμενες τιμές ενεργειακής παραγωγής.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ), 2020, *Αναλυτικός Χάρτης Σταθμών*, διαθέσιμο στην https://www.dei.gr/, ανακτήθηκε τον Ιανουάριο του 2021.

[2] Kaldellis J.K., Zafirakis D., 2007, Present Situation and Future Prospects of Electricity Generation in Aegean Archipelago Islands, Energy Policy Journal, Vol.35(9), pp.4623-4639.

[3] Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ), 2001, *ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΘΝΙΚΟΥ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ,* διαθέσιμο από: http://www.rae.gr/, ανακτήθηκε τον Ιανουάριο του 2021.

[4] Διαχειριστής του Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΔΕΔΔΗΕ), 2020, *Μηνιαία Δελτία ΑΠΕ και Θερμικής Παραγωγής στα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά*, διαθέσιμο από: https://www.deddie.gr/, ανακτήθηκε Ιανουάριο 2021.

[5] Tzanes G., Zafeiraki Ef, Papapostolou Chr., Zafirakis D., Moustris K., Kavadias K., Chalvatzis K., Kaldellis J.K., 2018, Assessing the Status of Electricity Generation in the Non-Interconnected Islands of the Aegean Sea Region, Renewable Energy Integration with Mini/Microgrids, REM 2018, 29–30 September 2018, Rhodes, Greece

[6] Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (ΕΜΥ), 2017, *Κλιματικά* Δεδομένα, διαθέσιμο κατόπιν επικοινωνίας από: http://www.hnms.gr/, ανακτήθηκε το 2017.

ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΑΠΟΡΡΙΨΕΩΝ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΚΟΡΕΣΜΕΝΑ ΝΗΣΙΩΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΣΩ ΣΥΖΕΥΞΗΣ ΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΩΝ ΣΩΡΕΥΤΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΖΗΤΗΣΗΣ

Δημήτριος Ζαφειράκης[1]*, Γεώργιος Τζάνες[1], Χριστιάνα Παπαποστόλου[2], Κοσμάς Καββαδίας[1], Γεώργιος Σπυρόπουλος[1], Κωνσταντίνος Χριστόπουλος[1], Αιμιλία Κονδύλη[2], Ιωάννης Καλδέλλης[1]

[1] Εργαστήριο Ήπιων Μορφών Ενέργειας & Προστασίας του Περιβάλλοντος, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής
[2] Εργαστήριο Αριστοποίησης Παραγωγικών Συστημάτων, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής
e-mail: dzaf@teipir.gr, dzaf@uniwa.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα νησιωτικά συστήματα που χαρακτηρίζονται από αυξημένα επίπεδα διείσδυσης ΑΠΕ βρίσκονται αντιμέτωπα με το πρόβλημα των απορρίψεων καθαρής ενέργειας, το οποίο επιδρά αρνητικά στην οικονομική απόδοση των εν λόγω εγκαταστάσεων. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος των απορρίψεων καθαρής παραγωγής ΑΠΕ, η αποθήκευση ενέργειας ή/και οι ηλεκτρικές διασυνδέσεις συνιστούν ώριμες τεχνολογικά λύσεις που όμως επιβαρύνουν σημαντικά σε όρους αρχικού κόστους. Στον αντίποδα, η αξιοποίηση υφιστάμενων συνιστωσών του ηλεκτρικού συστήματος στην πλευρά της κατανάλωσης προσφέρει τη δυνατότητα για εφαρμογή σχημάτων σωρευτικής απόκρισης ζήτησης με ιδιαίτερα χαμηλό κόστος. Οι τελευταίες αναφέρονται στη δημιουργία "δεξαμενών" φορτίων αυξημένης ευελιξίας που δεν περιορίζονται στον τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά επεκτείνονται ώστε να λάβουν υπόψη πρακτικές σύζευξης με τον τομέα των μεταφορών καθώς και με άλλες ενεργειακές χρήσεις όπως η θέρμανση/ψύξη. Επιπρόσθετα, αυξημένο είναι το ενδιαφέρον που καταγράφεται πρόσφατα αναφορικά με τη διερεύνηση της συνδυασμένης διαχείρισης του πλέγματος ενέργειας και νερού μέσω σύζευξης αντίστοιχων δικτύων. Με βάση τα ανωτέρω, η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην ανάπτυξη στρατηγικών σωρευτικής απόκρισης ζήτησης σε υψηλό επίπεδο, στοχεύοντας κατά κύριο λόγο στην αξιοποίηση συνιστωσών του δικτύου νερού (αντλητικά συγκροτήματα) για την ανάκτηση απορρίψεων καθαρής παραγωγής ενέργειας σε κορεσμένα –από απόψη ΑΠΕ- νησιωτικά συστήματα και την ελαχιστοποίηση της χρήσης συμβατικής παραγωγής ενέργειας συνολικά, επιτυγχάνοντας παράλληλα τη σύζευξη των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας και νερού.

Λέξεις Κλειδιά: Νησιωτικά συστήματα, πλέγμα ενέργειας-νερού, σύζευξη δικτύων, απορρίψεις ΑΠΕ, σωρευτική απόκριση ζήτησης

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα νησιωτικά συστήματα που χαρακτηρίζονται από αυξημένα επίπεδα διείσδυσης ΑΠΕ βρίσκονται αντιμέτωπα με το πρόβλημα των απορρίψεων καθαρής ενέργειας [1], το οποίο επιδρά αρνητικά στην οικονομική απόδοση των εν λόγω εγκαταστάσεων. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος των απορρίψεων καθαρής παραγωγής ΑΠΕ, η αποθήκευση ενέργειας [2,3] ή/και οι ηλεκτρικές διασυνδέσεις συνιστούν ώριμες τεχνολογικά λύσεις που όμως επιβαρύνουν σημαντικά σε όρους αρχικού κόστους. Στον αντίποδα, η αξιοποίηση υφιστάμενων συνιστωσών του ηλεκτρικού συστήματος στην πλευρά της κατανάλωσης προσφέρει τη δυνατότητα για εφαρμογή σχημάτων σωρευτικής απόκρισης ζήτησης με ιδιαίτερα χαμηλό κόστος [3]. Οι τελευταίες αναφέρονται στη δημιουργία "δεξαμενών" φορτίων αυξημένης ευελιξίας που δεν περιορίζονται στον τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά επεκτείνονται ώστε να λάβουν υπόψη πρακτικές σύζευξης [4] με τον τομέα των μεταφορών καθώς και με άλλες ενεργειακές χρήσεις όπως η θέρμανση/ψύξη [5,6]. Επιπρόσθετα, αυξημένο είναι το ενδιαφέρον που καταγράφεται πρόσφατα αναφορικά με τη διερεύνηση της συνδυασμένης διαχείρισης του πλέγματος ενέργειας και νερού μέσω σύζευξης των εν λόγω δικτύων [7,8]. Παρόμοιες πρακτικές καλούνται να απαντήσουν αποτελεσματικά στην πρόκληση της διαχείρισης των περιορισμένων υδατικών πόρων σε πολλές από τις νησιωτικές περιοχές του Αιγαίου [9], εξετάζοντας μεταξύ άλλων την αξιοποίηση χαμηλού κόστους καθαρής ενέργειας. Η τελευταία δε, και με δεδομένες τις ιδιαιτερότητες των νησιωτικών συστημάτων, εμφανίζεται αφενός περιορισμένη σε ετήσια βάση -στα επίπεδα του 15%-20%- αφετέρου υπό τη μορφή απορριπτόμενου δυναμικού σε αρκετές από τις ανωτέρω περιοχές, ως απόρροια της έντονης ασυμφωνίας μεταξύ παραγωγής και ζήτησης, ειδικά κατά τη χειμερινή περίοδο του έτους, αλλά και εξαιτίας λοιπών τεχνικών περιορισμών σε επίπεδο δικτύου.

Με βάση τα παραπάνω, η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην ανάπτυξη στρατηγικών σωρευτικής απόκρισης ζήτησης, στοχεύοντας κατά κύριο λόγο στην αξιοποίηση συνιστωσών του δικτύου νερού (αντλητικά συγκροτήματα) για την ανάκτηση απορρίψεων καθαρής παραγωγής ενέργειας σε κορεσμένα –από απόψη ΑΠΕ- νησιωτικά συστήματα και την ελαχιστοποίηση της χρήσης συμβατικής παραγωγής ενέργειας συνολικά, επιτυγχάνοντας παράλληλα τη σύζευξη των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας και νερού.

Για την εφαρμογή των προτεινόμενων στρατηγικών επιλέχθηκε το ηλεκτρικό σύστημα Κω-Καλύμνου (υπερδίκτυο), στο οποίο καταγράφονται σημαντικές απορρίψεις αιολικής ενέργειας ακόμα και κατά τη θερινή περίοδο (δεδομένου ότι η συνολική εγκατεστημένη αιολική ισχύς ξεπερνά το ~35% του μέσου ετήσιου ηλεκτρικού φορτίου), σε συνδυασμό με το δίκτυο νερού της Τήλου, η οποία αποτελεί τμήμα του ευρύτερου ηλεκτρικού συστήματος Κω-Καλύμνου. Στο πλαίσιο αυτό χρησιμοποιήθηκαν αναλυτικές μετρήσεις ηλεκτρικής κατανάλωσης των αντλιοστασίων της Τήλου που σε συνδυασμό με επίσημα δεδομένα αλλά και αποτελέσματα προσομοίωσης αναφορικά με το ηλεκτρικό ενεργειακό ισοζύγιο του συστήματος Κω-Καλύμνου επέτρεψαν τη διερεύνηση των προτεινόμενων στρατηγικών σωρευτικής απόκρισης ζήτησης για τα υπό εξέταση αντλιοστάσια με τα αποτελέσματα της έρευνας να αναδεικνύουν σαφώς –αν και σε περιορισμένη αρχικά κλίμακα- τα οφέλη εφαρμογής παρόμοιων στρατηγικών σύζευξης δικτύων.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1. Μεθοδολογική Προσέγγιση

Για τη μελέτη του υπό εξέταση προβλήματος δημιουργήθηκε ολοκληρωμένο μοντέλο προσομοίωσης της ένταξης αντλητικών μονάδων, σωρευτικού χαρακτήρα, το οποίο συνδυάστηκε με υφιστάμενο μοντέλο προσομοίωσης τυπικού νησιωτικού ηλεκτρικού συστήματος αναφορικά με την επίλυση του ενεργειακού ισοζυγίου και την κατάρτιση προγραμμάτων ένταξης των διαφορετικών συνιστωσών παραγωγής ενέργειας, με έμφαση στην εκτίμηση του προφίλ απορρίψεων ενέργειας ΑΠΕ λόγω του κορεσμένου χαρακτήρα των εν λόγω συστημάτων. Στο πλαίσιο αυτό, στόχος του μοντέλου ένταξης των αντλητικών μονάδων είναι σε πρώτο επίπεδο η μέγιστη δυνατή ανάκτηση απορρίψεων ενέργειας ΑΠΕ και σε δεύτερο η ελαχιστοποίηση της χρήσης ενέργειας από θερμικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας, συνθήκη η οποία ενεργοποιείται στο ενδεχόμενο μη κάλυψης των αντλητικών αναγκών από το εμφανιζόμενο πλεόνασμα ΑΠΕ υπό τη μορφή απορρίψεων. Το πρόβλημα επιλύεται σε ημερήσια βάση και στα πλαίσια κατάρτισης προημερήσιου προγράμματος λειτουργίας των αντλητικών μονάδων υπό εξέταση για την περίοδο μελέτης (διάρκεια ενός έτους ενδεικτικά), ενώ τα επιμέρους βήματα, οι

περιορισμοί, καθώς και οι μεθοδολογικές παραδοχές οι οποίες ελήφθησαν υπόψη αναφέρονται στα ακόλουθα:

- **Δεδομένα εισόδου:**

- Χρονοσειρές φορτίου μετεωρολογικών δεδομένων για το ηλεκτρικό σύστημα υπό εξέταση, σε συνδυασμό με την εγκατεστημένη ισχύ και τα τεχνικά χαρακτηριστικά των σε λειτουργία εγκαταστάσεων ΑΠΕ και του στόλου των θερμικών μονάδων, λαμβάνοντας υπόψη τους όποιους περιορισμούς ένταξης και λειτουργίας (π.χ. σειρά ένταξης και τεχνικά ελάχιστα θερμικών μονάδων, δυναμικός περιορισμός δικτύου, κλπ).
- Χρονοσειρές φόρτισης (ηλεκτρικής κατανάλωσης) των αντλητικών μονάδων υπό εξέταση, σε συνδυασμό με την ηλεκτρική ισχύ και τα λοιπά τεχνικά χαρακτηριστικά ενδιαφέροντος. Εναλλακτικά, υπολογισμός της ηλεκτρικής κατανάλωσης με βάση δεδομένα ζήτησης νερού.

- **Κύρια μεθοδολογικά βήματα:**

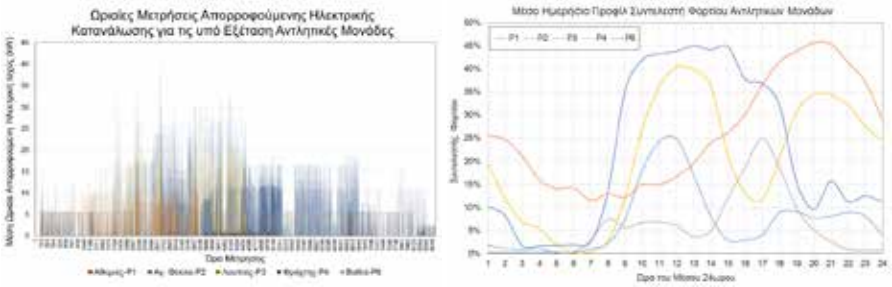
- Επίλυση ενεργειακού ισοζυγίου του ηλεκτρικού συστήματος υπό εξέταση στη βάση ωριαίας ανάλυσης – προσομοίωσης για ένα ολόκληρο έτος.
- Υπολογισμός ωριαίων απορρίψεων ενέργειας από ΑΠΕ κατόπιν της εφαρμογής των περιορισμών των τεχνικών ελαχίστων των θερμικών μονάδων και του δυναμικού περιορισμού σε επίπεδο δικτύου για την εκτίμηση του παραμένοντος φορτίου προς ανάληψη από τις μονάδες ΑΠΕ.
- Υπολογισμός ωριαίας διείσδυσης ΑΠΕ στη βάση λειτουργίας των ενταγμένων μονάδων παραγωγής ενέργειας.
- Επεξεργασία ιστορικών δεδομένων ηλεκτρικής κατανάλωσης του στόλου των αντλητικών μονάδων υπό εξέταση, για τη δημιουργία τυπικής, ετήσιας χρονοσειράς σωρευτικής ηλεκτρικής κατανάλωσης.
- Υπολογισμός ισοδύναμων ωρών λειτουργίας σε ημερήσια βάση για το συνόλο των αντλητικών μονάδων υπό τη μορφή εικονικού αντλιοστασίου (virtual pumping station), στη βάση των δεδομένων ιστορικής κατανάλωσης και της σωρευτικά μέγιστης απορροφούμενης ηλεκτρικής ισχύος (ισοδύναμη της μέγιστης διακινούμενης παροχής) των επιμέρους αντλιών.
- Καθορισμός ημερήσιου προγράμματος λειτουργίας του εικονικού αντλιοστασίου με στόχο τη μέγιστη αξιοποίηση ΑΠΕ, δίνοντας προτεραιότητα στην ανάκτηση απορριπτόμενων ποσών ΑΠΕ και ικανοποιώντας σε δεύτερο χρόνο την απαίτηση για ελαχιστοποίηση της συνεισφοράς θερμικών μονάδων στην κάλυψη των αντλητικών αναγκών.
- Απολογιστικός υπολογισμός σε ετήσια βάση της επιτευχθείσας ανάκτησης απορρίψεων ΑΠΕ και του συνολικού συντελεστή αξιοποίησης ΑΠΕ για την ικανοποίηση των αντλητικών αναγκών.

- **Παραδοχές:**

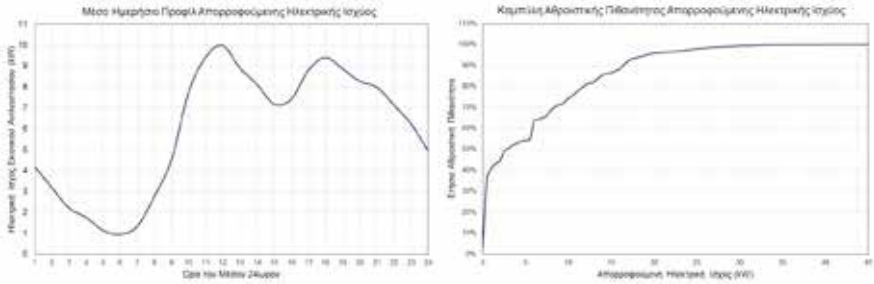
- Το ημερήσιο πρόγραμμα ένταξης-λειτουργίας καταρτίζεται σε επίπεδο εικονικού αντλιοστασίου, χωρίς επιμερισμό στη συνέχεια σε επίπεδο αντλητικής μονάδας, και υπαγορεύεται από τα ιστορικά δεδομένα της απορροφούμενης ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το προφίλ ζήτησης νερού από την πλευρά της κατανάλωσης.
- Ισοδύναμα, η κατάρτιση του προημερήσιου προγράμματος θεωρεί απόλυτα ακριβή πρόγνωση των εμπλεκόμενων μεγεθών (ντετερμινιστική επίλυση), προσέγγιση η οποία θεωρείται πως διατηρεί χαμηλό βαθμό αβεβαιότητας στην περίπτωση μικρής συγκριτικά κλίμακας εικονικού αντλιοστασίου σε σχέση με το εμφανιζόμενο δυναμικό απορρίψεων ενέργειας από ΑΠΕ.
- Δεδομένης της προτεραιότητας στην ανάκτηση απορρίψεων ενεργειακής παραγωγής από ΑΠΕ, θεωρείται λειτουργία του εικονικού αντλιοστασίου σε περιοχή μέγιστων τιμών διακινούμενης παροχής, και συνεπώς μέγιστης απορροφούμενης ηλεκτρικής ισχύος η οποία στη συνέχεια καθορίζει και τις ώρες ισοδύναμης λειτουργίας.
- Για τη διασφάλιση της επίτευξης συμφωνίας μεταξύ άντλησης και ζήτησης νερού κατά τη διάρκεια της ημέρας λαμβάνεται υπόψη παρουσία δεξαμενής αποθήκευσης νερού χωρητικότητας αντίστοιχης της μέγιστης ημερήσιας κατανάλωσης νερού μέσα στο έτος ώστε να εξομαλύνονται οι διαφορές του ωριαίου ισοζυγίου παραγωγής-κατανάλωσης εξαιτίας της χρονικής μετατόπισης της λειτουργίας των αντλητικών μονάδων εντός της ημέρας.

2.2. Μελέτη Περίπτωσης

Για την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας χρησιμοποιήθηκε το ηλεκτρικό σύστημα Κω-Καλύμνου σε συνδυασμό με τμήμα του υφιστάμενου στόλου των δημοτικών αντλιοστασίων της νήσου Τήλου. Τα τελευταία αποτελούν μία από τις βασικές συνιστώσες της τοπικής πλατφόρμας παρακολούθησης και διαχείρισης ηλεκτρικών φορτίων του νησιού, παρέχοντας τη δυνατότητα για επεξεργασία αναλυτικών μετρήσεων ηλεκτρικής κατανάλωσης, ενδεικτικό δείγμα των οποίων παρατίθεται στο ακόλουθο Σχήμα 1, για το έτος 2018. Το παρόν διάστημα αναφέρεται και στην περίοδο μελέτης του υπό εξέταση προβλήματος, αξιοποιώντας δεδομένα για ένα ολόκληρο σχεδόν έτος και για 5 αντλητικές μονάδες σε σύνολο 7 εν λειτουργία για ολόκληρο το νησί. Με βάση τα τεχνικά χαρακτηριστικά των αντλιών αλλά και την επεξεργασία των ωριαίων μετρήσεων ηλεκτρικής κατανάλωσης, η μέγιστη απορροφούμενη ωριαία ηλεκτρική ισχύς των πέντε υπό επιτήρηση μονάδων (P1-P4 και P6) είναι της τάξης των 45kW$_e$. Ταυτοχρόνως, στο Σχήμα 1β παρατίθενται οι απολογιστικές τιμές του συντελεστή φορτίου για το μέσο 24ωρο της υπό μελέτη περιόδου και για κάθε αντλητική μονάδα ξεχωριστά, ενώ στο Σχήμα 2 ακολουθούν το αντίστοιχο μέσο 24ωρο προφίλ και η καμπύλη αθροιστικής πιθανότητας που χαρακτηρίζουν με τη σειρά τους τη μακροχρόνια λειτουργία του εικονικού αντλιοστασίου (άθροισμα των πέντε υπό επιτήρηση αντλητικών μονάδων).



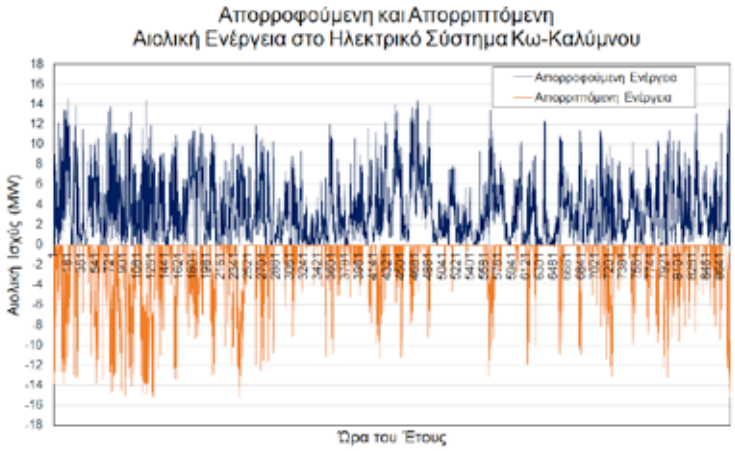
Σχήμα 1: Μετρήσεις μέσης ωριαίας απορροφούμενης ηλεκτρικής ισχύος (α) και μέσο ημερήσιο προφίλ συντελεστή φορτίου (β) των υπό επιτήρηση αντλητικών μονάδων στη νήσο Τήλο (έτος μελέτης 2018)



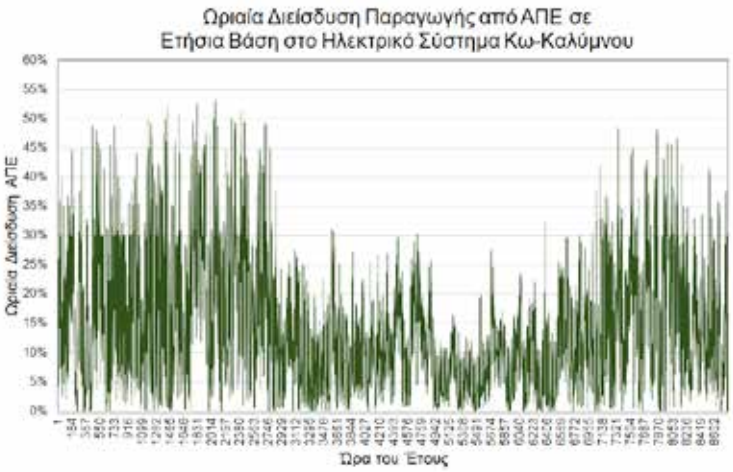
Σχήμα 2: Μέσο ημερήσιο προφίλ απορροφούμενης ηλεκτρικής ενέργειας (α) και ετήσια καμπύλη αθροιστικής πιθανότητας (β) του εικονικού αντλιοστασίου στη νήσο Τήλο (έτος μελέτης 2018)

Συνδυαστικά με τις απολογιστικές μετρήσεις για τη λειτουργία των δημοτικών αντλιοστασίων της Τήλου, αξιοποιήθηκαν και διαθέσιμα, επίσημα στοιχεία του Διαχειριστή (ΔΕΔΔΗΕ), καθώς και αποτελέσματα προσομοίωσης του ηλεκτρικού συστήματος Κω-Καλύμνου τα οποία εξήχθησαν από τον προσομοιωτή Microgrid Simulator [10] του Εργαστηρίου Ήπιων Μορφών Ενέργειας & Προστασίας του Περιβάλλοντος, λαμβάνοντας υπόψη τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συνόλου των υφιστάμενων θερμικών μονάδων και των σταθμών ΑΠΕ. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί πως το σύστημα Κω-Καλύμνου εμφανίζει συνολική ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας της τάξης των 360GWh, ενώ φιλοξενεί εγκατεστημένη αιολική ισχύ της τάξης των 16MW καθώς και Φ/Β ισχύ που πλησιάζει τα 9MW. Με βάση το ισχύον καθεστώς ένταξης των μονάδων, οι Φ/Β σταθμοί εντάσσονται κατά προτεραιότητα, γεγονός που εξασφαλίζει πλήρη απορρόφηση της παραγωγής τους καθόλη τη διάρκεια του έτους. Στον αντίποδα, τα υφιστάμενα αιολικά πάρκα αντιμετωπίζουν σημαντικές απορρίψεις, ιδιαίτερα κατά τη χειμερινή περίοδο, με τα αντίστοιχα ποσοστά μη απορρόφησης να

διαμορφώνονται στα επίπεδα ακόμα και του 30% επί της θεωρητικής αιολικής παραγωγής σε ετήσια βάση. Επεξηγηματικό των ανωτέρω είναι το ακόλουθο Σχήμα 3, όπου παρατίθενται οι χρονοσειρές απορροφούμενης και απορριπτόμενης αιολικής ενέργειας για αντιπροσωπευτικό έτος λειτουργίας, το οποίο λαμβάνεται υπόψη και στη συνέχεια των υπολογισμών, με το ποσοστό της απορριπτόμενης ενέργειας να αγγίζει το 31% (~14.5GWh) επί της θεωρητικά παραγόμενης (46.1GWh). Παράλληλα, στο επόμενο Σχήμα 4 παρουσιάζεται το αντίστοιχο ωριαίο προφίλ διείσδυσης ΑΠΕ στο ηλεκτρικό σύστημα Κω-Καλύμνου, διαμορφώνοντας μία μέση ωριαία συνεισφορά στα επίπεδα του 14% η οποία συνοδεύεται από ετήσιο (σταθμισμένο) συντελεστή διείσδυσης μικρότερο του 13%. Καθίσταται σαφές με βάση τα ανωτέρω πως το δυναμικό των αιολικών απορρίψεων στο συγκεκριμένο σύστημα είναι ιδιαίτερα ικανό, ενθαρρύνοντας τη διερεύνηση στρατηγικών είτε σύζευξης διαφορετικών χρήσεων (εξηλεκτρισμός για παράδειγμα του τομέα των μεταφορών), είτε διαχείρισης (απόκρισης) ζήτησης στη βάση αξιοποίησης ελαστικών φορτίων υπό τη συγκρότηση αντίστοιχων εικονικών «δεξαμενών» αυξημένης ευελιξίας.

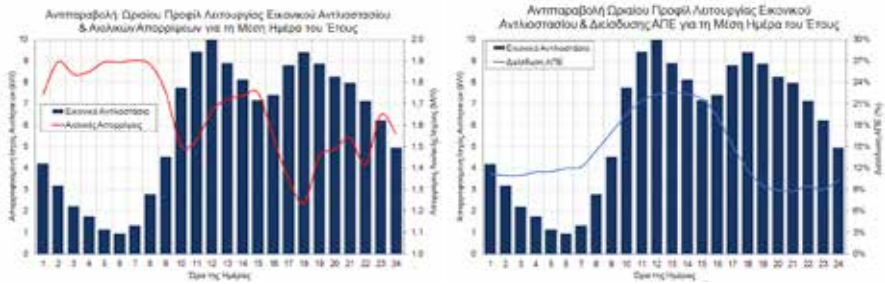


Σχήμα 3: Ωριαίο προφίλ απορροφούμενης και απορριπτόμενης αιολικής ενεργειακής παραγωγής σε ετήσια βάση στο νησιωτικό ηλεκτρικό σύστημα Κω-Καλύμνου



Σχήμα 4: Ωριαίο προφίλ συντελεστή διείσδυσης ΑΠΕ σε ετήσια βάση στο σύστημα Κω-Καλύμνου

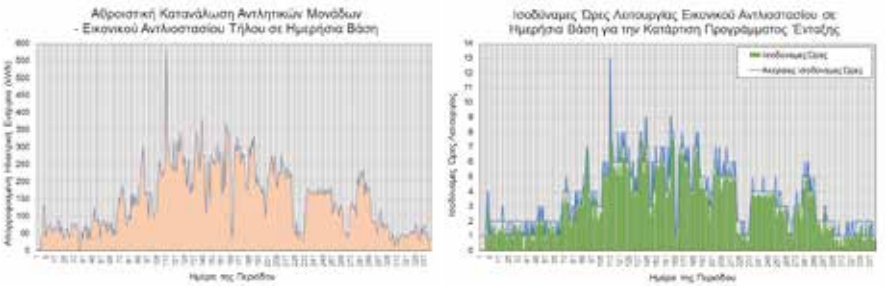
Αντιπαραβάλλοντας στη συνέχεια τα προφίλ λειτουργίας του εικονικού αντλιοστασίου και των απορρίψεων αιολικής ενέργειας αλλά και της επιτευχθείσας διείσδυσης ΑΠΕ στο ηλεκτρικό σύστημα, είναι εμφανής η ασυμφωνία σε επίπεδο μέσης ημέρας (Σχήμα 5), ενώ παράλληλα αξίζει να τονισθεί πως εξαιτίας του μεγέθους του υπό εξέταση εικονικού αντλιοστασίου (price taker), η όποια μεταβολή εφαρμοσθεί σε επίπεδο προγράμματος ένταξης του τελευταίου δεν επιδρά παρά σε αμελητέο βαθμό στη λειτουργία του ευρύτερου συστήματος Κω-Καλύμνου.



Σχήμα 5: Σύγκριση μέσου ημερήσιου προφίλ κατανάλωσης εικονικού αντλιοστασίου και αιολικών απορρίψεων (α) – διείσδυσης ΑΠΕ (β)

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Εφαρμόζοντας στη συνέχεια τη μεθοδολογία της ενότητας 2, ολοκληρώνονται αρχικά οι ωριαίες καταναλώσεις του εικονικού αντλιοστασίου σε ημερήσια βάση και για την περίοδο μελέτης, ενώ στη συνέχεια υπολογίζονται οι αντίστοιχες ισοδύναμες ώρες λειτουργίας υπό τη συνθήκη μέγιστης απορροφούμενης ηλεκτρικής ισχύος που υποδηλώνει και διακίνηση μέγιστων παροχών νερού. Ταυτόχρονα, και εξαιτίας του υπολογισμού των ελάχιστων ωρών λειτουργίας του αντλιοστασίου σε ημερήσια βάση σε ακέραιες τιμές, σε περίπτωση μη ακέραιων τιμών αναθεωρείται η μέση ωριαία απορροφούμενη ηλεκτρική ισχύς προκειμένου να πραγματοποιηθεί στη συνέχεια ισοκατανομή της ημερήσιας ηλεκτρικής κατανάλωσης στις ισοδύναμες ώρες λειτουργίας. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα παρατίθενται στο ακόλουθο Σχήμα 6.

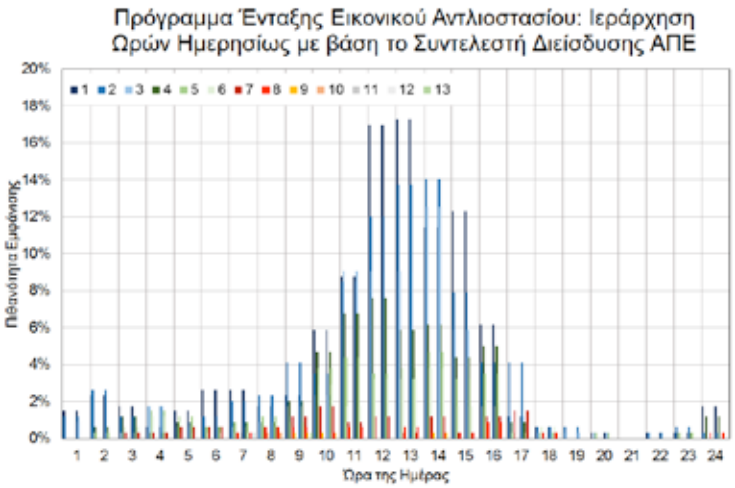


Σχήμα 6: Μακροχρόνια ηλεκτρική κατανάλωση (α) και ισοδύναμες ώρες λειτουργίας εικονικού αντλιοστασίου της νήσου Τήλου (β) σε ημερήσια βάση

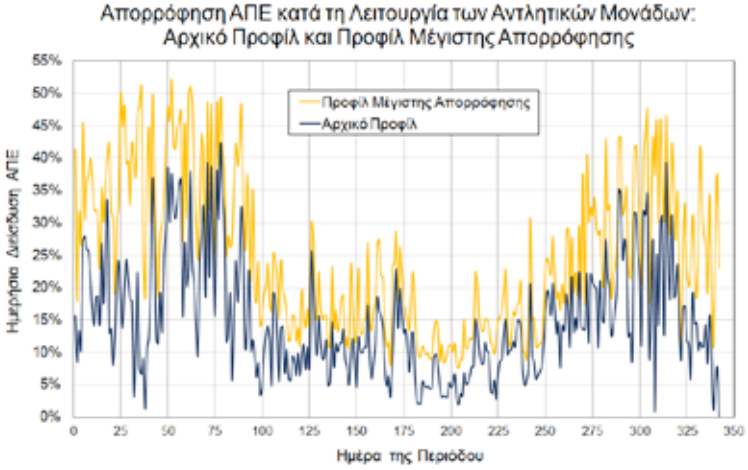
Με βάση τις ακέραιες ισοδύναμες ώρες λειτουργίας, μελετάται αρχικά σενάριο μέγιστης απορρόφησης ΑΠΕ αγνοώντας το υφιστάμενο δυναμικό απορρίψεων, και ακολουθώντας το προφίλ διείσδυσης ΑΠΕ του Σχήματος 4. Στο πλαίσιο αυτό, πραγματοποιείται ταξινόμηση των ωρών της ημέρας με βάση τον εμφανιζόμενο συντελεστή διείσδυσης ΑΠΕ και καταρτίζεται αντίστοιχο ωριαίο πρόγραμμα ένταξης του εικονικού αντλιοστασίου για κάθε ημέρα ξεχωριστά, λαμβάνοντας υπόψη τον περιορισμό της μέγιστης απορροφούμενης ηλεκτρικής ισχύος καθώς και της ισοκατανομής της απορροφούμενης ενέργειας στις ακέραιες ισοδύναμες ώρες λειτουργίας της κάθε ημέρας. Τα αποτελέσματα εφαρμογής της εν λόγω στρατηγικής αποτυπώνονται στο γράφημα του Σχήματος 8, ενώ προηγούμενα, και στο Σχήμα 7, παρουσιάζεται η πιθανότητα καθώς και η ακολουθία ένταξης του εικονικού αντλιοστασίου στις

διαφορετικές ώρες της ημέρας (μέγιστη διάρκεια προγράμματος οι 13 ώρες/ημέρα, Σχήμα 6β) στη λογική ιεράρχησης με βάση το μέγιστο ωριαίο συντελεστή ΑΠΕ.

Στο πλαίσιο αυτό, και όπως προκύπτει από το Σχήμα 7, οι υψηλότερες τιμές πιθανότητας εμφανίζονται τις μεσημεριανές ώρες της ημέρας, γεγονός που συνάδει και με την πλήρη απορρόφηση της τοπικής Φ/Β παραγωγής, υποδηλώνοντας ταυτόχρονα τη χαμηλή απορρόφηση ενέργειας από ΑΠΕ (αιολικής ενέργειας) κατά τη διάρκεια της νύχτας. Η μετατόπιση αυτή στη λειτουργία του εικονικού αντλιοστασίου φέρεται να επιτυγχάνει σημαντικά υψηλότερη απορρόφηση ΑΠΕ, και δη τη χειμερινή περίοδο, οπότε και λόγω της ελαχιστοποίησης του φορτίου εμφανίζονται διαστήματα (μέσο) της ημέρας με ιδιαίτερα υψηλούς συντελεστές διείσδυσης (Σχήμα 4). Απολογιστικά, και κατόπιν εφαρμογής της συγκεκριμένης στρατηγικής, ο συντελεστής απορρόφησης ΑΠΕ αναφορικά με τη λειτουργία του εικονικού αντλιοστασίου ανήλθε από 12.8% σε 20.9%.

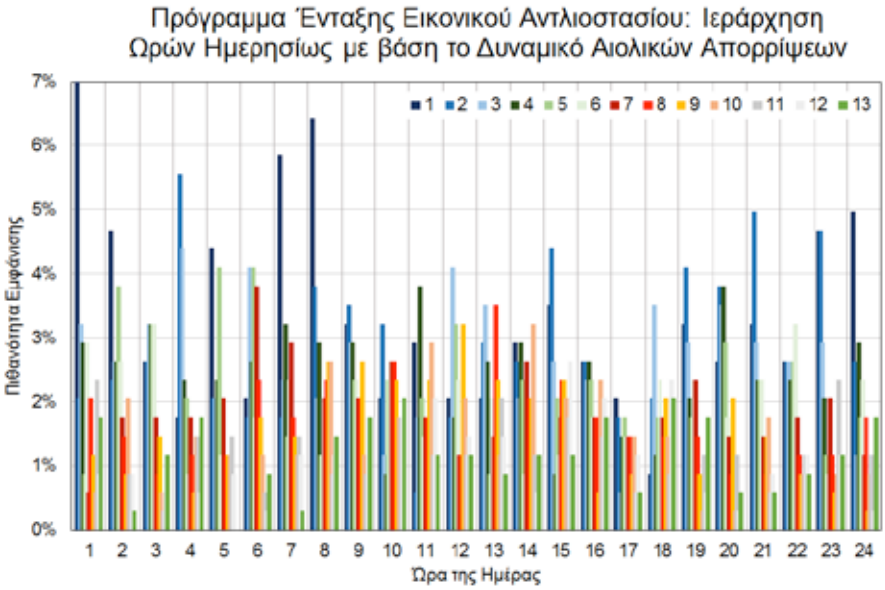


Σχήμα 7: Προτεραιοποίηση ωρών της ημέρας για την ένταξη του εικονικού αντλιοστασίου με βάση την υψηλότερη εμφανιζόμενη διείσδυση ΑΠΕ



Σχήμα 8: Σύγκριση επιπέδων απορροφούμενης ενέργειας από ΑΠΕ μεταξύ του σεναρίου αναφοράς και της εφαρμογής στρατηγικής απόκρισης ζήτησης με βάση το μέγιστο βαθμό διείσδυσης ΑΠΕ

Στη συνέχεια εφαρμόζεται στρατηγική με προτεραιότητα στην ανάκτηση των εμφανιζόμενων απορρίψεων αιολικής ενέργειας, με ιεράρχηση προηγουμένως των ωρών της κάθε ημέρας με βάση το εμφανιζόμενο δυναμικό απορρίψεων, οπότε και προκύπτουν τα αποτελέσματα του Σχήματος 9, σε αντιστοιχία με το Σχήμα 7. Όπως παρατηρείται, η κατανομή των ωρών ένταξης είναι σαφώς πιο διεσπαρμένη σε σχέση με την πρώτη στρατηγική, παρόλα αυτά εντοπίζεται κατά κύριο λόγο στις ώρες μη αιχμής, όπως και αναμενόταν εξάλλου, και ως εκ τούτου, λειτουργεί συμπληρωματικά στο προφίλ του Σχήματος 7.



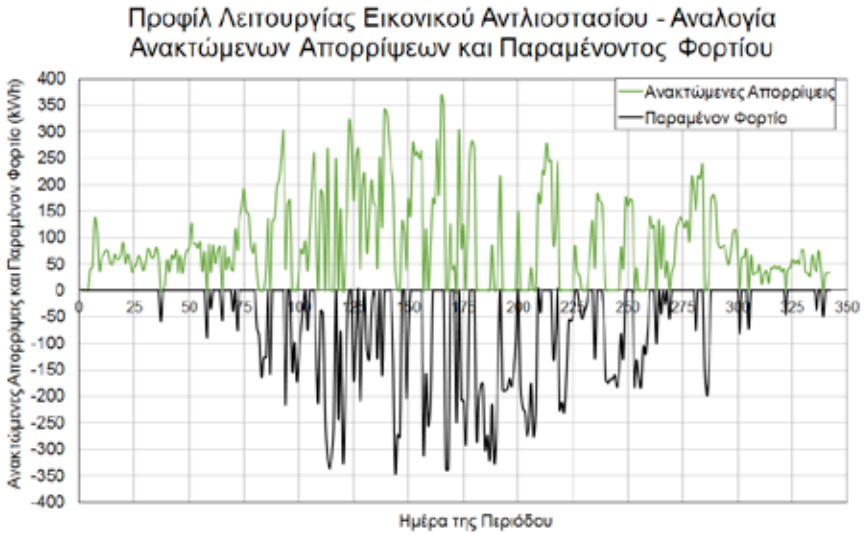
Σχήμα 9: Προτεραιοποίηση ωρών της ημέρας για την ένταξη του εικονικού αντλιοστασίου με βάση την υψηλότερη τιμή απόρριψης αιολικής ισχύος

Στο πλαίσιο αυτό, και κατόπιν εφαρμογής των ημερήσιων προγραμμάτων με βάση την ακολουθία των ταξινομημένων ωρών, προκύπτει η αναλογία του Σχήματος 10 αναφορικά με την κάλυψη της απαιτούμενης ηλεκτρικής κατανάλωσης του εικονικού αντλιοστασίου σε ημερήσια βάση και για το σύνολο της περιόδου μελέτης. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, η εν λόγω στρατηγική, η οποία θέτει ως προϋπόθεση την ακριβή πρόγνωση εμφάνισης πλεονάσματος για περισσότερο από 24 ώρες μπροστά, δύναται να ανακτήσει αιολικές απορρίψεις που ξεπερνούν το 50% της συνολικά απορροφούμενης ενέργειας του εικονικού αντλιοστασίου, ήτοι 58.6%.

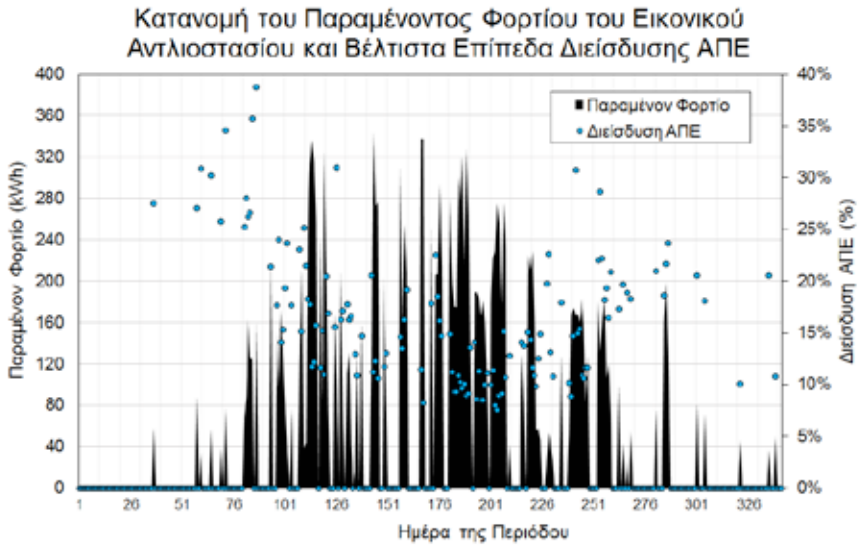
Το δε παραμένον φορτίο άντλησης υπόκειται σε δεύτερο κύκλο βελτιστοποίησης, έχοντας ως στόχο την περαιτέρω αξιοποίηση των ΑΠΕ για τη λειτουργία του εικονικού αντλιοστασίου, στοχεύοντας αυτή τη φορά στις ώρες με την υψηλότερη διείσδυση ΑΠΕ, κατόπιν αποκλεισμού των ωρών της ημέρας οι οποίες έχουν ήδη δεσμευθεί για την ένταξη του εικονικού αντλιοστασίου υπό το κριτήριο της μέγιστης ανάκτησης απορρίψεων ενέργειας. Με βάση τα ανωτέρω, τα τελικά αποτελέσματα κατανομής του παραμένοντος φορτίου παρουσιάζονται στο Σχήμα 11, σε συνδυασμό με τους αντίστοιχους ημερήσιους συντελεστές διείσδυσης, οι οποίοι απορρέουν ως σταθμισμένοι μέσοι της εσωτερικής, ωριαίας κατανομής του παραμένοντος φορτίου ανά ημέρα, εκκινώντας από τη διαθέσιμη ώρα με τον υψηλότερο συντελεστή διείσδυσης ΑΠΕ.

Συνδυάζοντας τέλος την κατανομή του παραμένοντος φορτίου κατά το δεύτερο κύκλο βελτιστοποίησης με τα αποτελέσματα του πρώτου, οπότε και στόχο αποτέλεσε η μεγιστοποίηση της ανάκτησης απορρίψεων αιολικής ενέργειας για την κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών του εικονικού αντλιοστασίου, η συμμετοχή των ΑΠΕ αγγίζει το 65%, σε αντιπαραβολή με το αρχικό 12.8%. Το αντίστοιχο προφίλ κατανομής και σταθμισμένων συντελεστών διείσδυσης ΑΠΕ παρουσιάζεται εξ ολοκλήρου στο Σχήμα 12, διαιρεμένο στο τμήμα των ανακτώμενων απορρίψεων και της κατανομής εν συνεχεία του

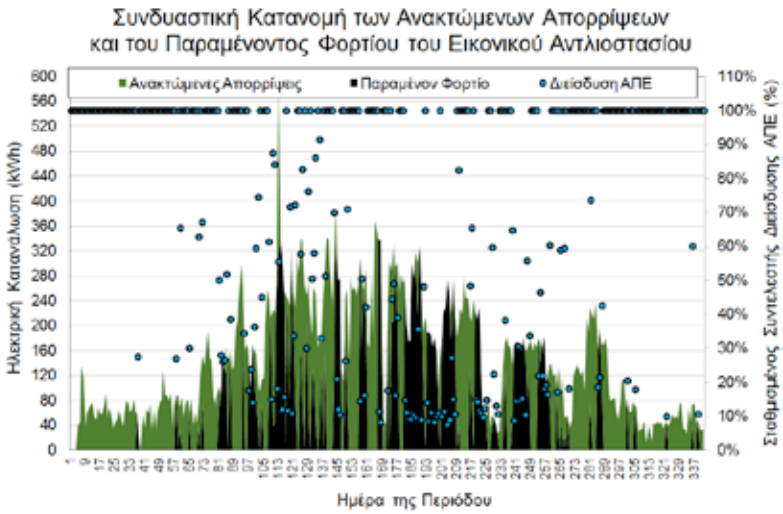
παραμένοντος φορτίου άντλησης, στα πλαίσια εφαρμογής της προτεινόμενης διεπίπεδης στρατηγικής βέλτιστης ένταξης εικονικού αντλιοστασίου η οποία αναπτύχθηκε στη συγκεκριμένη εργασία.



Σχήμα 10: Σύγκριση ανακτώμενων απορρίψεων αιολικής ενέργειας και παραμένοντος φορτίου άντλησης κατόπιν εφαρμογής της πρώτης φάσης βελτιστοποίησης της προτεινόμενης διεπίπεδης στρατηγικής ένταξης – απόκρισης ζήτησης



Σχήμα 11: Κατανομή παραμένοντος φορτίου άντλησης και επιτευχθείσας διείσδυσης ΑΠΕ κατόπιν εφαρμογής της δεύτερης φάσης βελτιστοποίησης της προτεινόμενης διεπίπεδης στρατηγικής ένταξης – απόκρισης ζήτησης



Σχήμα 12: Εξέλιξη ανακτώμενων απορρίψεων αιολικής ενέργειας και κατανομής παραμένοντος φορτίου άντλησης και επιτευχθείσας διείσδυσης ΑΠΕ κατόπιν εφαρμογής και της δεύτερης φάσης βελτιστοποίησης της προτεινόμενης διεπίπεδης στρατηγικής ένταξης – απόκρισης ζήτησης

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στη συγκεκριμένη εργασίας αναπτύχθηκε ολοκληρωμένη μεθοδολογία για τη διερεύνηση στρατηγικών απόκρισης ζήτησης σε κορεσμένα νησιωτικά ηλεκτρικά δίκτυα, έχοντας ως στόχο τη μεγιστοποίηση της απορρόφησης ενέργειας από ΑΠΕ. Πιο συγκεκριμένα, αναπτύχθηκε διεπίπεδη στρατηγική βέλτιστης ένταξης εικονικού αντλιοστασίου στα πλαίσια κατάρτισης προημερήσιου προγραμματισμού και στη βάση αφενός ανάκτησης απορρίψεων αιολικής ενέργειας, αφετέρου ελαχιστοποίησης της απορρόφησης συμβατικής παραγωγής ενέργειας για την κάλυψη των αντίστοιχων ηλεκτρικών αναγκών. Η προτεινόμενη μεθοδολογία εφαρμόσθηκε στο ηλεκτρικό σύστημα Κω-Καλύμνου με το εικονικό αντλιοστάσιο να αναφέρεται σε σωρευτική εκπροσώπηση των δημοτικών αντλιοστασίων της νήσου Τήλου, σε μια πρώτη προσπάθεια αξιολόγησης εφαρμογής παρόμοιων στρατηγικών σε μικρής κλίμακας εγκαταστάσεις σε σχέση τόσο με το ευρύτερο ηλεκτρικό σύστημα στο οποίο εντάσσονται, όσο και με το αντίστοιχο δυναμικό απορρίψεων προς αξιοποίηση.

Στο πλαίσιο αυτό, χρησιμοποιώντας πραγματικές μετρήσεις απορροφούμενης κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας των αντλητικών συστημάτων καθώς και επίσημα δεδομένα αλλά και αποτελέσματα προσομοίωσης για το ηλεκτρικό ενεργειακό ισοζύγιο του συστήματος Κω-Καλύμνου, πραγματοποιήθηκε εφαρμογή της μεθοδολογίας μέσω ντετερμινιστικής προσέγγισης. Με βάση τα αποτελέσματα της εφαρμογής, το εικονικό αντλιοστάσιο αυξάνει την απορρόφηση ΑΠΕ κατά ~46% μέσω ανάκτησης απορρίψεων αιολικής ενέργειας και κατά ένα πρόσθετο ~6.5% μέσω μετάθεσης σε ώρες υψηλότερης διείσδυσης ΑΠΕ, οδηγώντας έτσι σε συνολική απορρόφηση της τάξης του 65% σε ετήσια σχεδόν βάση. Αναλογιζόμενοι στο σημείο αυτό την προοπτική δυναμικής τιμολόγησης για ανάλογα σχήματα, είναι σαφές πως παρόμοιες στρατηγικές σωρευτικής εκπροσώπησης προσφέρουν σε όρους ευελιξίας εξασφαλίζοντας οφέλη τόσο στην πλευρά της τελικής κατανάλωσης όσο και στην πλευρά της παραγωγής.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

«Η εργασία υλοποιήθηκε στο πλαίσιο της Δράσης ΕΡΕΥΝΩ – ΔΗΜΙΟΥΡΓΩ - ΚΑΙΝΟΤΟΜΩ και συγχρηματοδοτήθηκε από το Ευρωπαϊκό Ταμείο Περιφερειακής Ανάπτυξης (ΕΤΠΑ) της Ευρωπαϊκής Ένωσης και εθνικούς πόρους μέσω του Ε.Π. Ανταγωνιστικότητα, Επιχειρηματικότητα & Καινοτομία (ΕΠΑνΕΚ) (κωδικός έργου:Τ2ΕΔΚ-01578)».

Οι συγγραφείς της ερευνητικής εργασίας θα ήθελαν να εκφράσουν τις ευχαριστίες τους προς το Δήμο Τήλου για τη διάθεση προς επεξεργασία των τεχνικών χαρακτηριστικών και των απαιτούμενων δεδομένων λειτουργίας των δημοτικών αντλιοστασίων του νησιού.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Kaldellis, J. K., Tzanes, G. T., Papapostolou, C., Kavadias, K., Zafirakis, D., 2017, “Analyzing the Limitations of Vast Wind Energy Contribution in Remote Island Networks of the Aegean Sea Archipelagos,” Energy Procedia, 142, pp. 787-792.

[2] Rodrigues, E. M. G., Godina, R, Santos, S. F., Bizuayehu, A. W., Contreras, J., Catalão, J. P. S., 2014, “Energy storage systems supporting increased penetration of renewables in islanded systems,” Energy, 75, 2014, pp. 265-280.

[3] Groppi, D., Pfeifer, A., Garcia, D. A., Krajačić, G., Duić, N., 2021, “A review on energy storage and demand side management solutions in smart energy islands,” Renew. Sustain. Energy Rev., 135, 110183.

[4] Fridgen, G., Keller, R., Körner, M. F., Schöpf, M., 2020, “A holistic view on sector coupling,” Energy Policy, 147, 111913.

[5] Heinisch, V., Göransson, L., Erlandsson, R., Hodel, H., Johnsson, F., Odenberger, M., “Smart electric vehicle charging strategies for sectoral coupling in a city energy system,” Appl. Energy, 288, 116640.

[6] Jimenez-Navarro, J. P., Kavvadias,K., Filippidou, F., Pavičević, M., Quoilin, S., 2020, “Coupling the heating and power sectors: The role of centralised combined heat and power plants and district heat in a European decarbonised power system,” Appl. Energy, 270, 115134.

[7] De Stercke, S., Chaturvedi, V., Buytaert, W., Mijic, A., 2020, “Water-energy nexus-based scenario analysis for sustainable development of Mumbai,” Environ. Model. Softw., 134, 104854.

[8] Papapostolou, C. M., Tzanes, G. T., Kondili, E. M., 2019. “Optimisation of the integrated water – energy systems in small group of islands communities,” Comput. Aided Chem. Eng., 46, pp. 1735-1740.

[9] Gikas, P., Tchobanoglous, G., 2009, “Sustainable use of water in the Aegean Islands,” J. Environ. Manage., 90(8), pp. 2601-2611.

[10] Zafirakis, D., Tzanes G., amd Kaldellis, J. K., 2017, “An advanced microgrid simulator for stand-alone and market-dependent energy strategies,” Proc 2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Milan, Italy, pp. 1-6, doi: 10.1109/EEEIC.2017.7977623.

ΦΥΣΙΚΗ ΤΩΝ ΚΤΙΡΙΩΝ

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΟΥ ΑΣΤΙΚΟΥ ΜΙΚΡΟΚΛΙΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΥΠΙΚΩΝ ΚΤΙΡΙΑΚΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΑΣΤΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΤΗΣ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

Στέλλα Τσόκα

Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Α.Π.Θ,
e-mail: stsoka@civil.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο πλαίσιο του αναλυτικού υπολογισμού ενεργειακής απόδοσης κτιρίων και στην πρόταση στρατηγικών εξοικονόμησης ενέργειας και μείωσης εκπεμπόμενων ρύπων, η χρήση λεπτομερών εργαλείων δυναμικής προσομοίωσης με ωριαίο βήμα καθίσταται ολοένα και συχνότερη έναντι της απλούστερης στατικής, μηνιαίας μεθόδου. Ωστόσο, τα αντίστοιχα λογισμικά δυναμικής προσομοίωσης χρησιμοποιούν κλιματικά δεδομένα που βασίζονται σε μακροχρόνιες καταγραφές μετεωρολογικών σταθμών σε περιαστικές περιοχές, μη λαμβάνοντας έτσι υπόψη τις πολύπλοκες διεργασίες μεταξύ των κτιριακών όγκων, της ηλιακής ακτινοβολίας και της ταχύτητας ανέμου και οι οποίες καθορίζουν το αστικό κλίμα.

Στοχεύοντας στην ακριβέστερη προσομοίωση των κτιριακών ενεργειακών απαιτήσεων και διασφαλίζοντας παράλληλα ένα λογικό υπολογιστικό κόστος η παρούσα εργασία προτείνει μια νέα μεθοδολογία για τη δημιουργία τυπικών κλιματικών αρχείων, απαραίτητων για τις δυναμικές ενεργειακές προσομοιώσεις, τα οποία λαμβάνουν υπόψιν τις ιδιαιτερότητες του τοπικού μικροκλίματος της εκάστοτε περιοχής μελέτης συναρτήσει της μορφολογίας και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της. Συγκεκριμένα, η υπολογιστική διαδικασία βασίζεται στην διασύνδεση τριών εργαλείων: (α) του μοντέλου μικροκλίματος ENVI-met, (β) του στοχαστικού μοντέλου παρεμβολής Meteonorm και (γ) του μοντέλου δυναμικής ενεργειακής προσομοίωσης κτιρίων EnergyPlus και εφαρμόζεται εδώ σε 4 αστικές περιοχές της Θεσσαλονίκης με διαφορετικά μορφολογικά χαρακτηριστικά. Μικροκλιματικές προσομοιώσεις πραγματοποιούνται αρχικά με το μοντέλο μικροκλίματος για τις 4 επιλεγμένες περιοχές μελέτης και για 12 αντιπροσωπευτικές μέρες (μία για κάθε μήνα του έτους). Οι υπολογισθείσες μικροκλιματικές παράμετροι κάθε περιοχής μελέτης εξάγονται από το ENVI-met και οι μέσες ημερήσιες τιμές αυτών εισάγονται στο στοχαστικό μοντέλο παρεμβολής Meteonorm ώστε να δημιουργηθούν τα αντιπροσωπευτικά για κάθε περιοχή, ωριαία κλιματικά αρχεία (Urban Specific Weather Datasets, USWDs). Οι παραγόμενες χρονοσειρές χρησιμοποιούνται τελικά ως δεδομένο εισαγωγής για τις δυναμικές ενεργειακές προσομοιώσεις τυπικών κτιριακών μονάδων με το εργαλείο δυναμικής προσομοίωσης EnergyPlus.

Η συγκριτική αξιολόγηση των ετήσιων ενεργειακών απαιτήσεων θέρμανσης και ψύξης των εξεταζόμενων κτιριακών μονάδων ανέδειξε την επιρροή των μικροκλιματικών συνθηκών στην εκτίμηση της ενεργειακής τους απόδοσης. Συγκεκριμένα, οι ετήσιες απαιτήσεις θέρμανσης των εξεταζόμενων αμόνωτων και μονωμένων κτιριακών μονάδων προέκυψαν χαμηλότερες όταν οι τοπικές συνθήκες λήφθησαν υπόψη αντί των κλιματικών παραμέτρων του αρχείου αναφοράς. Ωστόσο, η θετική επίδραση των αυξημένων θερμοκρασιών αέρα των 4 αστικών περιοχών στις ετήσιες απαιτήσεις θέρμανσης αντισταθμίζεται από τη σημαντική άνοδο των ψυκτικών αναγκών καλοκαίρι..

Λέξεις Κλειδιά: δυναμική προσομοίωση, ενεργειακές απαιτήσεις κτιρίων, υπολογιστική σύζευξη, μικροκλίμα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η κοινοτική οδηγία 2002/91/ΕC καλεί τα κράτη μέλη να αναπτύξουν μεθοδολογίες υπολογισμού ενεργειακής απόδοσης κτιρίων, στοχεύοντας στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και της αντίστοιχης εκπομπών ρύπων και στην πρόταση μέτρων βελτίωσης της κτιριακής ενεργειακής απόδοσης [1]. Δεδομένης της απαιτούμενης ακρίβειας υπολογισμών, κρίνεται απαραίτητη η χρήση λεπτομερών εργαλείων δυναμικής προσομοίωσης με ωριαίο βήμα, αντί της απλούστερης στατικής μηνιαίας μεθόδου. Ωστόσο, τα αντίστοιχα λογισμικά δυναμικής προσομοίωσης ενεργειακής απόδοσης κτιρίων χρησιμοποιούν κλιματικά δεδομένα που βασίζονται σε μακροχρόνιες καταγραφές μετεωρολογικών σταθμών που βρίσκονται σε περιαστικές περιοχές. Στην περίπτωση όμως που εξετάζεται η ενεργειακή συμπεριφορά ενός κτιρίου μέσα στο πυκνό δομημένο περιβάλλον, η χρήση των παραπάνω κλιματικών δεδομένων έχει ως αποτέλεσμα την παράλειψη των πολύπλοκων διεργασιών που συντελούνται μεταξύ των κτιριακών όγκων, της ηλιακής ακτινοβολίας και της ταχύτητας ανέμου, οι οποίες καθορίζουν το αστικό κλίμα.

Η διαφοροποίηση των κλιματικών παραμέτρων που εντοπίζονται μέσα στον αστικό ιστό, συγκριτικά με αυτές των περιαστικών περιοχών, έγκειται στις υψηλότερες θερμοκρασίες αέρα που εντοπίζονται στις αστικές περιοχές σε σχέση με τις αντίστοιχες θερμοκρασίες της υπαίθρου. Το επονομαζόμενο φαινόμενο αστικής θερμικής νησίδας αποδίδεται στην αλληλεπίδραση διαφόρων παραγόντων οι οποίες αφορούν στη σταδιακή απώλεια φύτευσης, την αντικατάσταση φυσικών υλικών με αντίστοιχα αδιαπέρατα, την αυξημένη πυκνότητα δόμησης η οποία επηρεάζει αφενός την αποβολή θερμικής ακτινοβολίας προς τον ουρανό, αφετέρου την ταχύτητα ανέμου μέσα στα αστικά φαράγγια και την ανθρωπογενή θερμότητα, εκλυόμενη από τα μέσα μεταφοράς [2]. Υψηλότερες θερμοκρασίες αέρα στα αστικά κέντρα σε σχέση με τις περιαστικές περιοχές έχουν παρατηρηθεί σε διάφορες πόλεις παγκοσμίως με τους επιστήμονες να επισημαίνουν πως στο μέλλον, αναμένονται ακόμα υψηλότερες θερμοκρασίες αέρα, καθώς η διαρκής κλιματική μεταβολή των τελευταίων δεκαετιών, δρα συμπληρωματικά στο φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας ([3-5]).

Φαίνεται λοιπόν πως η υπόθεση πως οι κλιματικές συνθήκες σε μια αστική γειτονιά είναι αντίστοιχες με αυτές μιας περιαστικής περιοχής μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά σφάλματα και αποκλίσεις στον υπολογισμό των ενεργειακών απαιτήσεων ενός κτιρίου που βρίσκεται μέσα στον πυκνό αστικό ιστό. Η ακριβής προσομοίωση των ενεργειακών του απαιτήσεων, προϋποθέτει επομένως μια πιο αναλυτική προσέγγιση μέσω της οποίας θα εξασφαλίζεται λεπτομερής γνώση των μικροκλιματικών παραμέτρων της περιοχής μελέτης. Σε αυτό το πλαίσιο, μέθοδοι διαφορετικής πολυπλοκότητας έχουν χρησιμοποιηθεί από τους μελετητές προκειμένου να ληφθεί υπόψιν η επίδραση του αστικού μικροκλίματος στον υπολογισμό της ενεργειακής απαίτησης κτιρίων μέσω εργαλείων δυναμικής προσομοίωσης. Σε ορισμένες έρευνες χρησιμοποιήθηκαν κλιματικά δεδομένα που μετρήθηκαν μέσα στην περιοχή μελέτης [3, 6, 7] προκειμένου να τροποποιηθεί το υπάρχον ωριαίο κλιματικό αρχείο. Παρόλο που η χρήση επιτόπου μετρήσεων μικροκλίματος αποτελεί μία απλή και πρακτική μέθοδο, παρουσιάζει σημαντικά μειονεκτήματα που σχετίζονται αφενός με την ποιότητα και διάρκεια των μετρήσεων και αφετέρου με την πιθανότητα ακραίων συνθηκών κατα τη περίοδο μέτρησης οι οποίες δεν μπορούν να θεωρηθούν τυπικές για την περιοχή. Στοχεύοντας σε ακόμα μεγαλύτερη ακρίβεια ενεργειακών υπολογισμών, πρόσφατες έρευνες πραγματοποίησαν σύζευξη μοντέλων μικροκλίματος με εργαλεία δυναμικής ενεργειακής προσμοίωσης κτιρίων [8-12]. Στη συγκεκριμένη υπολογιστική προσέγγιση, τα εξαγόμενα αποτελέσματα των μοντέλων μικροκλίματος, τα οποία εκφράζουν με ακρίβεια το σύνολο των μικροκλιματικών συνθηκών γύρω από το εξεταζόμενο κτίριο, χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισαγωγής στα λογισμικά δυναμικής προσομοίωσης, αυξάνοντας έτσι την ακρίβεια των ενεργειακών υπολογισμών. Ωστόσο, δεδομένου πως οι προσομοιώσεις του μικροκλίματος με τα αντίστοιχα υπολογιστικά εργαλεία είναι ιδιαίτερα χρονοβόρες, οι έρευνες που πραγματοποίησαν την αντίστοιχη υπολογιστική σύζευξη περιορίστηκαν σε υπολογισμούς σε ημερήσιο ή σε εβδομαδιαίο επίπεδο αντί για ολόκληρο έτος [8, 9, 11-13]. Παρά τη σημαντική βελτίωση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων των κτιριακών ενεργειακών απαιτήσεων, οι υπολογισμοί σε ετήσια παρά σε ημερήσια ή εβδομαδιαία βάση είναι απαραίτητοι ώστε να προκύψει μια σφαιρική εικόνα εικόνα της επίδρασης του μικροκλίματος στην ενεργειακή συμπεριφορά κτιρίων, κάτω από διαφορετικές μετεωρολογικές συνθήκες.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω στοιχεία η παρούσα εργασία στοχεύει στην πρόταση μιας νέας μεθοδολογικής προσέγγισης, η οποία λαμβάνει υπόψη την επίδραση του μικροκλίματος στις κτιριακές ενεργειακές απαιτήσεις σε ετήσια βάση, με παράλληλη βελτιστοποίηση και περιορισμό του υπολογιστικού κόστους. Πιο συγκεκριμένα, η προτεινόμενη μεθοδολογία στοχεύει στη δημιουργία

τυπικών κλιματικών αρχείων, απαραίτητων για τις δυναμικές ενεργειακές προσομοιώσεις, τα οποία λαμβάνουν υπόψιν τις ιδιαιτερότητες του τοπικού μικροκλίματος της εκάστοτε περιοχής μελέτης, συναρτήσει της μορφολογίας και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της. Η προτεινόμενη υπολογιστική μέθοδος, τα βήματα της οποίας παρουσιάζονται στην επόμενη ενότητα, εφαρμόζεται εδώ σε 4 αστικές περιοχές της Θεσσαλονίκης με διαφορετικές μικροκλιματικές παραμέτρους, ως επακόλουθο των διαφορετικών μορφολογικών και γεωμετρικών χαρακτηριστικών τους.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η προτεινόμενη υπολογιστική μέθοδος βασίζεται στην διασύνδεση τριών εργαλείων: (α) του μοντέλου μικροκλίματος ENVI-met, (β) του στοχαστικού μοντέλου παρεμβολής Meteonorm και (γ) του μοντέλου δυναμικής ενεργειακής προσομοίωσης κτιρίων EnergyPlus. Συγκεκριμένα:

- Μικροκλιματικές προσομοιώσεις πραγματοποιούνται με το μοντέλο μικροκλίματος ENVI-met για τις 4 επιλεγμένες περιοχές μελέτης και για 12 αντιπροσωπευτικές μέρες (μία για κάθε μήνα), ο ορισμός των οποίων βασίζεται σε στατιστική ανάλυση μακροχρόνιων καταγραφών κλιματικών παραμέτρων. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να γίνει η παρακάτω διευκρίνιση: από την υφιστάμενη βιβλιογραφία προκύπτει πως η δημιουργία τυπικών ωριαίων κλιματικών αρχείων για μια περιοχή μελέτης, θα απαιτούσε τη στατιστική ανάλυση μακροχρόνιων καταγραφών κλιματικών παραμέτρων. Έτσι, αντίστοιχα για τη δημιουργία των USWDs (αντιπροσωπευτικά για κάθε περιοχή, ωριαία κλιματικά αρχεία) θα χρειαζόταν προσομοιώσεις μικροκλίματος για πολλά έτη. Ωστόσο, καθώς οι προσομοιώσεις μικροκλίματος είναι εξαιρετικά χρονοβόρες, ακολουθείται μία διαφορετική προσέγγιση: Αντί να προσομοιωθούν πολλά έτη, προσομοιώνονται 12 αντιπροσωπευτικές μέρες, μία για κάθε μήνα του έτους. Το κάθε αρχείο USWD θα δημιουργηθεί στη συνέχεια από τα εξαγόμενα αποτελέσματα αυτών των 12 προσομοιώσεων για κάθε περιοχή.
- Για το σκοπό αυτό, εφαρμόζεται το εξειδικευμένο εργαλείο Meteonorm [14] στο οποίο ο χρήστης μπορεί να εισαγάγει μέσες μηνιαίες τιμές των βασικών κλιματικών. Επομένως, οι υπολογισθείσες μικροκλιματικές παράμετροι κάθε περιοχής μελέτης εξάγονται από το ENVI-met και οι μέσες ημερήσιες τιμές αυτών εισάγονται στο στοχαστικό μοντέλο παρεμβολής Meteonorm ώστε να δημιουργηθούν τα αντιπροσωπευτικά για κάθε περιοχή, ωριαία κλιματικά αρχεία (Urban Specific Weather Datasets, USWDs).Παράλληλα με την ανάπτυξή των USWDs, δημιουργείται ένα επιπλέον ωριαίο κλιματικό αρχείο, ένα "κλιματικό αρχείο αναφοράς " (Reference Weather Dataset RWD) που αντιστοιχεί σε μια θέση αναφοράς του μετεωρολογικού σταθμός του Α.Π.Θ ο οποίος βρίσκεται στην οροφή του κτιρίου του Τμήματος Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας Α.Π.Θ. Σε αντίθεση με τα USWDs, το δημιουργούμενο αρχείο αναφοράς θα μπορούσε θεωρητικά να χρησιμοποιηθεί για κάθε περιοχή μελέτης μέσα στην πόλη καθώς δε λαμβάνονται υπόψη συγκεκριμένες μικροκλιματικές συνθήκες.
- Τέλος, οι παραγόμενες χρονοσειρές οι οποίες αντιστοιχούν σε αντιπροσωπευτικά έτη για κάθε μία περιοχή μελέτης (USWDs) και το κλιματικό αρχείο αναφοράς (RWD), χρησιμοποιούνται ως δεδομένο εισαγωγής για τις δυναμικές ενεργειακές προσομοιώσεις τυπικών κτιριακών μονάδων με το εργαλείο δυναμικής προσομοίωσης κτιρίων EnergyPlus. Για λόγους σύγκρισης τα γεωμετρικά και τυπολογικά χαρακτηριστικά της κτιριακής μονάδας παραμένουν ίδια και άρα οι διαφοροποιήσεις που προκύπτουν στις ενεργειακές απαιτήσεις θέρμανσης και ψύξης, οφείλονται στα διαφορετικά ωριαία κλιματικά αρχεία. Η συγκριτική ανάλυση των υπολογισθέντων ενεργειακών απαιτήσεων θέρμανσης και ψύξης θα δώσει περαιτέρω πληροφορίες σχετικά με την διαφορετική ενεργειακή απαίτηση λόγω διαφοροποιημένων κλιματικών συνθηκών στις αστικές περιοχές (σύγκριση USWD-RWD).

2.1. Περιοχές μελέτης και ορισμός αντιπροσωπευτικών ημερών

Η επιλογή των 4 περιοχών μελέτης βασίζεται σε εμπειρική χωρική ανάλυση του αστικου ιστού της πόλης της Θεσσαλονίκης, με έμφαση στους δήμους Θεσσαλονίκης και Καλαμαρίας οι οποίοι, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της απογραφής του 2011, συγκεντρώνουν τα μεγαλύτερο πληθυσμό. Η μορφολογία των 4 περιοχών διαφοροποιείται ως προς την πυκνότητα δόμησης (Ds), το ποσοστό διαπερατών/φυτεμένων επιφανειών (Ps), το λόγο ύψος κτιρίου/πλάτος οδού (H/W) κλπ. Τα βασικά μορφολογικά χαρακτηριστκά των 4 περιοχών μελέτης είναι τα εξής:

- 1η περιοχή: Πιττακού: Ds=33%, Ps=9%, H/W= 1.0-1.5
- 2η περιοχή: Μητούδη: Ds=45%, Ps=3%, H/W= 1.0-2.4

- 3η περιοχή: Βαφοπούλου: Ds=30%, Ps=15%, H/W= 0.8-1.1
- 4η περιοχή: Γαβριηλίδου: Ds=26%, Ps=10%, H/W= 0.5-1.0

Σε κάθε γειτονιά, εξετάζεται η ενεργειακή απόδοση 2 τυπικών κτιριακών μονάδων (στον 1ο και στον 3ο όροφο) ενώ τα κτίρια στα οποία ανήκουν οι κτιριακές μονάδες, θεωρούνται πως βρίσκονται μέσα σε αστικά φαράγγια με παρόμοιο προσανατολισμό. Τα γεωμετρικά και τυπολογικά χαρακτηριστικά της κτιριακής μονάδα παραμένουν ίδια σε όλες τις περιοχές μελέτης. Στην εικόνα 1 παρουσιάζονται οι 4 περιοχές μελέτης (εικόνα 1.α) και τα αντίστοιχα αστικά φαράγγια, μέσα στα οποία βρίσκονται οι τυπικές κτιριακές μονάδες, η ενεργειακή απόδοση των οποίων εξετάζεται (Εικόνα 1.β).Παράλληλα, με κίτρινη ένδειξη στην Εικόνα 1.α σημειώνεται το σημείο όπου τοποθετήθηκε κατάλληλος μετρητικός εξοπλισμός (Εικόνα 1.γ) τη χρονική περίοδο 09/2015-08/2016 ώστε να προκύψουν τα απαραίτητα στοιχεία για την αξιολόγηση και βαθμονόμηση του μικροκλιματικού μοντέλου.

Εικόνα 1: Περιοχές μελέτης και τα αντίστοιχα αστικά φαράγγια, μέσα στα οποία βρίσκονται οι τυπικές κτιριακές μονάδες, η ενεργειακή απόδοση των οποίων εξετάζεται.

Επόμενο βήμα αποτελεί η επιλογή αντιπροσωπευτικών ημερών για τις μικροκλιματικές προσομοιώσεις με το λογισμικό ENVI-met. Ως αντιπροσωπευτική χαρακτηρίζεται η μέρα, τα κλιματικά χαρακτηριστικά της οποίας έχουν τη μικρότερη δυνατή απόκλιση από τις αντίστοιχες μακροχρόνιες τιμές [15]. Στην παρούσα έρευνα, για τον προσδιορισμό τους χρησιμοποιήθηκε βάση δεδομένων μέσων ημερήσιων τιμών θερμοκρασίας αέρα για την περίοδο 1958-2000 όπως αυτές προέκυψαν από

τον μετεωρολογικό σταθμό του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Η αναλυτική μεθοδολογία καθορισμού των αντιπροσωπευτικών ημερών για την πόλη της Θεσσαλονίκης βασίζεται στα παρακάτω βήματα [16].

- Για κάθε μέρα κάθε μήνα, υπολογίστηκε η μέση ημερήσια τιμή θερμοκρασίας αέρα, για το σύνολο της περιόδου. Για παράδειγμα, γιατην 1^{η} Ιανουαρίου

$$T_{air}{}^{1st}{}_{mean} = (T^{air}{}_{aver_1st_1958} + T^{air}{}_{aver_1st_1959} + T^{air}{}_{aver_1st_1960} + \ldots\ldots + T^{air}{}_{aver_1st_2000})/n \quad (1)$$

Όπου n το σύνολο των ετών.

- Για κάθε μήνα, ορίστηκε η διάμεσος των προηγούμενων υπολογισθέντων μέσων τιμών

$$Median\ \{T^{1st}{}_{mean,}\ T^{2nd}{}_{mean}\ \ldots T^{31st}{}_{mean}\} \quad (2)$$

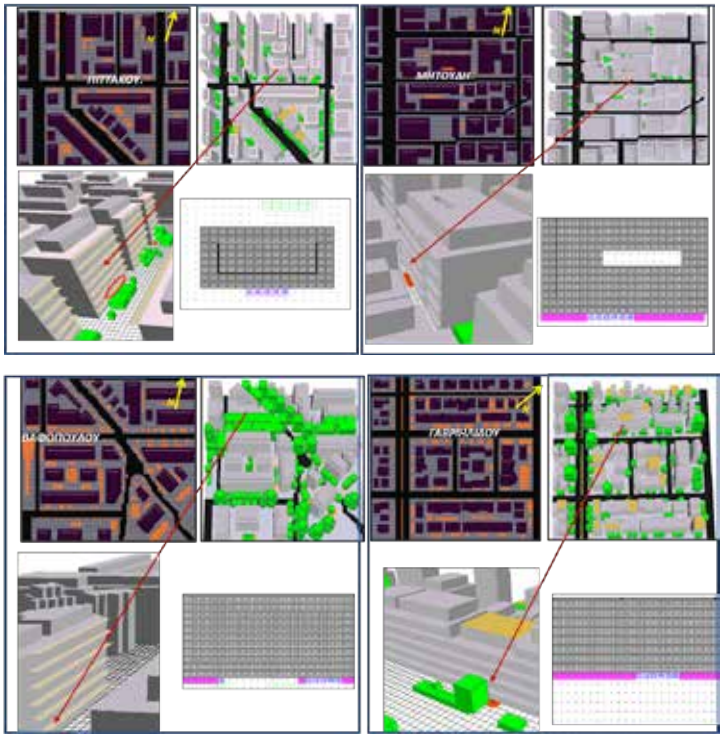
- Για κάθε μέρα της περιόδου Σεπτέμβριος 2015-Αύγουστος 2016 (περίοδος κατά την οποία έγιναν οι επιτόπου μετρήσεις θερμοκρασίας αέρα και σχετικής υγρασίας) υπολογίστηκε η απόκλιση της μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας από την αντίστοιχη για κάθε μήνα διάμεσο. Ως αντιπροσωπευτική θεωρήθηκε η μέρα της οποίας μέση ημερήσια θερμοκρασία έχει τη μικρότερη δυνατή απόκλιση από την αντίστοιχη διάμεσο. Εφαρμόζοντας την παραπάνω διαδικασία προκύπτουν οι 12 αντιπροσωπευτικές μέρες για τη Θεσσαλονίκη οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Αντιπροσωπευτικές μέρες για τη Θεσσαλονίκη και η αντίστοιχη απόκλιση της μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας από την αντίστοιχη για κάθε μήνα διάμεσο

Επιλεγμένη αντιπροσωπευτική μέρα	Απόκλιση	Επιλεγμένη αντιπροσωπευτική μέρα	Απόκλιση
4 Ιανουαρίου 2016	7%	22 Ιουλίου 2016	0.7%
8 Φεβρουαρίου 2016	11%	10 Αυγούστου 2016	5.5%
28 Μαρτίου 2016	2.7%	24 Σεπτεμβρίου 2015	0.6%
21 Απριλίου 2016	1.8%	1 Οκτωβρίου 2015	1.8%
16 Μαίου 2016	2%	26 Νοεμβρίου 2015	3.3%
1 Ιουνίου 2016	1.1%	20 Δεκεμβρίου 2015	2.7%

2.2. Προσομοιώσεις με το λογισμικό ENVI-met και εξαγωγή αποτελεσμάτων

Για κάθε μία από τις 12 αντιπροσωπευτικές ημέρες που καθορίστηκαν προηγουμένως, πραγματοποιήθηκαν στη συνέχεια, οι μικροκλιματικές προσομοιώσεις για τις 4 περιοχές μελέτης με το λογισμικό ENVI-met, ένα τρισδιάστατο αριθμητικό μη υδροστατικό μοντέλο που στηρίζεται στους βασικούς νόμους της ρευστομηχανικής και της θερμοδυναμικής και έχει σχεδιαστεί ώστε να προσομοιώνει την αλληλεπίδραση μεταξύ επιφανειών-φυτεύσεων-αέρα μέσα στο αστικό περιβάλλον [17]. Τα βασικά δεδομένα εισαγωγής για την προσομοίωση αφορούν αφενός στο γεωμετρικό μοντέλο της περιοχής, αφετέρου στο αρχείο ρυθμίσεων στο οποίο εισάγονται τα απαραίτητα μετεωρολογικά δεδομένα στα πλευρικά όρια του μοντέλου. Η κάτοψη και η τρισδιάστατη απεικόνιση των γεωμετρικών μοντέλων των περιοχών μελέτης παρουσιάζονται στην Εικόνα 2. Όλες οι περιοχές μελέτης καλύπτουν μία επιφάνεια 200m x 200m και σχεδιάστηκαν με διαστάσεις στοιχείου καννάβου (grid size) 1.5m x 1.5m x 3.0m (x,y,z). Σχετικά με τις οριακές συνθήκες προσομοίωσης για κάθε αντιπροσωπευτική μέρα, οι ωριαίες τιμές θερμοκρασίας αέρα και σχετικής υγρασίας, η μέση ταχύτητα ανέμου στα 10m και η μέση θερμοκρασία εδάφους προέκυψαν από τις καταγραφές του μετεωρολογικού σταθμού του Α.Π.Θ. Οι οπτικές και θερμικές ιδιότητες των κατακόρυφων και οριζόντιων επιφανειών του μοντέλου λήφθηκαν σύμφωνα με την ΤΟΤΕΕ 2 [18]. Για την τραχύτητα εδάφους και τη σχετική υγρασία σε ύψος 2.5 km από το έδαφος, χρησιμοποιήθηκαν οι προεπιλογές του ENVI-met. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 48 μικροκλιματικές προσομοιώσεις (4 περιοχές μελέτης x 12 αντιπροσωπευτικές μέρες) ενώ η επάρκεια του μοντέλου να προσεγγίζει σωστά τις μικροκλιματικές συνθήκες κάθε περιοχής καθ'ολη τη διάρκεια του έτους αξιολογήθηκε με χρήση επιτόπου καταγραφών θερμοκρασίας αέρα και σχετικής υγρασίας. Η διαδικασία αξιολόγησης του μοντέλου περιγράφεται στην επόμενη ενότητα.

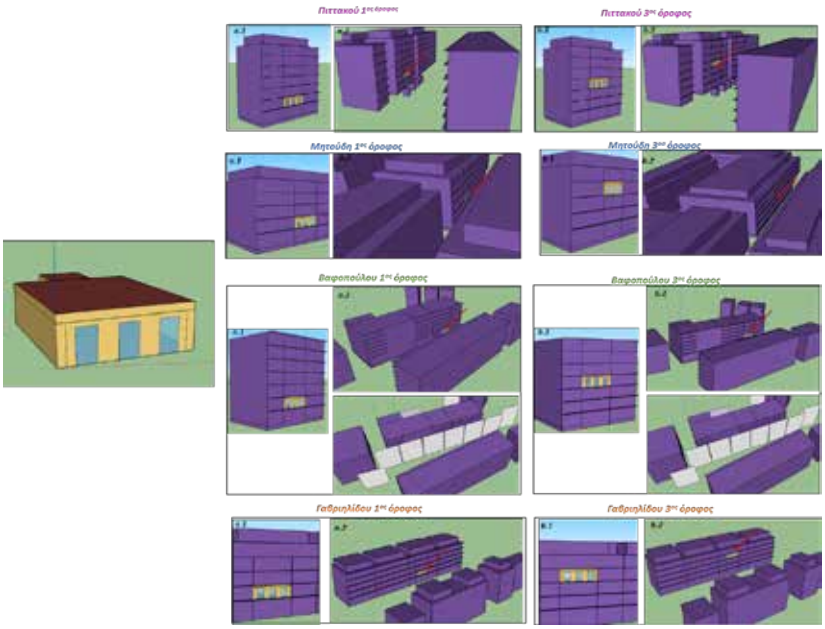


Εικόνα 2: Κάτοψη και τρισδιάστατη απεικόνιση των 4 περιοχών μελέτης, ένδειξη των κτιρίων στα οποία βρίσκονται οι εξεταζόμενες τυπικές κτιριακές μονάδες και απεικόνιση των 'receptor points'

Μετά το πέρας των μικροκλιματικών προσομοιώσεων, για κάθε μία από τις αντιπροσωπευτικές ημέρες, εξήχθησαν τα ωριαία αποτελέσματα θερμοκρασίας αέρα, σχετικής υγρασίας και ταχύτητας ανέμου, όπως αυτά υπολογίστηκαν για το το τμήμα του εξωτερικού περιβάλλοντος που είναι σε επαφή με την εκτεθειμένη όψη του διαμερίσματος. Θεωρώντας πως τα ύψη του ισογείου και του τυπικού ορόφου είναι 4.5 m και 3.5 m αντίστοιχα, για την τυπική κτιριακή μονάδα του 1ου ορόφου και του 3ου ορόφου, τα μικροκλιματικά στοιχεία εξάγονται μεταξύ των υψών 4.5 m-7.5 m και 10.5 m-13.5 m αντίστοιχα. Στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι μέσες ημερήσιες τιμές αυτών, οι οποίες εισήχθησαν στο Meteonorm προκειμένου να δημιουργηθουν τα ωριαία κλιματικά αρχεία κάθε περιοχής (USWDs). Στην εικόνα 2 φαίνεται η θέση των κτιρίων στα οποία βρίσκονται οι εξεταζόμενες κτιριακές μονάδες σε κάθε περιοχή μελέτης όπως επίσης και τα 5 σημεία μπροστά από την εκτεθένη όψη τους, για τα οποία εξήχθησαν τα αποτελέσματα του ENVI-met.

2.3. Δυναμικές ενεργειακές προσομοιώσεις των τυπικών κτιριακών μονάδων

Το επόμενο βήμα περιλαμβάνει τις δυναμικές προσομοιώσεις ενεργειακής απόδοσης με το λογισμικό EnergyPlus χρησιμοποιώντας τόσο τα USWDs όσο και την RWD ώστε να αξιολογηθεί η επίδραση των μικροκλιματικών συνθηκών στις θερμικές και ψυκτικές απαιτήσεις των εξεταζόμενων κτιριακών μονάδων. Οι προσομοιώσεις διεξάγονται αρχικά για την υπάρχουσα διαμόρφωση του κελύφους, στην οποία δεν υπάρχει θερμομόνωση και για ένα μονωμένο σενάριο, σύμφωνα με τις απαιτήσεις του ισχύοντος Κανονισμού Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων. Η εξεταζόμενη τυπική κτιριακή μονάδα θεωρείται πως είναι ενδιάμεσο διαμέρισμα (αδιαβατικές πλευρικές όψεις) και έχει επιφάνεια 80m^2.



Εικόνα 3: γεωμετρικό μοντέλο της τυπικής κτιριακής μονάδας (ίδιο για κάθε περιοχή μελέτης) και η θέση της στο κτίριο και στο αστικό φαράγγι κάθε περιοχής μελέτης

Πίνακας 2: Το προφίλ λειτουργίας των εξεταζόμενων κτιρ που λήφιακών μονάδων ποτ λήφθηκε υπόψη στην προσομοίωση της ενεργειακής συμπεριφοράς τους.

Παράμετρος	Μονάδα	Τιμή	Περίοδος λειτουργίας
Κατοίκηση	Άτομα/100 m^2	5	7/7, 12/12 Συντελεστής παρουσίας 100%: 00:00-07:00, 17:00-00:00, 50%: 07:00-17:00
Φυσικός αερισμός	m^3/s/άτομο	0,042	Σύμφωνα με το ωράριο λειτουργίας
Νυχτερινός αερισμός	Εναλλαγές/ ώρα	5	Κατά τη θερινή περίοδο, από 00:00 έως 08:00, όταν η εξωτερική θερμοκρασία είναι χαμηλότερη από την εσωτερική κατά τουλάχιστον 1°C.
Αερισμός διείσδυσης	Εναλλαγές/ώρα	0,5	24/24
Φωτισμός	W/m^2	6,4	12/12 Συντελεστής παρουσίας 0: 00:00-07:00 Συντελεστής παρουσίας 0,75: 07:00-00:00
Θερμοστάτης(θερμανσης)	°C	20	Περίοδος θέρμανσης
Θερμοστάτης (ψύξης)	°C	26	Περίοδος ψύξης
Θερμικά κέρδη από χρήστες	W/άτομο	80	Σύμφωνα με το ωράριο λειτουργίας
Θερμικά κέρδη από συσκευές	W/m^2	4	Σύμφωνα το ωράριο λειτουργίας

Προκειμένου να υπολογιστούν με ακρίβεια τα ηλιακά θερμικά κέρδη, σχεδιάστηκαν στο EnergyPlus όλα τα γειτονικά κτίρια κάθε περιοχής, λαμβάνοντας υπόψη τα ίδια γεωμετρικά στοιχεία με αυτά που θεωρήθηκαν για τη μικροκλιματική προσομοίωση. Στην Εικόνα 3 παρουσιάζεται το γεωμετρικό μοντέλο της τυπικής κτιριακής μονάδας (ίδιο για κάθε περιοχή μελέτης) καθώς επίσης και η θέση της στο κτίριο και στο αστικό φαράγγι κάθε περιοχής μελέτης. Ιδιαίτερα για την περιοχη της Βαφοπούλου όπου υπάρχουν πολύ ψηλά φυλλοβόλα δέντρα τύπου *'acer'*, προστέθηκαν στο μοντέλο του EnergyPlus στοιχεία σκίασης με μεταβαλλόμενη διαπερατότητα ανά εποχή, ώστε να προσεγγιστούν με ακρίβεια τα ηλιακά θερμικά κέρδη των εξεταζόμενων κτιριακών μονάδων,Αναφορικά με τα σενάρια λειτουργίας των κτιριακών μονάδων, αυτά λήφθησαν σύμφωνα με τις κατευθύνεις των Εθνικών Τεχνικών Οδηγιών (Τ.Ο.ΤΕΕ) για κτίρια κατοικίας και παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1. Αξιολόγηση του λογισμικού ENVI-met

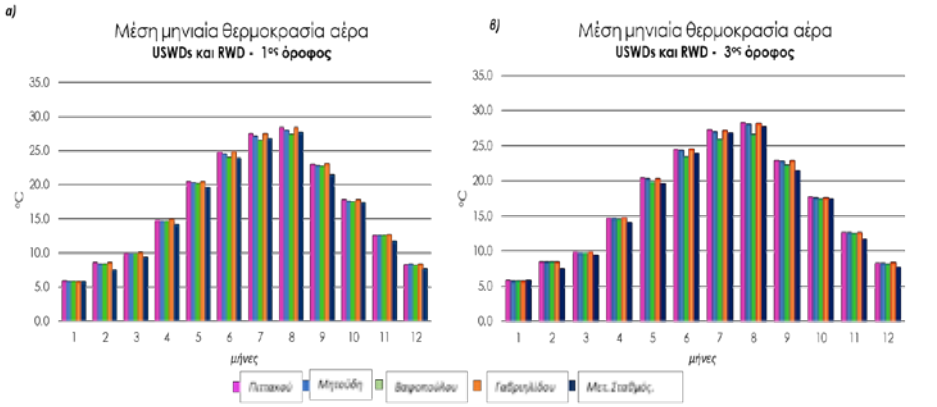
Αρχικά, ελέγχθηκε η επάρκεια του μοντέλου μικροκλίματος ENVI-met να προσεγγίζει με ακρίβεια τις πραγματικές μικροκλιματικές συνθήκες των 4 περιοχών μελέτης. Η αξιολόγηση του μοντέλου βασίστηκε στη σύγκριση των ωριαίων τιμών θερμοκρασίας αέρα, όπως αυτές μετρήθηκαν μέσα στις 4 περιοχές μελέτης, με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Για το σκοπό αυτό υπολογίστηκαν βασικοί δείκτες σφάλματος όπως η Τετραγωνική Ρίζα Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος (Root mean square error (RMSE)) και το μέσο απόλυτο σφάλμα (Mean Absolute Error (MAE)) ενώ η σύγκριση έγινε για τις αντιπροσωπευτικές μέρες του Ιανουαρίου, του Απριλίου, του Ιουλίου και του Οκτωβρίου, (μία για κάθε εποχή του έτους), ώστε να ελεγχθεί η ακρίβεια του μοντέλου κάτω από διαφορετικές κλιματικές συνθήκες. Από τη σύγκριση προέκυψε ότι το μοντέλο ENVI-met μπορεί να προσεγγίσει επαρκώς τις μικροκλιματικές συνθήκες των 4 περιοχών μελέτης και συγκεκριμένα να υπολογίσει με ακρίβεια τη θερμοκρασία αέρα κάτω από διαφορετικές κλιματικές συνθήκες. Συγκεκριμένα, κατά τη θερινή και εαρινή περίοδο και για όλες τις περιοχές μελέτης, το λογισμικό φάνηκε να υπερεκτιμά τη θερμοκρασία αέρα τη νύχτα και να υποεκτιμά την ημερήσιες τιμές. Από την άλλη, τα αποτελέσματα για τη χειμερινή και φθινοπωρινή περίοδο, έδειξαν σταθερή υποεκτίμηση της θερμοκρασίας αέρα από το λογισμικό καθ'ολη τη διάρκεια της ημέρας προσομοίωσης. Ωστόσο, τόσο οι υπολογισθείσες τιμές των σφαλμάτων (Πίνακας 2) όσο και διαφοροποιήσεις μεταξύ των ωριαίων μετρήσεων και εκτίμησεων εμπίπτουν μέσα στις τιμές που έχουν ήδη αναφερθεί και γίνει αποδεκτές από τη βιβλιογραφία [17], καταδεικνύοντας έτσι την επάρκεια του μοντέλου και τη δυνατότητα περαιτέρω συνέχειας της παρούσας έρευνας.

Πίνακας 3: Εκτιμώμενες τιμές σφαλμάτων για τις 4 περιοχές μελέτης

		άνοιξη	καλοκαίρι	φθινόπωρο	χειμώνας
1η περιοχή Πιττακού	RMSE (°C)	1.14	1.02	1.55	0.85
	MAE (°C)	0.95	0.82	1.50	0.78
2η περιοχή Μητούδη	RMSE (°C)	1.19	1.35	1.15	1.35
	MAE (°C)	1.05	1.19	1.10	1.28
3η περιοχή Βαφοπούλου	RMSE (°C)	1.13	0.95	1.35	1.11
	MAE (°C)	1.0	0.80	1.29	1.05
4η περιοχή Γαβριηλίδου	RMSE (°C)	0.95	0.89	1.27	0.91
	MAE (°C)	0.90	0.70	1.15	0.80

3.2. Σύγκριση των ωριαίων κλιματικών αρχείων

Στη συνέχεια της ανάλυσης, συγκρίνεται η μέση μηνιαία θερμοκρασία αέρα, όπως προκύπτει από τις ωριαίες χρονοσειρές USWDs με τις αντίστοιχες τιμές του κλιματικού αρχείου αναφοράς RWD ώστε να εκτιμηθεί ο αντίκτυπος της διαφοροποιημένης αστικής μορφολογίας στις τοπικές μικροκλιματικές συνθήκες. Υπενθυμίζεται πως το αρχείο αναφοράς (RWD) προέκυψε από δεδομένα του μετεωρολογικού σταθμού του Α.Π.Θ ο οποίος είναι εγκατεστημένος μέσα στο πάρκο της πανεπιστημιούπολης όπου οι συνθήκες είναι ιδιαίτερα ευνοικές λόγω της σημαντικής παρουσίας φύτευσης, της χαμηλής πυκνότητας δόμησης και της μειωμένης έκλυσης ανθρωπογενούς θερμότητας.



Εικόνα 4: Κατανομή μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας αέρα, με βάση της τιμές των τοπικών μικροκλιματικ αρχείων για τις 4 περιοχές και του αρχείου αναφοράς

Η κατανομή της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας αέρα για κάθε εξεταζόμενη περιοχή μελέτης (δλδ. η θερμοκρασία αέρα που αντιστοιχεί στο στρώμα αέρα μπροστά από την εξεταζόμενη κτιριακή μονάδα) και για το κλιματικό αρχείο αναφοράς παρουσιάζεται στην εικόνα 4. Από την ανάλυση προκύπτει πως όλες οι αστικές περιοχές παρουσιάζουν υψηλότερη θερμοκρασία τόσο κατά τη χειμερινή όσο και τη θερινή περίοδο, σε σύγκριση με τις αντίστοιχες τιμές στη θέση αναφοράς (σ.σ. μετεωρολογικό σταθμό). Η μόνη εξαίρεση είναι η περιοχή της Βαφοπούλου όπου η υπολογισθείσα μέση μηνιαία θερμοκρασία αέρα τη θερινή περίοδο είναι χαμηλότερη της ανίστοιχης τιμής στο μετεωρολογικό σταθμό εξαιτίας της πολύ υψηλής φυτοκάλυψης και της επακόλουθης αυξημένης σκίασης των επιφανειών και του φυσικού δροσισμού μέσω της εξατμισοδιαπνοής. Επιπλέον, για όλες τις περιοχές μελέτης, οι μικρότερες διαφορές μεταξύ των τοπικών μικροκλιματικών αρχείων και του αρχείου αναφοράς εντοπίζονται τον Ιανουάριο λόγω των πολύ χαμηλών ηλιακών κερδών και της πρακτικά διαρκούς σκίασης των όψεων των εξεταζόμενων κτιριακών μονάδων. Από την άλλη, σημαντικές διαφορές μεταξύ των USWD και RWD εντοπίστηκαν για τη θερινή περίοδο, με τις μεγαλύτερες από αυτές να υπολογίζονται για την περιοχή της Γαβριηλίδου όπου δέχεται και τα περισσότερα ηλιακά θερμικά κέρδη, λόγω του μικρότερου λόγου ύψους/πλάτους οδού. Συγκεκριμένα, η εκτιμώμενη μέση μηνιαία θερμοκρασία αέρα το Μάιο, Ιούνιο και Ιούλιο, μπροστά από την κτιριακή μονάδα 1^{ου} ορόφου στην περιοχή Γαβριηλίδου είναι 5.0%, 4.0% και 2.8% αντίστοιχα υψηλότερη από την αντίστοιχη τιμή στο σταθμό αναφοράς, ήτοι 0.9°C, 0.85 ° C and 0.7°C. Από την άλλη, για την κτιριακή μονάδα του 1^{ου} ορόφου στο στενότερο αστικό φαράγγι της Μητούδη, οι διαφοροποιήσεις αυτές ειναι χαμηλότερες λόγω της αυξημένης σκίασης από τα γειτονικά κτίρια και υπολογίστηκαν ίσες με 0.7°C, 0.5°C and 0.3°C για τους μήνες Μάιο, Ιούνιο και Ιούλιο αντίστοιχα.

Στη συνέχεια συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα των USWD και υπολογίστηκαν οι διαφοροποιήσεις μεταξύ των εκτιμώμενων μηνιαίων τιμών Tair, όπως αυτές προέκυψαν για το εξωτερικό περιβάλλον μπροστά από τις κτιριακές μονάδες των 4 περιοχών μελέτης. Κατά τη χειμερινή περίοδο (δηλ. Δεκέμβριος-Φεβρουάριος), οι διαφορές μεταξύ όλων των περιοχών μελέτης είναι χαμηλές τόσο για τον 1^{ο} όσο και τον 3^{ο} όροφο και δεν ξεπερνούν τους 0.1^{o}C, κυρίως λόγω της μικρής επίδρασης της ηλιακής ακτινοβολίας (χαμηλό ηλιακό υψός και ένταση ηλιακής ακτινοβολίας). Από την άλλη πλευρά, οι μέγιστες διαφορές μεταξύ όλων των περιοχών μελέτης εντοπίστηκαν το καλοκαίρι (δηλαδή Ιούνιος-Αύγουστος) όταν το ύψος και η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας φτάνουν τις μέγιστες τιμές τους. Ενδεικτικά, η εκτιμώμενη μέση μηνιαία Tair μπροστά από την κτιριακή μονάδα του 1^{ου} και 3^{ου} ορόφου στη Βαφοπούλου είναι 1.0°C και 1.4°C αντίστοιχα χαμηλότερη από την αντίστοιχη τιμή στο αστικό φαράγγι Γαβριηλίδου τον Ιούλιο, δεδομένης της ισχυρής σκίασης που δημιουργούν τα ψηλά δέντρα της οδού, μπλοκάροντας έτσι την άμεσα προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία. Ένα πολύ μικρό ποσό ηλιακής ακτινοβολίας απορροφάται συνεπώς από το κτιριακό κέλυφος, μειώνοντας έτσι και τη θέρμανση του παρακείμενου στρώματος αέρα μέσω φαινομένων συναγωγής και ακτινοβολίας.

3.3. Εκτίμηση των ενεργειακών απαιτήσεων των κτιριακών μονάδων

Οι υπολογισμοί των ψυκτικών και θερμικών ενεργειακών απαιτήσεων των εξεταζόμενων κτιριακών μονάδων του 1^{ου} και 3^{ου} ορόφου κάθε περιοχής μελέτης πραγματοποιήθηκαν τόσο για τα USWDs όσο

και το RWD ενώ παράλληλα εξετάστηκαν οι περιπτώσεις μονωμένου και αμόνωτου κελύφους. Η συγκριτική αξιολόγηση των ετήσιων ενεργειακών απαιτήσεων θέρμανσης και ψύξης όλων των εξεταζόμενων κτιριακών μονάδων ανέδειξε τη σημαντική επιρροή των μικροκλιματικών συνθηκών στην εκτίμηση της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων. Ειδικότερα:

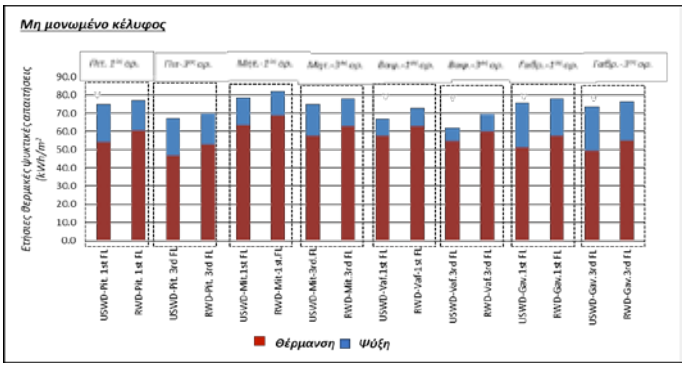
- Για τις ενεργειακές απαιτήσεις των κτιρικών μονάδων με αμόνωτο κέλυφος

Οι ετήσιες απαιτήσεις θέρμανσης και ψύξης όλων των εξεταζόμενων κτιριακών μονάδων, όπως αυτές υπολογίστηκαν για το μικροκλιματικό ωριαίο κλιματικό αρχείο κάθε περίπτωσης και για το αρχείο αναφοράς παρουσιάζονται στην Εικόνα 5. Όπως φαίνεται, η χρήση του RWD αντί του USWD οδηγεί γενικά σε μία υπερεκτίμηση των ετήσιων ενεργειακών απαιτήσεων η οποία κυμαίνεται από 3%-8.5% και 3.9%-12.7% για τις κτιριακές μονάδες του 1ου και του 3ου ορόφου αντίστοιχα. Ειδικότερα για τις κτιριακές μονάδες του 1ου ορόφου στην 1η και 2η περιοχή μελέτης (Πιττακού και Μητούδη), οι ετήσιες απαιτήσεις θέρμανσης, όπως υπολογίστηκαν με το τοπικό μικροκλιματικό αρχείο προέκυψαν 10.8% και 7.6% μικρότερες σε σχέση με την εκτίμηση για το αρχείο αναφοράς. Η διαφοροποίηση έγκειται στο ότι στην πρώτη περίπτωση λήφθηκε υπόψη η υψηλότερη θερμοκρασία αέρα μέσα στα αστικά φαράγγια ως επακόλουθο της αστικής θερμικής νησίδας. Αντίστοιχη είναι η τάση και στην περίπτωση του 3ου ορόφου όπου η εκτιμώμενη ετήσια απαίτηση θέρμανσης των κτιριακών μονάδων στην Πιττακού, Μητούδη, Βαφοπούλου και Γαβριηλίδου με χρήση του τοπικού μικροκλιματικού αρχείου υπερσκελίζει τους αντίστοιχους υπολογισμούς με το αρχείο αναφοράς κατά 11.5%, 8.3%, 8.6% και 10.1% αντίστοιχα. Ωστόσο, η θετική επίδραση των αυξημένων θερμοκρασιών αέρα των 4 αστικών περιοχών στις ετήσιες απαιτήσεις θέρμανσης αντισταθμίζεται από τη σημαντική άνοδο των ψυκτικών αναγκών καλοκαίρι καθώς αυτές βρέθηκαν αυξημένες κατά 13,4%-28,2%, με τη μεγαλύτερη διαφοροποίηση να προκύπτει για τις οδούς Πιττακού και Γαβριηλίδου όπου οι κτιριακές μονάδες παραμένουν εκτεθημένες στην ηλιακή ακτινοβολία το μεγαλύτερο διάστημα της ημέρας τη θερινή περίοδο. Ενδιαφέρον βέβαια παρουσιάζει το γεγονός πως οι κτιριακές μονάδες στην οδο Βαφοπούλου παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά εξαιτίας της διαρκούς σκίασης των επιφανειών του αστικού φαραγγιού από τα μεγάλα δέντρα που φτάνουν έως την οροφή των κτιρίων. Σε αντίθεση με τις άλλες 3 περιοχές μελέτης, οι ενεργειακοί υπολογισμοί με τη χρήση του τοπικού μικροκλιματικού αρχείου έδειξαν 5% και 28% μικρότερες ψυκτικές απαιτήσεις για την κτιριακή μονάδα του 1ου και 3ου ορόφου αντίστοιχα, σε σχέση με τις εκτιμήσεις για το αρχείο αναφοράς.

Πρέπει επίσης αναφερθεί, πως σημαντικές διαφορές στις ετήσιες ανάγκες θέρμανσης και ψύξης παρατηρήθηκαν επίσης μεταξύ των κτιριακών μονάδων του 1ου και 3ου ορόφου, που βρίσκονται στο ίδιο κτίριο κάθε περιοχής μελέτης, κυρίως λόγω των διαφορετικών ηλιακών κερδών. Τέλος, η σύγκριση των 4 αστικών περιοχών μελέτης κατέδειξε πως οι μικρότερες απαιτήσεις θέρμανσης εντοπίζονται για τις κτιριακές μονάδες που δέχονται τα μεγαλύτερα ποσά ηλιακής ακτινοβολίας ενώ το καλοκαίρι, οι μικρότερες ψυκτικές απαιτήσεις-έως και 2,5 φορές μικρότερες- παρατηρήθηκαν στις κτιριακές μονάδες της Βαφοπούλου που σκιάζονται διαρκώς λόγω της αυξημένης παρουσίας φυτεύσεων.

- Για τις ενεργειακές απαιτήσεις των κτιρικών μονάδων με μονωμένο κέλυφος

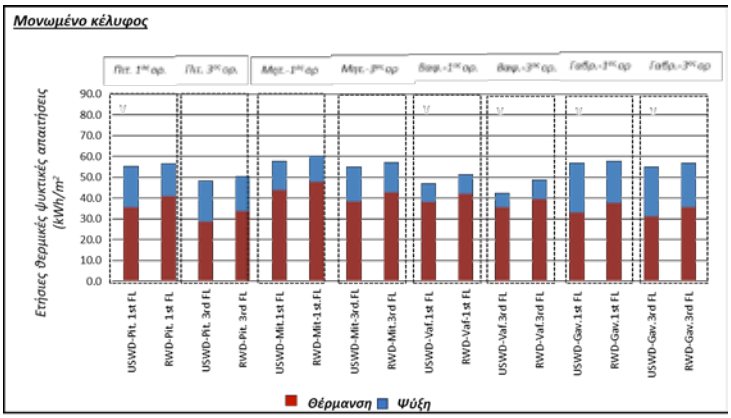
Σε πρώτη φάση, η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ αμόνωτων - μονωμένων κτιριακών μονάδων κατέδειξε αρχικά τη σημαντική συμβολή της θερμοπροστασίας του κελύφους στην ενεργειακή



Εικόνα 5: Ετήσιες απαιτήσεις θέρμανσης/ψύξης για το σύνολο των αμόνωτων κτιριακών μονάδων

ζήτηση. Συγκεκριμένα, και στις 4 περιοχές μελέτης, η υπόθεση μονωμένου κτιριακού κελύφους σύμφωνα με τις απαιτήσεις του ενεργειακού κανονισμού οδήγησε σε μείωση της εκτιμώμενης απαίτησης θέρμανσης κατα 30%-37% για όλες τις κτιριακές μονάδες, ανεξάρτητα από το κλιματικό αρχείο που χρησιμποιήθηκε (USWD και RWD). Ωστόσο, η εφαρμογή της εξωτερικής θερμομόνωσης είχε λιγότερο σημαντική επίδραση στην εκτιμώμενη ψυκτική απαίτηση, η διαφοροποίηση της οποίας δεν ξεπέρασε το 5% ανεξάρτητα του κλιματικού αρχείου. Ο λόγος της σημαντικότερης συμβολής της μόνωσης στην ενεργειακή ζήτηση των κτιριακών μονάδων τη χειμερινή έναντι της θερινής περιόδου έγκειται στο γεγονός πως οι περιοχές μελέτης βρίσκονται στην Κλιματική Ζώνη Γ, τη μία εκ των 2 ψυχρότερων κλιματικών ζωνών της χώρας. Δεδομένης της σημαντικά μεγαλύτερης διαφοράς θερμοκρασίας εσωτερικού-εξωτερικού περιβάλλοντος τη χειμερινή περίοδο σε σχέση με τη θερινή, η εφαρμογή θερμομόνωσης συμβάλει δραστικά στη μείωση της ροής θερμότητας διαμέσου των στοιχείων του κελύφους και άρα σε μικρότερες ενεργειακές απαιτήσεις.

Εν συνεχεία, όπως και στην περίπτωση των αμόνωτων κτιριακών μονάδων, η χρήση του RWD αντί του USWD οδήγησε στην υπερεκτίμηση των ετήσιων ενεργειακών απαιτήσεων κατά 2%-810% και 2.2%-13.5% για τις μονωμένες κτιριακές μονάδες του 1^{ου} και του 3^{ου} ορόφου αντίστοιχα. Γενικά, το θερμότερο αστικό περιβάλλον, όπως αυτό αποτυπώνεται μέσα από τα τοπικά μικροκλιματικά αρχεία, αποτέλεσε θετική παράμετρο ως προς την εκτίμηση των θερμικών ψυκτικών απαιτήσεων των κτιριακών μονάδων, γεγονός που αντισταθμίζεται από την αύξηση της ψυκτικής απαίτησης η οποία φτάνει το 15.9%, 11.2% and 13.9%, για τις κτιριακές μονάδες του 3^{ου} οροφου στην Πιττακού, Γαβριηλίδου και Μητούδη. Ξανά όπως και στην περίπτωση του αμόνωτου κελύφους, οι κτιριακές μονάδες της Βαφοπούλου παρουσιάζουν σημαντικά χαμηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις, όχι μόνο σε σχέση με τις υπόλοιπες περιοχές μελέτης αλλά και σε σχέση με τη θέση αναφοράς, εξαιτίας της πολύ πυκνής βλάστησης και της αντίστοιχης μείωσης των ηλιακών κερδών αφενός, του φυσικού δροσισμού μέσω εξατμισοδιαπνοής αφετέρου. Το σύνολο των αποτελεσμάτων για τις ενεργειακές απαιτήσεις και την απόδοση των εξεταζόμενων κτιριακών μονάδων παρουσιάζεται στην [19].



Εικόνα 6: Ετήσιες απαιτήσεις θέρμανσης/ψύξης για το σύνολο των μονωμένων κτιριακών μονάδων

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο ακριβής υπολογισμός των θερμικών και ψυκτικών ενεργειακών απαιτήσεων κτιρίων με εργαλεία δυναμικής προσομοίωσης ωριάιου βήματος προϋποθέτει τη γνώση των αντιπροσωπευτικών κλιματικών παραμέτρων στις οποίες υπόκειται το εξεταζόμενο κτίριο. Δεδομένου ότι η αντίστοιχη μακροχρόνια επιτόπου καταγραφή διαφόρων κλιματικών δεδομένων δεν είναι πάντα εφικτή, η παρούσα έρευνα πρότεινε μια υπολογιστική μεθόδο προκειμένου να λαμβάνονται υπόψη οι μικροκλιματικές παράμετροι της εκάστοτε περιοχής μελέτης στον υπολογισμό των κτιριακών ενεργειακών απαιτήσεων σε ετήσια βάση. Η προτεινόμενη μεθοδολογία η οποία στηρίζεται στη διασύνδεση του μοντέλου μικροκλίματος ENVI-met, του στοχαστικού μοντέλου παρεμβολής Meteonorm και του δυναμικού μοντέλου ενεργειακής προσομοίωσης EnergyPlus, εφαρμόστηκε σε 4 αστικές περιοχής της Θεσσαλονίκης, η οποία ανήκει στην κλιματική ζώνη Γ, μιας από τις δύο πιο ψυχρότερες ζώνες της Ελλάδας σύμφωνα με τα στοιχεία του ΚΕΝΑΚ. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης

κατέδειξαν τη σημαντική επίδραση της αστικής μορφολογίας και γεωμετρίας των περιοχών μελέτης στις τοπικές μικροκλιματικές παραμέτρους και κατ'επέκταση στις ετήσιες απαιτήσεις για θέρμανση και ψύξη. Ωστοσο, η ανάλυση διεξήχθη μόνο για τις τρέχουσες συνθήκες των 4 περιοχών μελέτης, ενώ δεν διερευνήθηκαν περαιτέρω μορφολογικές επεμβάσεις. Λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω παρατηρήσεις, τα πιθανά πεδία για περεταίρω έρευνα περιλαμβάνουν αφενός την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας σε αστικές περιοχές πόλεων που ανήκουν σε θερμότερες κλιματικές ζώνες, στις οποίες ως επι το πλείστον, οι ψυκτικές απαιτήσεις υπερτερούν των θερμικών αναγκών αφετέρου τη μελέτη της επίδρασης διαφόρων στρατηγικών όπως η εφαρμογή ψυχρών υλικών, πρόσθετων φυτεύσεων κλπ. στη διαφοροποίηση του τοπικού μικροκλίματος και κατ'επέκταση των κτιριακών ενεργειακών αναγκών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] E. Recast, Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast), Official Journal of the European Union, 18 (06) (2010) 2010.
[2] A.M. Rizwan, L.Y. Dennis, L. Chunho, A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island, Journal of Environmental Sciences, 20 (1) (2008) 120-128.
[3] C. Guattari, L. Evangelisti, C.A. Balaras, On the assessment of urban heat island phenomenon and its effects
on building energy performance: A case study of Rome (Italy), Energy and Buildings, https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.050 (2017).
[4] Q. Li, H. Zhang, X. Liu, J. Huang, Urban heat island effect on annual mean temperature during the last 50 years in China, Theoretical and Applied Climatology, 79 (3) (2004) 165-174.
[5] J. Tan, Y. Zheng, X. Tang, C. Guo, L. Li, G. Song, X. Zhen, D. Yuan, A.J. Kalkstein, F. Li, The urban heat island and its impact on heat waves and human health in Shanghai, International journal of biometeorology, 54 (1) (2010) 75-84.
[6] Y. Cui, D. Yan, T. Hong, J. Ma, Temporal and spatial characteristics of the urban heat island in Beijing and the impact on building design and energy performance, Energy, 130 (2017) 286-297.
[7] S. Magli, C. Lodi, L. Lombroso, A. Muscio, S. Teggi, Analysis of the urban heat island effects on building energy consumption, International Journal of Energy and Environmental Engineering, 6 (1) (2015) 91-99.
[8] X. Yang, L. Zhao, M. Bruse, Q. Meng, An integrated simulation method for building energy performance assessment in urban environments, Energy and buildings, 54 (2012) 243-251.
[9] K. Gobakis, D. Kolokotsa, Coupling building energy simulation software with microclimatic simulation for the evaluation of the impact of urban outdoor conditions on the energy consumption and indoor environmental quality, Energy and Buildings, (2017).
[10] T. Sharmin, K. Steemers, Exploring the effect of micro-climate data on building energy performance analysis, in: the 7th international conference of SuDBE2015 2015.
[11] J. Allegrini, V. Dorer, J. Carmeliet, Coupled CFD, radiation and building energy model for studying heat fluxes in an urban environment with generic building configurations, Sustainable Cities and Society, 19 (2015) 385-394.
[12] J. Allegrini, J. Carmeliet, Simulations of local heat islands in Zürich with coupled CFD and building energy models, Urban Climate, (2017).
[13] M. Santamouris, S. Haddad, M. Saliari, K. Vasilakopoulou, A. Synnefa, R. Paolini, G. Ulpiani, S. Garshasbi, F. Fiorito, On the Energy Impact of Urban Heat Island in Sydney. Climate and Energy Potential of Mitigation Technologies, Energy and Buildings, (2018).
[14] Meteotest, Meteonorm, Global Meteorological Database, Version 7.1, Handbook Part I, (2015).
[15] T. Tirabassi, S. Nassetti, The representative day, Journal of Atmospheric environment, 33 (15) (1999) 2427-2434.
[16] S. Tsoka, K. Tolika, T. Theodosiou, K. Tsikaloudaki, D. Bikas, A method to account for the urban microclimate on the creation of 'typical weather year'datasets for building energy simulation, using stochastically generated data, Energy and Buildings, 165 (2018) 270-283.
[17] S. Tsoka, A. Tsikaloudaki, T. Theodosiou, Analyzing the ENVI-met microclimate model's performance and assessing cool materials and urban vegetation applications–A review, Sustainable cities and society, 43 (2018) 55-76.
[18] ΤΟΤΕΕ2, Θερμοφυσικές Ιδιότητες Δομικών Υλικών και Έλεγχος της Θερμομονωτικής Επάρκειας των Κτηρίων
http://portal.tee.gr/portal/page/portal/SCIENTIFIC_WORK/GR_ENERGEIAS/kenak/files/TOTEE_20701-2_2017_TEE_1st_Edition.pdf, (2017).
[19] Tsoka, S. Urban Microclimate Analysis and Its Effect on the Buildings "Energy Performance". Ph.D. Thesis, Aristotle University of Thessaloniki, Department of Civil Engineering, Laboratory of Building Construction and Building Physics, Thessaloniki, Grecce, 2019.

ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΣΩΤΕΡΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΚΤΙΡΙΟΥ ΓΡΑΦΕΙΩΝ ΣΤΗ ΒΟΡΕΙΑ ΕΛΛΑΔΑ

Κωνσταντίνα Γκριτζάπη*, Γιώργος Πανάρας

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, Μπακόλα & Σιαλβέρα, Τ.Κ. 50132, Κοζάνη
e-mail: k.gritzapi@uowm.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο κτιριακός τομέας αποτελεί έναν από τους μεγαλύτερους καταναλωτές ενέργειας παγκοσμίως, σημειώνοντας ότι το ποσοστό αυτό για την ΕΕ είναι περίπου 40%. Ωστόσο, τα κτίρια διαθέτουν υψηλό δυναμικό εξοικονόμησης ενέργειας, δεδομένου ότι κτίρια γραφείων, όπως στην προκειμένη περίπτωση, δαπανούν τη μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας σε ανάγκες θέρμανσης, ψύξης και φωτισμού. Στην παρούσα εργασία, παρουσιάζεται η ανάλυση της ενεργειακής απόδοσης του κτιρίου του Εμπορικού και Βιομηχανικού Επιμελητηρίου Κοζάνης. Κύριοι στόχοι της είναι η βελτίωση των εσωτερικών συνθηκών, η μείωση των θερμικών απωλειών του κτιριακού κελύφους και της κατανάλωσης συμβατικής ενέργειας, καθώς προτείνεται η παραγωγή ενέργειας από συστήματα ανανεώσιμων πηγών επιτυγχάνοντας έτσι μια συνολική μείωση των εκπομπών CO_2.

Η ανάλυση υλοποιείται μέσω δυναμικής προσομοίωσης, όπου το εξεταζόμενο κτίριο σχεδιάζεται στο Revit της Autodesk και η προσομοίωση απόδοσης του κτιρίου εκτελείται στο Green Building Studio (GBS). Αρχικά, εξετάζεται το κτιριακό κέλυφος σχετικά με τους περιορισμούς του Κ.Εν.Α.Κ. Επιπλέον, τοποθετείται πειραματικός εξοπλισμός για την αξιολόγηση των πραγματικών συνθηκών θερμικής άνεσης και της ποιότητας αέρα εσωτερικού χώρου, δηλαδή της συγκέντρωσης CO_2 και της στάθμης φωτισμού. Τα απαιτούμενα τεχνικά χαρακτηριστικά του εγκατεστημένου ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού, προσδιορίζονται μέσω τοπικών επιθεωρήσεων, ενώ τα αποτελέσματα του αναπτυγμένου μοντέλου συγκρίνονται με πραγματικά δεδομένα κατανάλωσης ενέργειας.

Η εργασία ολοκληρώνεται με την αξιολόγηση ενεργειακών παρεμβάσεων που αποσκοπούν στη βελτίωση της θερμομόνωσης, της απόδοσης των ενεργειακών συστημάτων (HVAC) και κατά συνέπεια της συνολικής ενεργειακής απόδοσης του κτιρίου. Έτσι το αναβαθμισμένο κτίριο θα εξασφαλίσει σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας, μειωμένο λειτουργικό κόστος και βελτιωμένες εσωτερικές συνθήκες, συμβάλλοντας παράλληλα στην προστασία του περιβάλλοντος, όπως επιβεβαιώνεται από την εκτιμώμενη μείωση των εκπομπών CO_2 σε επίπεδο 41%. Ο προτεινόμενος συνδυασμός μετρήσεων εσωκλίματος και ενεργειακής ανάλυσης προσφέρει τη δυνατότητα ολοκληρωμένης προσέγγισης των συνθηκών και επιδόσεων του κτιρίου. Η παρουσιαζόμενη μεθοδολογία, συνδυάζει επιμέρους επικυρωμένα μεθοδολογικά εργαλεία, σε επίπεδο προσομοίωσης, μετρήσεων και επιθεώρησης, επιτυγχάνοντας την αξιόπιστη αξιολόγηση της παρούσας κατάστασης του κτιρίου, αλλά και του ενεργειακού, οικονομικού και περιβαλλοντικού οφέλους των ενεργειακών παρεμβάσεων.

Λέξεις Κλειδιά: *Εξοικονόμηση ενέργειας, Κτίρια, Εσώκλιμα, Ποιότητα αέρα, ΑΠΕ*

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διαρκώς αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας και αντιστοίχως η κατανάλωση της, αποτελούν ένα σημαντικό ζήτημα παγκοσμίως, τόσο για τη σωστή διαχείριση των ενεργειακών πόρων όσο για τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Ο κτιριακός τομέας (εμπορικά, δημόσιες υπηρεσίες, νοικοκυριά) είναι ο μεγαλύτερος καταναλωτής ενέργειας στην Ευρώπη, όπου σύμφωνα με στοιχεία της Eurostat [1] αντιπροσωπεύει το 41,7% της τελικής κατανάλωσης ενέργειας. Παράλληλα, τα κτίρια και ο κατασκευαστικός τομέας (που σχετίζεται με υλικά κατασκευής κτιρίων) είναι υπεύθυνα τουλάχιστον για το 35% της παγκόσμιας τελικής χρήσης ενέργειας και για το 40% των εκπομπών CO_2 που σχετίζονται με την ενέργεια [2]. Έτσι η Ευρωπαϊκή πολιτική εκδίδοντας σχετικές οδηγίες και πρότυπα, θέτει διαρκώς στόχους, όπως εξοικονόμηση ενέργειας, βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων και άντληση ενέργειας από συστήματα ΑΠΕ, για τη δημιουργία κτιρίων σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης (nZEBs: nearly Zero Energy Buildings) [3] και γενικά ενός βιώσιμου κτιριακού αποθέματος μέχρι το 2050. Απώτερος σκοπός είναι η δημιουργία κτιρίων θετικής ενέργειας (PEB: Positive or Plus Energy Buildings) [4], δηλαδή κτίρια αυτοπαραγωγοί (prosumers: PROdusers & conSUMERS) [5], με τη δυνατότητα τροφοδοσίας του ενεργειακού πλεονάσματος, το οποίο προέρχεται από ΑΠΕ, μέσω ενός έξυπνου δικτύου σε γειτονικά κτίρια με χαμηλότερη ενεργειακή απόδοση. Αυτό το καινοτόμο μοντέλο αναμένεται να συμπεριληφθεί στην νέα έκδοση της EPBD (European Performance Buildings Directive) έως το 2026.

Από την άλλη πλευρά, οι εσωτερικές περιβαλλοντικές συνθήκες είναι πολύ σημαντικές τόσο για την υγεία όσο και την ευημερία των χρηστών, καθώς οι άνθρωποι περνούν το 60-90% της ζωής τους σε κτίρια [6], μια τάση που συνεχώς αυξάνεται, ειδικά αυτή την περίοδο της πανδημίας Covid-19. Στην τελευταία έκδοση της EPBD 2018/844 [3], εκτός από στρατηγικές εξοικονόμησης και παροχής καθαρής και προσιτής ενέργειας στους πολίτες, εισάγονται και ενθαρρύνονται στρατηγικές βελτίωσης της θερμικής άνεσης των χρηστών, καθώς και των υγιεινών συνθηκών εσωτερικού περιβάλλοντος. Η εσωτερική περιβαλλοντική ποιότητα (IEQ: Indoor Environmental Quality) στοχεύει στην επικράτηση ιδανικών συνθηκών άνεσης, όπως θερμική [7], οπτική [8] και ακουστική [9] άνεση, καθώς και υψηλής ποιότητας αέρα [10] σε κτίρια και χώρους εργασίας. Στην περίπτωση των κτιρίων γραφείων όπως το εξεταζόμενο κτίριο, οι χρήστες περνούν το ένα τρίτο της ημέρας τους στον χώρο εργασίας, επομένως η πιθανή δυσαρέσκεια τους σχετικά με τις συνθήκες εσωτερικού περιβάλλοντος, μπορεί να οδηγήσει σε έλλειψη συγκέντρωσης και παραγωγικότητας [11]. Επομένως η ικανοποίηση των χρηστών θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και να αποτελεί σημαντικό παράγοντα στις στρατηγικές εξοικονόμησης ενέργειας.

Σύμφωνα με τις πρόσφατες ενεργειακές επιθεωρήσεις του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας [12], το 85% των δημόσιων κτιρίων γραφείων κατατάσσεται στις ενεργειακές κλάσεις Γ-Η, κάτι το οποίο αποδεικνύει την παλαιότητα και την χαμηλή ενεργειακή απόδοση τους. Τα μεγαλύτερο μερίδιο της ετήσιας καταναλισκόμενης πρωτογενούς ενέργειας χρησιμοποιείται για τις ανάγκες φωτισμού με μέση ετήσια κατανάλωση 133,4 kWh/m^2, ενώ ακολουθεί η ψύξη (115,5 kWh/m^2) και η θέρμανση χώρων (114,0 kWh/m^2). Επιπλέον, η κατανάλωση ενέργειας στα δημόσια κτίρια γραφείων δεν επηρεάζεται σημαντικά από την κλιματική ζώνη, εφόσον η απόκλιση των μέσων ετήσιων καταναλώσεων μεταξύ των ψυχρών (Γ & Δ) και ήπιων (Α & Β) κλιματικών ζωνών είναι της τάξης του 10%. Αξίζει να σημειωθεί ότι η πηγή ενέργειας με τη μεγαλύτερη συνεισφορά στο ενεργειακό ισοζύγιο της συγκεκριμένης τυπολογίας κτιρίου, αποτελεί η ηλεκτρική ενέργεια με ποσοστό 74,6%, ακολουθούν το πετρέλαιο με 17,3% και το φυσικό αέριο με 7,7%, ενώ η ηλιακή ενέργεια, η βιομάζα, η γεωθερμία και άλλες μορφές ΑΠΕ έχουν αμελητέα έως και μηδενική συνεισφορά [12].

Στην παρούσα εργασία υλοποιείται μια ανάλυση της ενεργειακής συμπεριφοράς και της ποιότητας εσωτερικού περιβάλλοντος ενός συγκεκριμένου κτιρίου γραφείων. Η μεθοδολογία περιλαμβάνει πειραματική διερεύνηση, μέσω μετρήσεων περιβαλλοντικών συνθηκών του εσωτερικού χώρου, καθώς και θεωρητική, μέσω της ενεργειακής συμπεριφοράς στο λογισμικό Revit της Autodesk. Πιο συγκεκριμένα, το υπό μελέτη κτίριο σχεδιάζεται και φέρει τα πραγματικά δομικά στοιχεία του κτιριακού του κελύφους, μέσω της σχεδίασης του στο Revit και η προσομοίωση της ενεργειακής του απόδοσης εκτελείται στο Green Building Studio (GBS), μια διαδικτυακή πλατφόρμα εξίσου της Autodesk. Τέλος, τα αποτελέσματα του ενεργειακού μοντέλου επικυρώνονται με πραγματικά δεδομένα κατανάλωσης ενέργειας. Η ανάλυση των δεδομένων των μετρήσεων και των αποτελεσμάτων του υπολογιστικού μοντέλου, επιτρέπουν τον προσδιορισμό και αξιολόγηση παρεμβάσεων αναβάθμισης του εσωτερικού περιβάλλοντος και της ενεργειακής συμπεριφοράς του κτιρίου.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1. Τοποθεσία και περιγραφή του κτιρίου γραφείων

Το Εμπορικό και Βιομηχανικό Επιμελητήριο Κοζάνης (Εικόνα 1) στεγάζεται σε ένα παλαιό (εκτιμώμενη χρονολογία κτίσης: τέλη δεκαετίας 1910) δημόσιο κτίριο γραφείων και βρίσκεται στο κέντρο της πόλης. Η πόλη της Κοζάνης ανήκει στην Περιφέρεια Δυτικής Μακεδονίας, στη Βόρεια Ελλάδα, και χαρακτηρίζεται από το ψυχρό της κλίμα λόγω υψομέτρου (περίπου 720 m). Σύμφωνα με την Τεχνική Οδηγία του ΤΕΕ 20701-3/2010 [13], η Κοζάνη κατατάσσεται στην ψυχρότερη κλιματική ζώνη της Ελλάδας, τη Δ.

Εικόνα 1: Γενική άποψη του Εμπορικού και Βιομηχανικού Επιμελητηρίου Κοζάνης [14]

Πρόκειται για ένα τριώροφο κτίριο συνολικής επιφάνειας περίπου 350 m^2. Αποτελείται κυρίως από χώρους γραφείων και μια μεγάλη αίθουσα συσκέψεων και παρουσιάσεων, καθώς και κουζίνες, αποθηκευτικούς χώρους, W.C., χολ και τον χώρο με τον θερμικό υποσταθμό της τηλεθέρμανσης. Ο Πίνακας 1 παρουσιάζει τους αντίστοιχους χώρους ανά όροφο. Το Επιμελητήριο Κοζάνης λειτουργεί καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, από Δευτέρα έως Παρασκευή και από τις 7 π.μ. έως τις 5 μ.μ.

Πίνακας 1: Η χρήση χώρων ανά όροφο

Όροφος	Χρήσεις χώρων
Ισόγειο	Είσοδος-Χολ, 3 Γραφεία, W.C, 2 Χολ, Αποθήκη, Υποσταθμός Τηλεθέρμανσης
Πρώτος	Είσοδος-Χολ, 5 Γραφεία, W.C, Κουζίνα, Χολ
Δεύτερος	Αίθουσα Παρουσιάσεων, 3 Γραφεία, W.C, Κουζίνα, Αποθήκη, Χολ

2.2. Κτιριακό κέλυφος

Το Autodesk Revit, είναι ένα διαδεδομένο BIM (Building Information Modeling) λογισμικό, το οποίο επιτρέπει την αξιόπιστη προσομοίωση ενεργειακής συμπεριφοράς κτιρίων, καθότι περιλαμβάνει όλες τις πληροφορίες ενός κτιρίου, όπως γεωμετρία, δομικά στοιχεία και τη μεταξύ τους χωρική σχέση, που απαρτίζουν την κατασκευή και τις ιδιότητες του (υλικά, λειτουργία, ενεργειακή συμπεριφορά), σε ένα τρισδιάστατο ψηφιακό μοντέλο. Τέτοια εργαλεία μοντελοποίησης/οπτικοποίησης κτιρίων χρησιμοποιούν εργαλεία δυναμικής προσομοίωσης για την εκτέλεση της ενεργειακής προσομοίωσης και είναι ιδιαίτερα βολικά στον χρήστη. Στην παρούσα μελέτη, χρησιμοποιείται ως εργαλείο ενεργειακής ανάλυσης το GBS, το οποίο βασίζεται στο λογισμικό ενεργειακής προσομοίωσης DOE-2 [15].

Η κατασκευή του κτιρίου αποτελείται κυρίως από οπτόπλινθους, οπλισμένο σκυρόδεμα και τσιμεντοκονίαμα. Το κτίριο διαθέτει κεραμοσκεπή και ξύλινα ανοίγματα μονού υαλοπίνακα. Κατά τη διάρκεια σχεδιασμού του κτιρίου στο Autodesk Revit, εισάγονται δεδομένα σχετικά με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τα υλικά των στρώσεων κάθε δομικού στοιχείου, έτσι το λογισμικό σύμφωνα με τη θερμική αγωγιμότητα κάθε υλικού υπολογίζει αντίστοιχα τον συντελεστή θερμοπερατότητας U [W/m^2K] κάθε δομικού στοιχείου. Η σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων της υπάρχουσας κατάστασης και των μέγιστων επιτρεπόμενων τιμών που παρέχει ο Κ.Εν.Α.Κ μέσω της Τεχνικής Οδηγίας 20701-2/2017 [16] για την κλιματική ζώνη Δ, αποδεικνύει ότι η μόνωση της εξωτερικής τοιχοποιίας, του δαπέδου, της οροφής και των παραθύρων κρίνεται θερμικά ανεπαρκής (Πίνακας 2). Επομένως θεωρείται

απαραίτητη η παρέμβαση στο περίβλημα του κτιρίου για τη βελτίωση της θερμομόνωσης αυτών των δομικών στοιχείων. Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς το κτίριο ανεγέρθηκε πριν την εφαρμογή του Ελληνικού Κανονισμού Θερμομόνωσης (4 Ιουλίου 1979) και δε φέρει κανένα είδος θερμομόνωσης. Επιπλέον πρόκειται για ένα παλιό κτίριο με μοναδικά επίσημα στοιχεία τα αρχιτεκτονικά του σχέδια, χωρίς επιπρόσθετες μελέτες όπως π.χ. μελέτη θερμομόνωσης.

Πίνακας 2: Συγκριτικός πίνακας των συντελεστών θερμοπερατότητας των δομικών στοιχείων του κτιριακού κελύφους (U) με τις θερμομονωτικές απαιτήσεις του Κ.Εν.Α.Κ (U_{max})

Δομικό στοιχείο	**U** ***[W/m²K]***	**U_{max}** ***[W/m²K]***
Εξωτερική τοιχοποιία	2,01	0,4
Δάπεδο	2,4	0,7
Οροφή	1,64	0,35
Εξωτερικές πόρτες	2,19	2,6
Παράθυρα	5,74	2,6

2.3. Εγκατεστημένα ενεργειακά συστήματα

Το εξεταζόμενο κτίριο έχει σημαντικές απαιτήσεις θέρμανσης λόγω των ειδικών χαρακτηριστικών της κλιματικής ζώνης Δ και των χαμηλών θερμοκρασιών κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Από την άλλη πλευρά έχει αμελητέες απαιτήσεις ψύξης λόγω θέσης και σκίασης από γειτονικά κτίρια και ψηλά δέντρα που βρίσκονται στον προαύλιο χώρο. Επιπλέον οι απαιτήσεις για ΖΝΧ είναι ελάχιστες. Ωστόσο ο φωτισμός είναι αρκετά σημαντικός για ένα κτίριο γραφείων και πρέπει να είναι επαρκής ειδικά στους κύριους χώρους, δηλαδή τα γραφεία.

Προκειμένου να καλύψει τις απαιτήσεις θέρμανσης και ΖΝΧ, το Επιμελητήριο Κοζάνης αξιοποιεί το τοπικό δίκτυο της Τηλεθέρμανσης (Τ/Θ). Το σύστημα της τηλεθέρμανσης Κοζάνης τροφοδοτείται και λειτουργεί με θερμική ισχύ που λαμβάνει από τρεις (3) Μονάδες του Α.Η.Σ. του Αγίου Δημητρίου της Δ.Ε.Η. και ειδικότερα μέσω της απομάστευσης ατμού από τη βαλβίδα μέσης πίεσης των ατμοστροβίλων ο οποίος θερμαίνει νερό σε υψηλή θερμοκρασία. Το νερό αυτό διανέμεται μέσω ενός δικτύου μονωμένων αγωγών σε πολλούς τελικούς χρήστες της πόλης. Σύμφωνα με στοιχεία της ΔΕΥΑΚ [17], το σύστημα Τ/Θ εξυπηρετεί 5500 κτίρια και 28000 διαμερίσματα. Το σύστημα Τ/Θ λειτουργεί συνήθως από αρχές Οκτωβρίου έως τέλη Μαΐου, ανάλογα τις τοπικές καιρικές συνθήκες. Παλαιότερα, το κτίριο χρησιμοποιούσε λέβητα πετρελαίου για να εξυπηρετήσει τις θερμικές του ανάγκες. Η ψύξη χώρων επιτυγχάνεται με φυσικό αερισμό μέσω των ανοιγμάτων, καθώς και με τη βοηθητική χρήση τοπικών κλιματιστικών μονάδων που βρίσκονται κυρίως σε χώρους γραφείων. Επιπλέον, ο φωτισμός παρέχεται από λαμπτήρες φθορισμού.

2.4. Πειραματικές μετρήσεις θερμικής άνεσης και ποιότητας αέρα εσωτερικού χώρου

Η αξιολόγηση των εσωτερικών συνθηκών βασίστηκε σε πειραματικές μετρήσεις οι οποίες πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια θερινής περιόδου, και συγκεκριμένα κατά το χρονικό διάστημα 18÷25/6/2018, με συχνότητα καταγραφής 6 μετρήσεις την ώρα. Ο πειραματικός εξοπλισμός (Πίνακας 3 & Εικόνα 2) αποτελούνταν από αισθητήρες HOBO, οι οποίοι κατέγραψαν παραμέτρους που σχετίζονται με τη θερμική άνεση, όπως η θερμοκρασία (Τ) και η σχετική υγρασία (RH) του εσωτερικού αέρα, η στάθμη φωτισμού (LI), καθώς και συσκευές TELAIRE που κατέγραψαν τις συγκεντρώσεις διοξειδίου του άνθρακα (Cco_2) για την εκτίμηση της ποιότητας του εσωτερικού αέρα. Επιπρόσθετα, τοποθετήθηκαν αισθητήρες HOBO εξωτερικά του κτιρίου με σκοπό την καταγραφή των αντίστοιχων εξωτερικών συνθηκών για λόγους σύγκρισης και αξιολόγησης του κτιριακού κελύφους, δηλαδή για να διαπιστωθεί πόσο συμβάλει στην προστασία και διατήρηση των εσωτερικών συνθηκών. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα μετρητικά όργανα τοποθετήθηκαν σε χώρους κύριας χρήσης, έτσι ώστε οι μετρήσεις να είναι αντιπροσωπευτικές της συνήθους λειτουργίας του κτιρίου και να αποφεύγεται η παρεμπόδιση της εύρυθμης λειτουργίας του.

Πίνακας 3: Περιγραφή των μετρητικών οργάνων και της θέσης τους στο κτίριο

Θέση		Μετρητικό όργανο		Μετρήσεις
		Τύπος	Κωδικός	
1ος Όροφος (NA) Γραφείο	Εσωτερικά	HOBO	C	T – RH – LI
		TELAIRE	C	Συγκεντρώσεις CO_2
	Εξωτερικά	HOBO	2	T – RH
Ισόγειο (BA) Γραφείο	Εσωτερικά	HOBO	E	T – RH – LI
		TELAIRE	B	Συγκεντρώσεις CO_2
Ισόγειο (N) Είσοδος	Εξωτερικά	HOBO	D	T – RH – LI

(α) *(β)*

Εικόνα 2: Κατόψεις του κτιρίου από το λογισμικό Revit και η θέση των μετρητικών οργάνων: α) ισόγειο β) 1ος όροφος

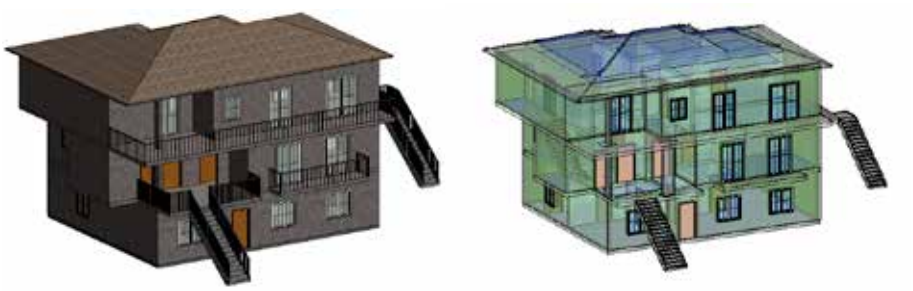
2.5. Ενεργειακή ανάλυση

Με την ολοκλήρωση της σχεδίασης του κτιρίου στο Autodesk Revit (Εικόνα 3α), ακολουθεί η δημιουργία χώρων και θερμικών ζωνών. Οι κτιριακοί χώροι και οι αντίστοιχες ενεργειακές απαιτήσεις διαφέρουν μεταξύ τους, ανάλογα με τη χρήση τους. Για αυτόν τον λόγο ορίζονται οι θερμικές συνθήκες για κάθε χώρο, π.χ. αν θερμαίνονται ή όχι, αν ψύχονται ή όχι, και αν είναι φυσικά ή μηχανικά αεριζόμενοι χώροι. Οι επιλογές της παρούσας αξιολόγησης συνοψίζονται στον Πίνακα 4. Επιπλέον στις θερμικές ζώνες του κτιρίου καθορίζονται τα επιθυμητά επίπεδα θερμοκρασίας και υγρασίας για κάθε περίοδο λειτουργίας. Σύμφωνα με την Τεχνική Οδηγία 20701-1/2017 [18], η συνιστώμενη θερμοκρασία και σχετική υγρασία για χώρους γραφείων είναι 20°C και 35% αντίστοιχα για τη χειμερινή περίοδο, ενώ 26°C και 45% αντίστοιχα για τη θερινή περίοδο. Επίσης η συνιστώμενη στάθμη φωτισμού είναι 500 lux για κτίρια γραφείων.

Σημαντικοί παράμετροι σε μια ενεργειακή ανάλυση είναι ο τύπος κτιρίου, το πρόγραμμα λειτουργίας και τα ενεργειακά συστήματα. Εφόσον ολοκληρωθούν οι ρυθμίσεις οι οποίες αντιπροσωπεύουν την πραγματική λειτουργία του κτιρίου, ακολουθεί η δημιουργία του ενεργειακού μοντέλου (Εικόνα 3β). Το ενεργειακό μοντέλο συνίσταται από την τρισδιάστατη γεωμετρική αναπαράσταση του κελύφους έτσι ώστε να είναι δυνατή η προσομοίωση και η ενεργειακή ανάλυση. Η ενεργειακή προσομοίωση μπορεί να εκτελεστεί και μέσω της ιστοσελίδας της Autodesk Green Building Studio για περισσότερες λεπτομέρειες και ποικίλα γραφήματα.

Πίνακας 4: Θερμαινόμενοι ή μη χώροι του κτιρίου

Χώροι	Συνθήκες
Γραφεία, Αίθουσα Παρουσιάσεων	Θέρμανση & Ψύξη
W.C, Κουζίνες	Θέρμανση
Είσοδοι-Χολ	Φυσικός αερισμός
Αποθήκες, Χολ, Υποσταθμός Τηλεθέρμανσης	Μη θερμαινόμενος χώρος



(α) *(β)*

Εικόνα 3: α) 3D όψη β) ενεργειακό μοντέλο του κτιρίου γραφείων

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1. Παράμετροι που επηρεάζουν την άνεση των χρηστών

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων, δηλαδή της θερμοκρασίας Τ, της σχετικής υγρασίας RH, της στάθμης φωτισμού LI και των συγκεντρώσεων διοξειδίου του άνθρακα Cco_2, εκφρασμένα με τις μέσες, ελάχιστες και μέγιστες τιμές τους, που αφορούν τους εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους του πρώτου ορόφου και του ισογείου παρουσιάζονται στους Πίνακες 5 & 6 αντίστοιχα. Όπως προαναφέρθηκε οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος 18÷25/6/2018 της θερινής περιόδου.

Πίνακας 5: Μετρήσεις εσωτερικά και εξωτερικά του πρώτου ορόφου

1ος Όροφος						
Παράμετρος	**Εσωτερικά *[HOBO C & TELAIRE C]***			**Εξωτερικά *[HOBO 2]***		
	Μέση	**Ελάχιστη**	**Μέγιστη**	**Μέση**	**Ελάχιστη**	**Μέγιστη**
Τ *[°C]*	22,5	21,1	23,8	19,3	16	25,2
RH *[%]*	54,7	43,4	68,6	56,3	33,7	80,9
LI *[lux]*	69,9	11,8	177,4	-	-	-
Cco_2 *[ppm]*	430,3	355,3	898,7	-	-	-

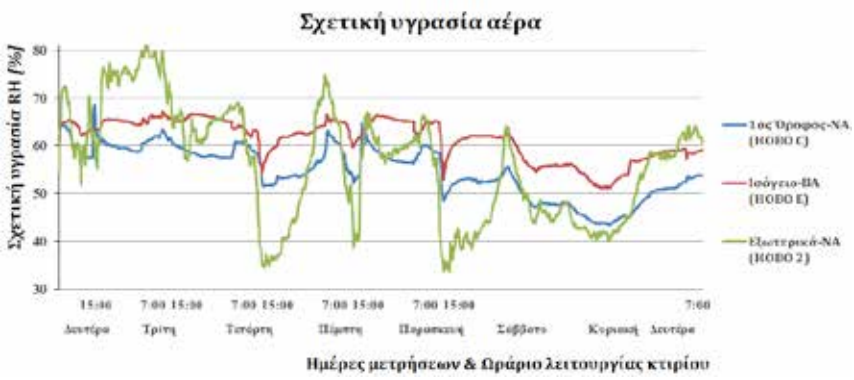
Πίνακας 6: Μετρήσεις εσωτερικά και εξωτερικά του ισογείου

Ισόγειο						
Παράμετρος	**Εσωτερικά *[HOBO E & TELAIRE B]***			**Εξωτερικά *[HOBO D]***		
	Μέση	**Ελάχιστη**	**Μέγιστη**	**Μέση**	**Ελάχιστη**	**Μέγιστη**
T *[°C]*	21,7	20,7	22,6	20,2	16,7	24,5
RH *[%]*	61,5	51,1	67,2	64,8	42,7	79,1
LI *[lux]*	206,5	27,6	311,4	439,3	3,9	2085,3
Cco_2 *[ppm]*	581	456	1136,1	-	-	-

Στην Εικόνα 4 παρουσιάζονται οι καταγραφές θερμοκρασίας για δύο χώρους κύριας χρήσης και του εξωτερικού περιβάλλοντος για όλη την περίοδο των μετρήσεων. Για το σύνολο των δύο χώρων, η θερμοκρασία κυμαίνεται σε ένα εύρος 21-24°C, το οποίο μπορεί να θεωρηθεί αποδεκτό σε επίπεδο θερμικής άνεσης [19]. Η διαφορά θερμοκρασίας που παρατηρείται μεταξύ του ισογείου και του πρώτου ορόφου είναι 1°C και φαίνεται να επηρεάστηκε από τη θέση του αισθητήρα. Πιο συγκεκριμένα, ο αισθητήρας του πρώτου ορόφου (HOBO C) βρισκόταν κοντά σε παράθυρο λαμβάνοντας μεγαλύτερα θερμικά φορτία λόγω του υαλοπίνακα, ενώ ο αισθητήρας του ισογείου (HOBO E) ήταν τοποθετημένος στη βορειοανατολική όψη, μακριά από ανοίγματα. Επιπλέον, δίνοντας έμφαση στο ωράριο λειτουργίας του κτιρίου (Δευτέρα - Παρασκευή & 07:00 - 15:00), παρατηρείται χαμηλότερη θερμοκρασία τις πρώτες πρωινές ώρες λειτουργίας, γεγονός που συνδέεται με τα ανοιχτά παράθυρα για φυσικό αερισμό και τις επίσης χαμηλές εξωτερικές θερμοκρασίες εκείνη την περίοδο. Στη συνέχεια, η εσωτερική θερμοκρασία αυξάνεται σταδιακά καθώς η άνοδος του ήλιου προκαλεί ολοένα και υψηλότερες εξωτερικές θερμοκρασίες. Αντίστοιχα η ομαλή μείωση της εσωτερικής θερμοκρασίας που παρατηρείται στο τέλος του ωραρίου λειτουργίας, οφείλεται στην καθοδική πορεία του ήλιου και στα γειτονικά κτίρια που επιφέρουν σκίαση, εμποδίζοντας την ηλιακή ακτινοβολία να φτάσει στα χαμηλότερα σημεία του κτιρίου. Αυτό αποδεικνύεται από το γεγονός ότι πρώτα σημειώνεται σταδιακή πτώση της εσωτερικής θερμοκρασίας στο ισόγειο και έπειτα στον πρώτο όροφο.

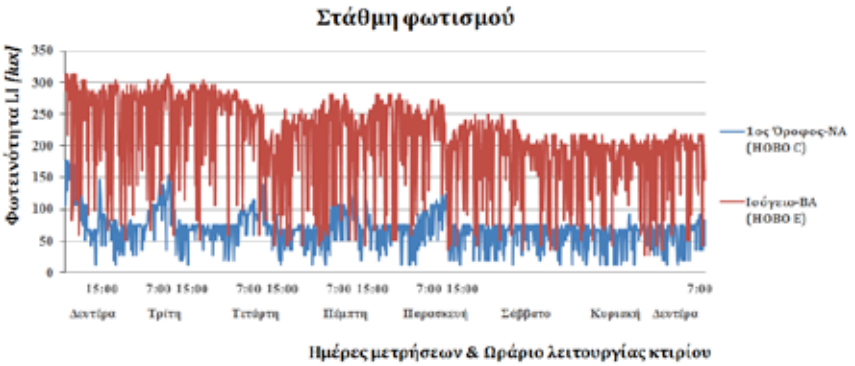
Εικόνα 4: Αποτελέσματα των μετρήσεων της θερμοκρασίας του αέρα

Όσον αφορά τη σχετική υγρασία, οι τιμές της σχετικής υγρασίας του εσωτερικού αέρα είναι υψηλότερες από τη συνιστώμενη (45%), καθώς η μέση τιμή είναι περίπου 58%, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5. Μια αιτία της ελαφρώς υψηλής σχετικής υγρασίας είναι το γεγονός ότι η θερμοκρασία είναι χαμηλότερη του σχετικού ορίου άνεσης. Οι διακυμάνσεις που σημειώνονται τις πρώτες πρωινές ώρες αλλά και προς το τέλος λειτουργίας του κτιρίου επιβεβαιώνουν τα ανοιχτά παράθυρα. Σε κάθε περίπτωση, οι παρατηρούμενες τιμές θεωρούνται αποδεκτές σύμφωνα με τα προτεινόμενα όρια θερμικής άνεσης [20]. Επίσης παρατηρείται ότι κατά τη διάρκεια της ημέρας, με την ηλιακή παρουσία, μειώνεται η υγρασία του περιβάλλοντος σε αντίθεση με τις νυχτερινές ώρες που βρίσκεται σε υψηλά επίπεδα.



Εικόνα 5: Αποτελέσματα των μετρήσεων της σχετικής υγρασίας του αέρα

Το υπάρχον σύστημα τεχνητού φωτισμού κρίνεται ανεπαρκές, καθώς η στάθμη φωτισμού δεν προσεγγίζει την συνιστώμενη τιμή των 500 lux για χώρους γραφείων. Η μορφή της καμπύλης που αφορά το γραφείο του πρώτου ορόφου, σε αντίθεση με αυτή του ισογείου, αποδεικνύει την επίδραση του φωτός της ημέρας στον αισθητήρα, ο οποίος βρισκόταν κοντά σε άνοιγμα. Η στάθμη φωτισμού, όπως παρατηρείται στην Εικόνα 6, δε μεταβάλλεται σημαντικά κατά τη διάρκεια του Σαββατοκύριακου, εφόσον το κτίριο είναι εκτός λειτουργίας, αποδεικνύοντας τη συνεχή λειτουργία του συστήματος φωτισμού.



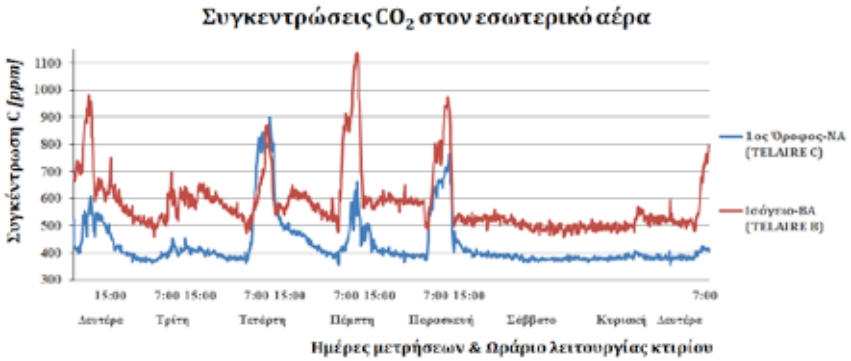
Εικόνα 6: Αποτελέσματα των μετρήσεων της στάθμης φωτισμού σε αντιπροσωπευτικούς εσωτερικούς χώρους του κτιρίου

Οι χρήστες και το πλήθος τους ανά χώρο επηρεάζουν το επίπεδο συγκεντρώσεων CO_2 με την ανθρώπινη εκπνοή. Επιπλέον η χρήση φωτοτυπικών μηχανημάτων, χημικών προϊόντων καθαρισμού, καθώς και ο καπνός από τσιγάρα σε συνδυασμό με τυχόν ανεπαρκή αερισμό δημιουργούν ένα βλαβερό εργασιακό περιβάλλον. Στην Εικόνα 7 παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις CO_2 για δύο χώρους κύριας χρήσης, οι οποίες βρίσκονται σε συμφωνία με τη λειτουργία των χώρων και την παρουσία ατόμων σε αυτό.

Σύμφωνα με την ASHRAE [10], η διαφορά μεταξύ των συγκεντρώσεων CO_2 των εσωτερικών χώρων και του ατμοσφαιρικού αέρα δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 700 ppm. Οι εξωτερικές συγκεντρώσεις CO_2 κυμαίνονται συνήθως από 300 έως 500 ppm, επομένως το συνιστώμενο ανώτατο όριο κυμαίνεται από 1000 έως 1200 ppm αντίστοιχα. Ειδικότερα, για χώρους γραφείων που εξετάζονται στην παρούσα μελέτη, ο Κώδικας Πρακτικής για Ποιότητα Αέρα Εσωτερικού Χώρου [21], συστήνει ως τυπική συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα το εύρος 600-800 ppm. Αξίζει να σημειωθεί ότι το CO_2 δεν αποτελεί τοξική ουσία, ωστόσο σε πολύ μεγάλες συγκεντρώσεις, μεγαλύτερες του ανώτατου επιτρεπτού ορίου μακροπρόθεσμης έκθεσης (χρόνος αναφοράς: 8 ώρες, δηλαδή καθημερινή έκθεση

στον χώρο εργασίας) των 5000 ppm [22], μπορεί να αποτελέσει κίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία. Σε κάθε περίπτωση, οι υψηλές συγκεντρώσεις CO_2 υποδεικνύουν απουσία οξυγόνου. Γενικά, ο ανεπαρκής αερισμός μπορεί να προκαλέσει στους χρήστες του κτιρίου συμπτώματα όπως πονοκέφαλο, δύσπνοια, ίλιγγο, εξάντληση, λήθαργο, δακρύρροια και αδυναμία συγκέντρωσης, γνωστά ως σύνδρομο άρρωστου κτιρίου (ΣΑΚ) [23].

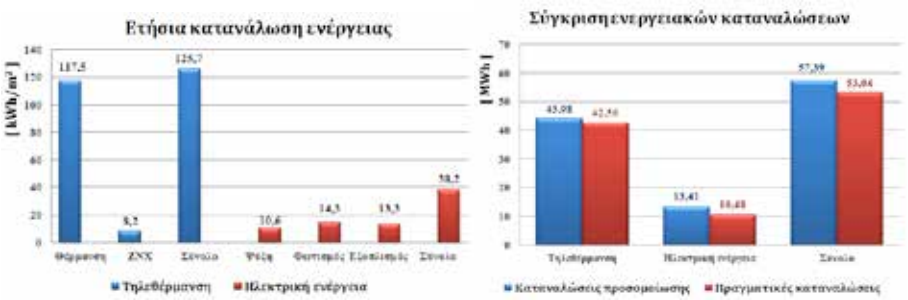
Οι μετρήσεις δεν υπερβαίνουν τα επιτρεπόμενα όρια, ικανοποιώντας έτσι τις συνθήκες άνεσης των χρηστών, αποδεικνύοντας τον επαρκή και συχνό αερισμό των εσωτερικών χώρων. Οι υψηλότερες τιμές που παρατηρούνται γενικά στο γραφείο του ισογείου, δικαιολογούνται από την ύπαρξη περισσότερων ατόμων, σε σύγκριση με το γραφείο του πρώτου ορόφου που χρησιμοποιείται ως επί το πλείστον από ένα άτομο. Μόνο οι μετρήσεις της τέταρτης ημέρας για τον χώρο του ισογείου υπερβαίνουν την τιμή των 1000 ppm, γεγονός που μπορεί να οφείλεται σε συγκέντρωση πολλών ατόμων, σε ανεπαρκή φυσικό αερισμό και σε εξωγενείς παράγοντες όπως ο καπνός και τα καυσαέρια. Κατά τις μη εργάσιμες ώρες, οι συγκεντρώσεις CO_2 πέφτουν σε χαμηλά σχετικά επίπεδα, με αποτέλεσμα να εξισώνονται ή να είναι ελαφρώς υψηλότερες από τις αντίστοιχες ατμοσφαιρικές. Ο κύριος λόγος για τις χαμηλές τιμές είναι η απουσία ατόμων, ενώ οι διαφορές μεταξύ των δύο χώρων οφείλονται πιθανότερα στον διαφορετικό βαθμό μη ελεγχόμενου φυσικού αερισμού (μέσω των ανοιγμάτων) ή ανεπιθύμητου αερισμού, ήτοι μη ελεγχόμενης διείσδυσης του αέρα (μέσω χαραμάδων) κατά τις νυχτερινές ώρες.



Εικόνα 7: Αποτελέσματα των μετρήσεων των συγκεντρώσεων CO_2 του εσωτερικού αέρα

3.2. Ενεργειακή ανάλυση

Τα αποτελέσματα της ενεργειακής ανάλυσης, έπειτα από την εκτέλεση της προσομοίωσης του κτιρίου στο GBS, παρουσιάζονται στην Εικόνα 8α. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι ετήσιες καταναλώσεις ενέργειας ανά τελική χρήση, καθώς και ανά πηγή ενέργειας. Είναι αξιοσημείωτο ότι το 72% της καταναλισκόμενης ενέργειας αφορά την κάλυψη των αναγκών θέρμανσης του κτιρίου. Σύμφωνα με την Τεχνική Οδηγία 20701-1/2017 [18], η κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας και οι εκπομπές CO_2 υπολογίζονται ίσες με 199,1 kWh/m^2 και 81,5 Kg CO_2/m^2 αντίστοιχα. Όπως παρατηρείται στην Εικόνα 8β, οι καταναλώσεις που υπολογίζονται με την προσομοίωση για την κάλυψη των αναγκών θέρμανσης και ΖΝΧ του κτιρίου, σχεδόν ταυτίζονται με τις πραγματικές καταναλώσεις του κτιρίου από το δίκτυο της Τηλεθέρμανσης (απόκλιση~3%), ενώ στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας παρατηρείται απόκλιση της τάξης του 28%. Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι το κτίριο έχει χαμηλές απαιτήσεις ψύξης λόγω κλιματικής ζώνης, και επιπλέον συνηθίζεται ο φυσικός δροσισμός των χώρων μέσω των ανοιγμάτων, περιορίζοντας σε μεγάλο βαθμό τη χρήση των κλιματιστικών μονάδων.

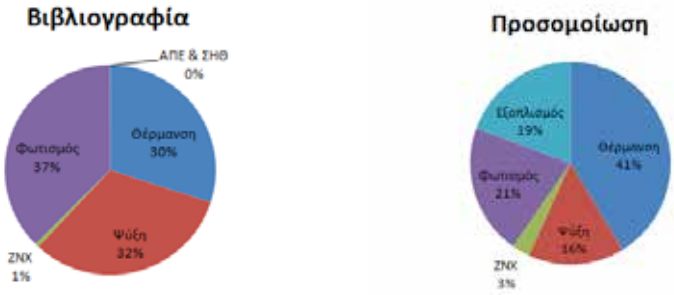


(α) *(β)*

Εικόνα 8: Ετήσια κατανάλωση ενέργειας προσομοίωσης: α) ανά πηγή ενέργειας β) σύγκριση με πραγματικά δεδομένα

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι πειραματικές μετρήσεις αξιοποιήθηκαν κατά την εκτέλεση της ενεργειακής ανάλυσης, καθώς τα αποτελέσματα των παραμέτρων T, RH και LI λήφθηκαν υπόψη, ως πραγματικά δεδομένα, στις ρυθμίσεις των αντίστοιχων παραμέτρων για τα φορτία ψύξης και φωτισμού κάθε θερμικής ζώνης. Επίσης τα διαγράμματα επιβεβαιώνουν το ωράριο λειτουργίας και χρήσης του κτιρίου. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο αριθμός των μετρήσεων δεν ήταν εκτεταμένος, ώστε να θεωρηθεί αντιπροσωπευτικός για τη λειτουργία του κτιρίου καθ' όλο τον χρόνο, εντούτοις πρόσφερε ένα χρήσιμο επίπεδο αναφοράς.

Επιπρόσθετα, σύμφωνα με το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας [24], η στατιστική ανάλυση για τη χρονική περίοδο 2011÷2018, παρουσιάζει ότι τα δημόσια κτίρια έχουν ως βασικές ενεργειακές απαιτήσεις την κάλυψη των αναγκών θέρμανσης και φωτισμού. Αξίζει να αναφερθεί ότι για τέτοιους τύπους κτιρίων και σύμφωνα με αυτή τη στατιστική ανάλυση, η μέση ετήσια κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση εκτιμάται ότι είναι της τάξης των 126,5 kWh/m^2, ενώ η αντίστοιχη κατανάλωση του εξεταζόμενου κτιρίου υπολογίστηκε ίση με 117,5 kWh/m^2. Στην Εικόνα 9 παρουσιάζεται η μέση ετήσια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας των κτιρίων γραφείων για τη χρονική περίοδο 2011÷2018, καθώς και η αντίστοιχη προβλεπόμενη κατανάλωση του κτιρίου προσομοίωσης, για εύκολη και άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων. Ενδεικτικά μπορεί να αναφερθεί, ότι πιθανές διαφορές, μπορούν να αποδοθούν στο γεγονός ότι, το κτίριο παρουσιάζει χαμηλή αξιοποίηση των κλιματιστικών συσκευών.



(α) *(β)*

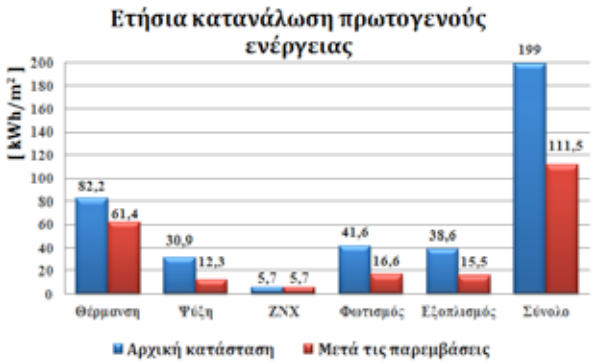
Εικόνα 9: Ποσοστά ετήσιας κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας ανά χρήση: α) στατιστική ανάλυση βιβλιογραφίας β) αποτελέσματα προσομοίωσης

4. ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΕΣ ΠΑΡΕΜΒΑΣΕΙΣ

Οι ακόλουθες παρεμβάσεις προτείνονται με στόχο τη βελτίωση του κτιριακού κελύφους και του υφιστάμενου συστήματος φωτισμού, καθώς και την ενσωμάτωση συστημάτων ΑΠΕ, συμβάλλοντας

στη μείωση κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας (Εικόνα 10) και εκπομπών CO_2. Στην ανάλυση παρατίθεται και το ποσοστό μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας, σύμφωνα με τους υπολογισμούς της προσομοίωσης. Πιο συγκεκριμένα, προτείνεται:

- Αντικατάσταση των ξύλινων παραθύρων με παράθυρα αλουμινίου, διπλού ενεργειακού υαλοπίνακα χαμηλής εκπομπής (Low-emissivity ή Low-E). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Revit, ο νέος συντελεστής θερμοπερατότητας των παραθύρων είναι ίσος με $U_{windows_low_E}$=2,21 W/(m^2.K). Η μείωση της ροής θερμότητας οφείλεται στις λεπτές επιστρώσεις μικροσκοπικών μεταλλικών στοιχείων (όπως οξειδίων αργύρου) στην επιφάνεια των υαλοπινάκων. Με αυτή την παρέμβαση μπορεί να επιτευχθεί μείωση στην κατανάλωση ενέργειας της τάξης του 17,1%.
- Στεγανοποίηση και θερμομόνωση ελαφρύ τύπου (πρόκειται για παλιό κτίριο με μικρή αντοχή σε επιπλέον φορτία βάρους στην συνολική κατασκευή) οροφής. Η τοποθέτηση θερμομονωτικών πλακών πάχους 0,05 m, μπορεί να βελτιώσει τον αντίστοιχο συντελεστή θερμοπερατότητας [U_{new_roof}=0,33 W/(m^2.K)] και να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας κατά 8,2%.
- Τοποθέτηση ψηφιακών χρονοδιακοπτών για τον πλήρη έλεγχο του εσωτερικού και εξωτερικού φωτισμού, καθώς και της λειτουργίας διαφόρων συσκευών του εξοπλισμού του κτιρίου (π.χ. ηλεκτρονικοί υπολογιστές, φωτοτυπικά μηχανήματα, εκτυπωτές κ.α.) για τον περιορισμό άσκοπων ηλεκτρικών καταναλώσεων, εξοικονομώντας σημαντικά ποσά ενέργειας.
- Αντικατάσταση των υφιστάμενων συμβατικών λαμπτήρων με λαμπτήρες LED, οι οποίοι καταναλώνουν λιγότερη ηλεκτρική ενέργεια, διαρκούν πέντε φορές περισσότερο από τους συμβατικούς και δεν περιέχουν υδράργυρο (Hg) που μολύνει το περιβάλλον. Αυτή η παρέμβαση θα μπορούσε να μειώσει τις καταναλώσεις ενέργειας έως και 43%, συμβάλλοντας ταυτόχρονα στη βελτίωση της στάθμης φωτισμού (τουλάχιστον 500 lux).
- Εγκατάσταση φωτοβολταϊκών (Φ/Β – PV) συστημάτων για την κάλυψη του 60% των ηλεκτρικών καταναλώσεων (δηλαδή φορτία ψύξης, φωτισμού και εξοπλισμού). Το συγκεκριμένο σενάριο αναβάθμισης απαιτεί 16 Φ/Β πάνελ, συνολικής επιφάνειας 26 m^2, τα οποία έχουν τη δυνατότητα να εγκατασταθούν στην κεκλιμένη οροφή του εξεταζόμενου κτιρίου σε Νότιο προσανατολισμό.



Εικόνα 10: Ετήσια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας ανά χρήση, πριν και μετά την εφαρμογή των παρεμβάσεων ενεργειακής αναβάθμισης

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία έγινε πειραματική διερεύνηση εσωκλίματος και ανάλυση της ενεργειακής συμπεριφοράς ενός κτιρίου γραφείων. Κύριοι στόχοι της είναι η βελτίωση των εσωτερικών συνθηκών, η μείωση των θερμικών απωλειών του κτιριακού κελύφους και της κατανάλωσης συμβατικής ενέργειας, καθώς προτείνεται η παραγωγή ενέργειας από συστήματα ανανεώσιμων πηγών επιτυγχάνοντας έτσι μια συνολική μείωση των εκπομπών CO_2.

Τα αποτελέσματα της οικονομοτεχνικής ανάλυσης υποδεικνύουν μια περίοδο αποπληρωμής σχεδόν 5,5 ετών όσον αφορά των υλοποίηση όλων των προαναφερθέντων παρεμβάσεων για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του Επιμελητηρίου Κοζάνης. Αυτή η χρονική περίοδος χαρακτηρίζεται αρκετά βιώσιμη, λαμβάνοντας υπόψη τις τρεις κύριες διαστάσεις της, οι οποίες πλαισιώνονται από τους περιβαλλοντικούς, τους οικονομικούς και τους κοινωνικούς στόχους [15]. Συνοψίζοντας, οι προτεινόμενες παρεμβάσεις μπορούν να μειώσουν το λειτουργικό κόστος του κτιρίου και να εξοικονομήσουν σημαντικά ποσά ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, η υλοποίηση τους θα μπορούσε να επιτύχει μείωση της ετήσιας κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας έως και 44%, ενώ οι εκπομπές CO_2 θα μπορούσαν να μειωθούν εξίσου κατά 41%. Με αυτόν τον τρόπο επιβεβαιώνεται το υψηλό δυναμικό εξοικονόμησης ενέργειας και η ταυτόχρονη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης που διαθέτει το κτιριακό απόθεμα.

Ο προτεινόμενος συνδυασμός μετρήσεων εσωκλίματος και ενεργειακής ανάλυσης μπορεί να διευρυνθεί και να αξιοποιηθεί περαιτέρω, καθώς προσφέρει τη δυνατότητα ολοκληρωμένης προσέγγισης των συνθηκών του κτιρίου. Παράλληλα, σημαντική για την επιλογή των κατάλληλων λύσεων ενεργειακής αναβάθμισης μπορεί να είναι η εφαρμογή αλγορίθμων βελτιστοποίησης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Eurostat – European Commission, 2019, “Energy, transport and environment statistics: 2019 edition,” Luxembourg: Publications Office of the European Union.

[2] UN Environment and International Energy Agency, 2017, “Towards a zero-emission, efficient, and resilient buildings and construction sector,” Global Status Report 2017.

[3] European Union, 2018, “Directive 2018/844/EU of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on energy efficiency,” Official Journal of the European Union, 156, pp.75-91.

[4] Magrini, A., Lentini, G., Cuman, S., Bodrato, A., Marenco, L., 2020, “From nearly zero energy buildings (NZEB) to positive energy buildings (PEB): The next challenge – The most recent European trends with some notes on the energy analysis of a forerunner PEB example,” Developments in the Built Environment, 3.

[5] Keiner, D., Ram, M., De Souza Noel Simas Barbosa, L., Bogdanov, D., Breyer, C., 2019, “Cost optimal self-consumption of PV prosumers with stationary batteries, heat pumps, thermal energy storage and electric vehicles across the world up to 2050,” Solar Energy, 185, pp. 406 – 423.

[6] Antoniadou, P., and Papadopoulos, A.M., 2017, “Occupant’s thermal comfort: State of the art and the prospects of personalized assessment in office buildings,” Energy and Buildings, 153, pp. 136 – 149.

[7] CEN (European Committee for Standardization), 2019, “EN 16798-1: Energy performance of buildings – Ventilation for buildings. Part 1: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics.”

[8] CEN (European Committee for Standardization), 2018, “EN 12665: Light and lighting – Basic terms and criteria for specifying lighting requirements.”

[9] CEN (European Committee for Standardization), 2007, “EN 13779: Ventilation for non-residential buildings – Performance requirements for ventilation and room-conditioning systems.”

[10] ANSI/ASHRAE, 2019, “Standard 62.1-2019: Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality,” American Society of heating, refrigerating and air conditioning engineers.

[11] Antoniadou, P., Kyriaki, E., Manoloudis, A., Papadopoulos, A.M., 2017, “Evaluation of Thermal Sensation in Office Buildings: A case study in the Mediterranean,” Procedia Environmental Sciences, 38, pp. 28 – 35.

[12] ΥΠΕΝ – ΣΕΠΔΕΜ - Τμήματα επιθεώρησης ενέργειας ΒΕ & ΝΕ, Πετρολιάγκη, Μ., 2020, "Ενεργειακές επιθεωρήσεις κτιρίων, συστημάτων θέρμανσης και κλιματισμού – Στατιστική ανάλυση για το έτος 2019 και της χρονικής περιόδου 2011-2019."

[13] Τεχνική Οδηγία Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-3, 2010, "Κλιματικά δεδομένα ελληνικών περιοχών," ΤΕΕ, Β' έκδοση, Αθήνα.

[14] Εφημερίδα 'Δυτική Μακεδονία', 2018, "ΕΒΕ Κοζάνης: Ενημερωτική ημερίδα στην Πτολεμαϊδα και την Κοζάνη." Ιστοσελίδα: https://ditiki.gr/eve-kozanis-enimerotiki-imerida-stin-ptolema%ce%90da-ke-stin-kozani/

[15] Hashempour, N., Taherkhani, R., Mahdikhani, M., 2020, "Energy performance optimization of existing buildings: A literature review," Sustainable Cities and Society, 54.

[16] Τεχνική Οδηγία Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-2, 2017, "Θερμοφυσικές ιδιότητες δομικών υλικών και έλεγχος της θερμομονωτικής επάρκειας των κτιρίων," ΤΕΕ, Α' έκδοση, Αθήνα.

[17] ΔΕΥΑΚ, 2018, "Δημοτική επιχείρηση ύδρευσης αποχέτευσης Κοζάνης – Τηλεθέρμανση." Ιστοσελίδα: https://www.deyakozanis.gr/tilethermansi/

[18] Τεχνική Οδηγία Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1, 2017, "Αναλυτικές εθνικές προδιαγραφές παραμέτρων για τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων και την έκδοση του πιστοποιητικού ενεργειακής απόδοσης," ΤΕΕ, Α' έκδοση, Αθήνα.

[19] ANSI/ASHRAE, 2013, "Standard 55-2013: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy," American Society of heating, refrigerating and air conditioning engineers.

[20] ASHRAE, 2017, "ASHRAE handbook: Fundamentals," American Society of heating, refrigerating and air conditioning engineers.

[21] Διάταγμα Κ.Δ.Π.519, 2014, "Κώδικας Πρακτικής για Ποιότητα Αέρα Εσωτερικού Χώρου," ΥΕΠΚΑ, Κύπρος.

[22] Health and Safety Executive, 2020, "General hazards of Carbon Dioxide." Ιστοσελίδα: https://www.hse.gov.uk/carboncapture/carbondioxide.htm

[23] Lowitz, G., 2015, "Managing Carbon-Dioxide Risk: What you should know," USA. Ιστοσελίδα: https://www.cik-solutions.com/content/files/en_cik_managing-carbon-dioxide-risk-what-you-should-know.pdf

[24] ΥΠΕΝ – ΣΕΠΔΕΜ - Τμήματα επιθεώρησης ενέργειας ΒΕ & ΝΕ, Πετρολιάγκη, Μ., 2019, "Ενεργειακές επιθεωρήσεις – Στατιστική ανάλυση για το έτος 2018 και της χρονικής περιόδου 2011-2018."

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΚΕΛΥΦΟΥΣ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ ΚΤΙΡΙΩΝ ΚΑΤΟΙΚΙΑΣ ΚΑΙ ΓΡΑΦΕΙΩΝ ΥΠΟ ΑΝΤΙΠΡΟΣΩΠΕΥΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Αικατερίνα Καραναύτη*, Θεόδωρος Θεοδοσίου

Εργαστήριο Οικοδομικής και Φυσικής των Κτιρίων, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Α.Π.Θ., 541 24 Θεσσαλονίκη
*e-mail: akaranaf@civil.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της κοινωνίας σήμερα είναι η ελάττωση της ενεργειακής κατανάλωσης σε όλους τους τομείς, κατά συνέπεια και στον κτιριακό τομέα, που αποτελεί τον πλέον ενεργοβόρο. Σε παγκόσμιο επίπεδο έχει επικρατήσει η άποψη ότι η θερμομονωτική προστασία ενός κτιρίου, όσο πιο αυξημένη είναι, τόσο περισσότερο βελτιώνει την ενεργειακή συμπεριφορά του κτιρίου. Ωστόσο, αρκετοί επιστήμονες υποστηρίζουν βάσει μελετών, ότι σε περιοχές όπου οι ανάγκες για ψύξη είναι αυξημένες για μεγάλη περίοδο του έτους, ο πολύ χαμηλός συντελεστής θερμοπερατότητας U του κτιριακού κελύφους, οδηγεί σε προβλήματα υπερθέρμανσης στο κτίριο, καθώς η πλεονάζουσα θερμότητα εγκλωβίζεται στο εσωτερικό του και προκαλούνται έτσι, αυξημένες ανάγκες για ψύξη. Στην παρούσα εργασία διερευνάται αν και υπό ποιες προϋποθέσεις ισχύει η άποψη ότι η ισχυρή θερμομονωτική προστασία βελτιώνει τη συμπεριφορά των κτιρίων στην Ελλάδα, σε μία χώρα με Μεσογειακό κλίμα, δηλαδή σχετικά ήπιους χειμώνες και θερμά καλοκαίρια, όπου η περίοδος ψύξης διαρκεί περίπου έξι μήνες, ή αν η ισχύς της φαίνεται όντως να περιορίζεται κυρίως σε βορειότερες χώρες. Μελετάται ένας τυπικός όροφος κτιρίου, για χρήση κατοικίας και χρήση γραφείου στις τέσσερις κλιματικές Ζώνες, για τα πάχη μόνωσης των δύο ακραίων Ζωνών, Α και Δ. Συμπληρωματικές παράμετροι που εξετάζονται είναι η ύπαρξη ή μη δυναμικής μόνωσης την περίοδο ψύξης, το είδος του θερμοστάτη, συμβατικός ή λειτουργικής θερμοκρασίας για να προσεγγίζεται καλύτερα το αίσθημα της θερμικής άνεσης και το δομικό υλικό της τοιχοποιίας πλήρωσης, με διάτρητες οπτοπλίνθους και θερμομονωτικά τούβλα, με τη διαφορά μεταξύ των δύο να έγκειται στον συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας λ. Από τα αποτελέσματα που λαμβάνονται φαίνεται πως η αυξημένη θερμομονωτική προστασία μειώνει αρκετά τις ετήσιες ενεργειακές απαιτήσεις του κτιρίου για τις εγχώριες κλιματολογικές συνθήκες, ωστόσο είναι ξεκάθαρο πως η περίπτωση της δυναμικής μόνωσης δρα ευεργετικά τους θερινούς μήνες, ιδιαίτερα στις κλιματικές Ζώνες όπου οι θερμοκρασιακές συνθήκες είναι πιο ευνοϊκές.

Λέξεις Κλειδιά: θερμομόνωση κελύφους, δυναμική μόνωση, περίοδος ψύξης, κτίριο κατοικίας, κτίριο γραφείων

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στις μέρες μας ολόκληρος ο πλανήτης έρχεται αντιμέτωπος όλο και συχνότερα με ακραία καιρικά φαινόμενα και φυσικές καταστροφές, επακόλουθα της κλιματικής αλλαγής. Η αλόγιστη κατανάλωση ενέργειας των τελευταίων δεκαετιών, προερχόμενη από ορυκτά καύσιμα, με την εξαιρετικά υψηλή εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου που συνεπάγεται, είναι απαραίτητο να μετριαστεί και να αντικατασταθεί από ενέργεια παραγόμενη από ανανεώσιμες πηγές. Σύμφωνα με μελέτες, το πλέον αισιόδοξο σενάριο για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής είναι ο περιορισμός της αύξησης της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη στους 1,5^{o}C σε σχέση με τα προ-βιομηχανικά επίπεδα, έως τα τέλη του 21^{ου} αιώνα [1]. Για την επίτευξη αυτού του στόχου απαιτείται η λήψη ιδιαίτερα δραστικών μέτρων σε παγκόσμιο επίπεδο, με έμφαση στους τομείς που καταναλώνουν την περισσότερη ενέργεια. Ο κτιριακός τομέας αποτελεί τον πλέον ενεργοβόρο, καθώς σύμφωνα με στοιχεία της Ευρωπαϊκής Επιτροπής είναι υπεύθυνος για το 40% της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης και το 36% των εκπομπών CO_2 στην Ε.Ε. [2]. Παρατηρείται επίσης, ότι τα κτίρια που έχουν άλλη χρήση καταναλώνουν περίπου 40% περισσότερη ενέργεια από τα κτίρια κατοικίας [3]. Επομένως, έχουν θεσπιστεί συγκεκριμένοι και μετρήσιμοι στόχοι για την αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας των κτιρίων για τα έτη 2020, 2030 και 2050, όπου τέθηκε ο στόχος για την κλιματικά ουδέτερη οικονομία. Προκειμένου να καταστεί εφικτή η επίτευξη αυτών των στόχων, λαμβάνει χώρα το τρέχον χρονικό διάστημα η αναθεώρηση της ευρωπαϊκής οδηγίας που έχει επιβάλει στα κράτη-μέλη τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων τους, με σκοπό την αναβάθμιση των εθνικών μέτρων των κρατών-μελών [4].

Έχοντας ως στόχο την ενεργειακή αναβάθμιση των κτιρίων, για πολλά χρόνια η ερευνητική κοινότητα, όπως και τα νομικά πλαίσια πολλών χωρών, επικεντρώθηκαν στη θερμομονωτική προστασία του κτιριακού κελύφους και στη βελτίωση της ενεργειακής κατανάλωσης για θέρμανση. Επικρατούσε επομένως, η αντίληψη ότι η αυξημένη θερμομονωτική προστασία και η χαμηλή θερμική διαπερατότητα του κελύφους είναι αυτές που οδηγούν με βεβαιότητα στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης ενός κτιρίου και την ενίσχυση της θερμικής άνεσης των χρηστών του. Κάτι ανάλογο παρατηρούνταν και στην Ελλάδα, όπου η υποχρεωτική χρήση της θερμομόνωσης επιβλήθηκε για πρώτη φορά από τον Κανονισμό Θερμομόνωσης του 1979, ο οποίος το 2010 αντικαταστάθηκε από τον Κανονισμό Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων (Κ.Εν.Α.Κ.). Ο Κ.Εν.Α.Κ. εισήγαγε υψηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις τόσο για τα νεόδμητα, όσο και για τα υφιστάμενα κτίρια, δίνοντας πάλι έμφαση στη θερμομονωτική τους προστασία. Η προσέγγιση αυτή σήμερα, ότι δηλαδή η υψηλή θερμομονωτική προστασία του κελύφους και ουσιαστικά, η θερμική του αδρανοποίηση, συμβάλει καθοριστικά στη βιωσιμότητα και την ενεργειακή αποδοτικότητα του κτιρίου, έχει αποδειχτεί ότι δεν αποδίδει σε όλες τις περιπτώσεις τα βέλτιστα αποτελέσματα. Φαίνεται μάλιστα, από μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί, ότι λειτουργεί αποτελεσματικά στις βορειότερες περιοχές του πλανήτη, ενώ σε περιοχές με ήπια και θερμά κλίματα μπορεί να επιφέρει αρνητικά αποτελέσματα.

Ειδικότερα, οι Rodrigues et al. μελέτησαν 96.000 διαφορετικές γεωμετρίες κτιρίων κατοικίας σε οκτώ περιοχές της Ευρώπης, με διαφορετικές κλιματικές συνθήκες και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η μείωση του συντελεστή θερμοπερατότητας U συμβάλει στην εξοικονόμηση ενέργειας για κλιματισμό στα κτίρια και τη μείωση της επίδρασης της γεωμετρίας του κτιρίου στην ενεργειακή του κατανάλωση στα πιο βόρεια μέρη, κάτι που για τις νότιες περιοχές δεν ισχύει, καθώς χαμηλά U οδηγούν το κτίριο σε υψηλότερες καταναλώσεις για ψύξη και το καθιστούν ευάλωτο ως προς τα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά [5]. Οι Chvatal και Corvacho εξέτασαν τη συμπεριφορά χαρακτηριστικών διατάξεων κτιρίων της νότιας Ευρώπης ως προς την αύξηση του επιπέδου της θερμομονωτικής τους προστασίας και κατέληξαν στο ότι κτίρια με αυξημένα εσωτερικά κέρδη τείνουν να υπερθερμαίνονται από την αύξηση της μόνωσης και να καταναλώνουν κατά συνέπεια, περισσότερη ενέργεια για ψύξη, καθώς και στο ότι ο επαρκής αερισμός του κτιρίου μπορεί να μετριάσει τις αρνητικές συνέπειες της αυξημένης θερμομονωτικής προστασίας και να βελτιώσει τα επίπεδα άνεσης στο κτίριο [6]. Παρόμοια αποτελέσματα είχαν και οι Friess et al. που μελέτησαν τη συμπεριφορά κτιρίων γραφείων, κτίρια με αυξημένα εσωτερικά κέρδη, σε σχέση με την αύξηση του πάχους της μόνωσής τους [7]. Κατέληξαν στο ότι τέτοιου είδους κτίρια στις θερμές συνθήκες της Μεσογείου παρουσιάζουν αυξημένο κίνδυνο υπερθέρμανσης την περίοδο ψύξης όταν έχουν μεγάλα πάχη μόνωσης, μία συμπεριφορά που παρατηρείται γενικότερα σε κτίρια που έχουν λιγότερες από 2000 βαθμοημέρες θέρμανσης και μεταξύ 2000 και 5000 βαθμοημερών ψύξης. Οι Fernandes et al. εξέτασαν 192000 γεωμετρίες κτιρίων σε χαρακτηριστικές περιοχές της Μεσογείου, καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι στις βορειότερες περιοχές τα κτιριακά κελύφη με χαμηλό U μειώνουν την ενεργειακή κατανάλωση, ενώ αντίθετα, στις πιο νότιες και θερμές περιοχές της Μεσογείου η πολύ χαμηλή θερμική διαπερατότητα οδηγεί σε

μεγαλύτερες ενεργειακές καταναλώσεις, οπότε είναι προτιμότερη μία αυξημένη τιμή U για την επίτευξη του βέλτιστου αποτελέσματος [8]. Σε μία προσπάθεια συσχέτισης του μεγέθους του κτιρίου και της διάταξης των παραθύρων με το U, παρατήρησαν ότι για υψηλότερες τιμές του συντελεστή θερμοπερατότητας, όσο μεγαλύτερο είναι το κτίριο τόσο περισσότερη ενέργεια τείνει να καταναλώνει, ενώ τα μεγαλύτερα παράθυρα λειτουργούν ευεργετικά. Όσον αφορά τα προηγμένα θερμομονωτικά υλικά με τις εξαιρετικά χαμηλές τιμές του συντελεστή αγωγιμότητας λ, οι Detommaso et al. μελέτησαν τη θερμική συμπεριφορά ενός κτιρίου σε τρεις περιοχές της Ευρώπης με διαφορετικές κλιματικές συνθήκες ως προς την προσθήκη υλικών αλλαγής φάσης (PCM) και θερμομονωτικών πάνελ κενού (VIP) [9]. Συμπέραναν ότι τα δεύτερα, που παρουσιάζουν συνεχώς πολύ υψηλή θερμομονωτική προστασία, λειτουργούσαν αποτελεσματικά τους χειμερινούς μήνες, μειώνοντας τις ενεργειακές απαιτήσεις για θέρμανση, οδηγούσαν όμως το κτίριο και στις τρεις γεωγραφικές τοποθεσίες σε υπερθέρμανση τους θερινούς μήνες, αυξάνοντας σημαντικά τις απαιτήσεις για ψύξη. Τέλος, οι Verbeke και Audenaert ασχολήθηκαν με την επίδραση της θερμικής μάζας στη συμπεριφορά των κτιρίων [10]. Για την πλήρη κατανόηση αυτής, τόνισαν ότι η μελέτη οφείλει να ξεφεύγει από μία σταθερή τιμή θερμικής διαπερατότητας και να εξετάζει τη δυναμική της παραμέτρου. Αφού συγκέντρωσαν πληθώρα ερευνών πάνω στο αντικείμενο, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι κατά κύριο λόγο η αυξημένη θερμική μάζα αυξάνει τη θερμική άνεση των χρηστών, ενώ από την πλευρά της ενεργειακής κατανάλωσης στα κτίρια διακοπτόμενης χρήσης υπάρχει κίνδυνος υψηλών ενεργειακών καταναλώσεων, λόγω της αργής απόκρισης του κτιριακού κελύφους. Τόνισαν επίσης, ότι η ενεργειακή αποδοτικότητα των κατασκευών αυξημένης θερμικής μάζας πρέπει να εξετάζεται ολιστικά, με εργαλεία ανάλυσης κύκλου ζωής, ώστε τα συμπεράσματα που θα ληφθούν να είναι απολύτως ασφαλή.

Η παρούσα μελέτη αποσκοπεί στη μελέτη της επίδρασης της θερμομονωτικής προστασίας στην ενεργειακή κατανάλωση ενός κτιρίου κατοικίας κατά κύριο λόγο, αλλά και γραφείου, συμπληρωματικά. Ειδικότερα, ιδιαίτερη έμφαση θα δοθεί στην ενεργειακή κατανάλωση για ψύξη ενός τυπικού ορόφου κτιρίου. Παράμετροι όπως το πάχος της μόνωσης, τα διαφορετικά υλικά κατασκευής της τοιχοποιίας πλήρωσης, το είδος του θερμοστάτη, αλλά και η επίδραση της δυναμικής μόνωσης θα εξεταστούν στις τέσσερις κλιματικές ζώνες της Ελλάδας. Στόχος της εργασίας είναι η διερεύνηση του αν και υπό ποιες προϋποθέσεις τα αυξημένα πάχη μόνωσης λειτουργούν επιβαρυντικά στο κτίριο κατά την περίοδο ψύξης, οδηγώντας σε μεγαλύτερες ενεργειακές καταναλώσεις, ώστε να επιτευχθεί το αίσθημα θερμικής άνεσης από τους χρήστες τους. Το εύρος των παχών της μόνωσης που θα εξεταστούν θα είναι σύμφωνα με τις προδιαγραφές του Κ.Εν.Α.Κ., ώστε τα συμπεράσματα που θα εξαχθούν να είναι ρεαλιστικά και να αντιπροσωπεύουν το ελληνικό περιβάλλον.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Στην παρούσα εργασία διερευνάται η επίδραση του πάχους της θερμομόνωσης στην ενεργειακή απαίτηση για ψύξη ενός κτιρίου κατοικίας, στις τέσσερις κλιματικές ζώνες της Ελλάδας. Για τον σκοπό αυτό μελετήθηκε ένα τυπικό οροφοδιαμέρισμα ενδιάμεσου ορόφου. Η γεωμετρία του προσομοιώθηκε μέσω του προγράμματος SketchUp και στη συνέχεια εισήχθη στο λογισμικό EnergyPlus, για τον υπολογισμό των ενεργειακών του απαιτήσεων. Η συμπεριφορά του διαμερίσματος εξετάστηκε υπό την επίδραση διαφορετικών παραμέτρων, όπως το είδος του θερμοστάτη και το υλικό κατασκευής της τοιχοποιίας πλήρωσης, ώστε να μελετηθεί η επίδραση κάθε μίας εξ αυτών στην ενεργειακή απαίτηση. Για την απόκτηση πιο ολοκληρωμένης εικόνας ως προς την επίδραση της μόνωσης στην ενεργειακή απαίτηση για ψύξη, το κτίριο μετατράπηκε στη συνέχεια σε χώρο γραφείου και μελετήθηκαν οι ίδιες παράμετροι.

2.1. Εξεταζόμενο κτίριο

2.1.1. Χαρακτηριστικά κτιρίου

Το κτίριο που μελετάται εντοπίζεται σε προαστιακή περιοχή και αποτελεί ένα τυπικό διαμέρισμα, ενδιάμεσου ορόφου πολυκατοικίας συνολικής επιφάνειας 99,80m^2, με φέροντα οργανισμό από οπλισμένο σκυρόδεμα, τοιχοποιία πλήρωσης και εξωτερική μόνωση, πανταχόθεν ελεύθερο πλευρικά από άλλα κτίρια. Τμήμα της ανατολικής όψης του διαμερίσματος βρίσκεται σε επαφή με το κλιμακοστάσιο, που είναι μη θερμαινόμενο. Το ιδεατό αυτό κτίριο αποτελείται από ένα σαλόνι, μία κουζίνα, δύο υπνοδωμάτια, ένα μπάνιο και ένα W.C. Όπως φαίνεται και από την κάτοψη, το μεγαλύτερο τμήμα της δυτικής και της νότιας όψης του διαμερίσματος σκιάζεται από τον εξώστη του ανωτέρου ορόφου, όπως και το ανώτερο κομμάτι της ανατολικής όψης, από τον αντίστοιχο ημιυπαίθριο χώρο του ανωτέρου ορόφου. Τα υπόλοιπα τμήματα του κτιριακού κελύφους δεν έχουν κάποιο σκίαστρο. Το διαμέρισμα επίσης, διαθέτει ένα σύστημα θέρμανσης και ένα σύστημα ψύξης

που λειτουργούν τους μήνες που είναι απαραίτητα, για την εξασφάλιση ικανοποιητικών συνθηκών διαβίωσης στους τέσσερις κατοίκους του. Ειδικότερα, το σύστημα θέρμανσης βρίσκεται σε λειτουργία από 1/1 έως 30/4 και από 1/10 έως 31/12 κάθε έτους, ενώ αντίστοιχα το σύστημα ψύξης από 16/4 έως και 15/10. Τα κουφώματα που εντοπίζονται είναι συνθετικά (PVC), με διπλό υαλοπίνακα (4mm – 1,6cm αέρας - 4mm).

Εικόνα 1: Κάτοψη τυπικού διαμερίσματος

Ως θερμομονωτικό υλικό επιλέχθηκε η αφρώδης εξηλασμένη πολυστερίνη (XPS) (λ=0,035W/(m·K)). Το απαιτούμενο πάχος της κατά Κ.Εν.Α.Κ. υπολογίστηκε για τις δύο ακραίες κλιματικές Ζώνες, Α (σενάριο 1) και Δ (σενάριο 4), ώστε ο συντελεστής θερμοπερατότητας (U) του δομικού στοιχείου (μπετόν και τοιχοποιία πλήρωσης) σε επαφή με τον εξωτερικό αέρα για κάθε ζώνη να ισούται με 0,55W/(m^2·K) και 0,35W/(m^2·K), αντίστοιχα και σε επαφή με μη θερμαινόμενο χώρο με 1,30W/(m^2·K) και 0,65W/(m^2·K), αντίστοιχα. Τα πάχη που προέκυψαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 1, για τα δύο είδη τοιχοποιίας πλήρωσης που εξετάστηκαν και με βάση αυτά υπολογίστηκε η ενεργειακή απαίτηση του διαμερίσματος στις τέσσερις κλιματικές Ζώνες. Επομένως, για κάθε Ζώνη εξετάστηκαν δύο σενάρια: ένα με το λεπτό πάχος μόνωσης, που αντιστοιχεί στη Ζώνη Α και ένα με το μεγαλύτερο πάχος, που αντιστοιχεί στη Ζώνη Δ, ώστε να διαπιστωθεί τι επίδραση έχει το κάθε πάχος στην απαίτηση για ψύξη. Οι πόλεις που εξετάστηκαν ως αντιπροσωπευτικές κάθε Ζώνης, είναι η Κως για τη Ζώνη Α, η Αθήνα για τη Ζώνη Β, η Θεσσαλονίκη για τη Ζώνη Γ και η Φλώρινα για τη Ζώνη Δ.

Πίνακας 1: Πάχη θερμομονωτικής προστασίας ανά εξεταζόμενο σενάριο

Υλικό	Πάχος θερμομονωτικής στρώσης (m)			
	Σενάριο 1		Σενάριο 2	
	Προς εξωτερικό αέρα	Προς μη θερμαινόμενο χώρο	Προς εξωτερικό αέρα	Προς μη θερμαινόμενο χώρο
Οπ/δομή με διάτρητες οπτοπλίνθους	0,044	0,008	0,081	0,035
Οπ/δομή με θερμομονωτικά τούβλα	0,018	0,000	0,054	0,008
Οπλισμένο σκυρόδεμα	0,053	0,016	0,089	0,043

2.1.2. Προσομοίωση κτιρίου

Η γεωμετρία του χώρου σχεδιάστηκε στο SketchUp και εισήχθη στο EnergyPlus, όπου ορίστηκαν τα υλικά και οι ιδιότητές τους. Το δάπεδο και η οροφή θεωρήθηκαν αδιαβατικές επιφάνειες, ενώ το κλιμακοστάσιο εισήχθη ως όμορη θερμική ζώνη. Στην περίπτωση του διαμερίσματος ορίστηκαν τέσσερις χρήστες που από τις 7:00 έως τις 17:00 μειώνονται στους δύο. Στο γραφείο οι τέσσερις αυτοί χρήστες εντοπίζονται στον χώρο από τις 8:00 έως τις 16:00, ενώ τις υπόλοιπες ώρες δεν υπάρχει κάποιος μέσα στο κτίριο. Ανάλογα με την παρουσία των χρηστών στον χώρο και στις δύο περιπτώσεις αποδόθηκε ο απαιτούμενος νωπός αέρας κατά Κ.Εν.Α.Κ., για εξασφάλιση ικανοποιητικής ποιότητας εσωτερικού περιβάλλοντος [11]. Στην κατοικία τα συστήματα θέρμανσης και ψύξης την ενεργή περίοδό τους λειτουργούν από τις 7:00 έως τις 24:00, ενώ στο γραφείο τις ώρες παρουσίας των χρηστών. Όλες οι υπόλοιπες παράμετροι, όπως ο φωτισμός, ο ηλεκτρικός εξοπλισμός κ.τ.λ., ορίστηκαν σύμφωνα με την Τεχνική Οδηγία 20701-1/2017 [11].

Ως προς τα συστήματα θέρμανσης και ψύξης, χρησιμοποιήθηκαν δύο είδη θερμοστάτη. Ένας απλός που λαμβάνει υπόψιν μόνο τη θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα και ανάλογα ενεργοποιεί ή απενεργοποιεί το κάθε σύστημα (Template σενάριο) και ένας που αντιδρά στη λειτουργική θερμοκρασία του χώρου, αυτή δηλαδή που προκύπτει από τη θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα και τη μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας των τοίχων (Operative σενάριο). Ο σκοπός της χρήσης του τελευταίου είναι για να γίνει πιο ακριβής προσέγγιση του αισθήματος θερμικής άνεσης των χρηστών. Ωστόσο, είναι προφανές πως για να εξαχθεί μία πλήρης εικόνα για τη θερμική άνεση των χρηστών είναι απαραίτητη και η εισαγωγή της ταχύτητας του εσωτερικού αέρα, κάτι που δεν εξετάζεται στην παρούσα εργασία. Η διαστασιολόγηση των συστημάτων έγινε για κάθε Ζώνη ξεχωριστά, για το σενάριο του συμβατικού θερμοστάτη και του λεπτότερου στρώματος μόνωσης. Πιο συγκεκριμένα, για τα σενάρια αυτά, υπολογίστηκαν οι απαιτήσεις θέρμανσης και ψύξης με άπειρη ισχύ συστήματος και κατόπιν αφαιρέθηκε το 10% των υψηλότερων τιμών, ώστε να προκύψει η επιθυμητή ισχύς του συστήματος. Στον Πίνακα 2 φαίνονται τα αποτελέσματα που λήφθηκαν για την κατοικία και το γραφείο, σε κάθε κλιματική Ζώνη.

Πίνακας 2: Ισχύς σχεδιασμού συστημάτων θέρμανσης και ψύξης ανά κλιματική Ζώνη

Ζώνη	Ισχύς (Watt)			
	Κατοικία		Γραφείο	
	Θέρμανση	Ψύξη	Θέρμανση	Ψύξη
Α	2110	3780	2020	4720
Β	2980	4610	3410	5580
Γ	4330	3880	5550	4820
Δ	5370	3590	8510	4250

Πέρα από τα δύο είδη θερμοστατών, εξετάστηκαν και δύο είδη τοιχοποιίας πλήρωσης, το ένα από απλές διάτρητες οπτοπλίνθους και το άλλο από θερμομονωτικές οπτοπλίνθους. Απλοποιητικά το πάχος των τελευταίων λήφθηκε ίσο με το πάχος των συμβατικών οπτοπλίνθων (0,20m), με τη μόνη διαφορά μεταξύ των δύο υλικών να εντοπίζεται στον συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, καθώς στις συμβατικές οπτοπλίνθους λήφθηκε 0,58W/(m·K), ενώ στις θερμομονωτικές 0,18W/(m·K). Αυτό επιλέχθηκε, ώστε η θερμοχωρητικότητα των δύο διατομών τοιχοποιίας να είναι ίδια και να μην επηρεάζει τη ροή της θερμότητας.

2.1.3. Δυναμική μόνωση

Αφού πραγματοποιήθηκαν οι προσομοιώσεις που περιγράφηκαν παραπάνω, κρίθηκε σκόπιμο να εξεταστεί και το σενάριο της δυναμικής μόνωσης, ώστε να κατανοηθεί καλύτερα η επιρροή της μόνωσης στα ψυκτικά φορτία. Έτσι, για τις τέσσερις κλιματικές ζώνες, για τα δύο εξεταζόμενα πάχη μόνωσης και για τις δύο διαφορετικές διατομές, εισήχθη στο EnergyPlus ένα διάκενο αέρα πάχους 25mm και θερμικής αντίστασης 0,18(m^2·K)/W πίσω από την εσωτερική πλευρά του πάχους μόνωσης, το οποίο μεταβλήθηκε κατάλληλα, ώστε ο συντελεστής θερμοπερατότητας σε κάθε περίπτωση να παραμείνει αμετάβλητος. Για το διάστημα από 1/5 έως 30/9 από τις 0:00 έως τις 8:00 θυρίδες αερισμού ορίστηκαν να ανοίγουν στο εξωτερικό τμήμα, καθιστώντας πλέον το διάκενο αεριζόμενο και τη μόνωση να μην συνεισφέρει πια στη διατομή. Τα διαστήματα 16/4-30/4 και 1/10-15/10, αν και

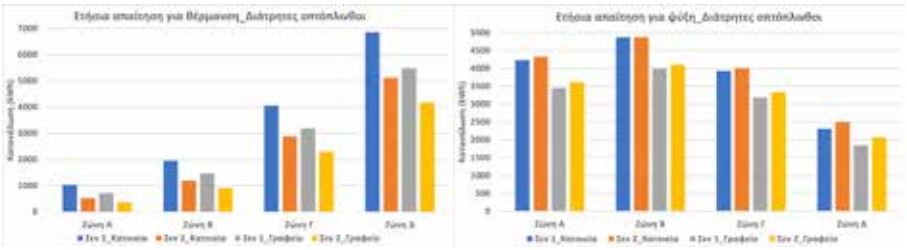
λειτουργεί η ψύξη, επιλέχθηκε η μόνωση να είναι σταθερή, επειδή παράλληλα δύναται να λειτουργήσει και το σύστημα θέρμανσης, στο οποίο η δυναμική μόνωση θα δρούσε επιβαρυντικά.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

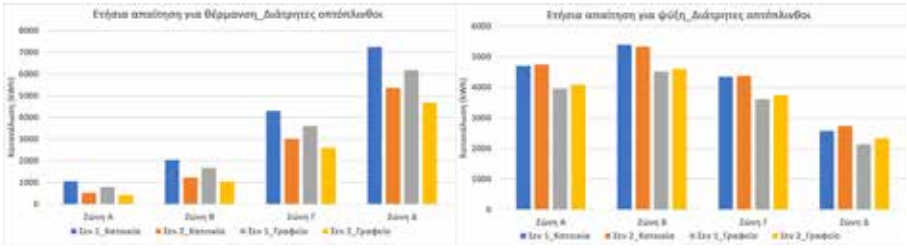
3.1. Απλή μόνωση

Για την τοιχοποιία πλήρωσης από συμβατικές οπτοπλίνθους και τη σταθερή μόνωση, παρατηρήθηκε σε όλες τις περιπτώσεις μείωση της απαίτησης για θέρμανση στο σενάριο 2, σε σχέση με το σενάριο 1, ίδιου περίπου μεγέθους για χρήση κατοικίας και γραφείου, ενώ κατά την περίοδο ψύξης, στην πλειοψηφία των κλιματικών Ζωνών παρατηρήθηκε μία αυξητική τάση στην ενεργειακή απαίτηση στο σενάριο 2. Στο κτίριο γραφείου η τάση αυτή ήταν ελαφρώς μεγαλύτερη, συγκριτικά με την κατοικία. Όσον αφορά το είδος του θερμοστάτη, ο λειτουργικής θερμοκρασίας οδήγησε σε υψηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις, μεγαλύτερη εξοικονόμηση τους χειμερινούς μήνες στο 2ο σενάριο και μικρότερη αυξητική τάση τους θερινούς μήνες. Τα αποτελέσματα που λήφθηκαν παρουσιάζονται στις Εικόνες 2 και 3 σε διαγραμματική μορφή.

Αναλυτικότερα, στον συμβατικό θερμοστάτη και την κατοικία, κατά την περίοδο θέρμανσης, το ισχυρότερα θερμομονωμένο κτίριο (σενάριο 2), παρουσίασε μείωση της τάξεως του 48,82% στη Ζώνη Α, 38,61% στη Ζώνη Β, 28,94% στη Ζώνη Γ και 25,45% στη Ζώνη Δ. Η αντίστοιχη μείωση στο κτίριο γραφείων ήταν της τάξεως του 48,04% στη Ζώνη Α, 37,98% στη Ζώνη Β, 28,01% στη Ζώνη Γ και 23,75% στη Ζώνη Δ. Αντίστοιχα, για την περίοδο ψύξης στο κτίριο κατοικίας, παρατηρήθηκε αύξηση της απαίτησης στο σενάριο 2, της τάξεως του 2,27% στη Ζώνη Α, 0,13% στη Ζώνη Β, 1,97% στη Ζώνη Γ και 7,92% στη Ζώνη Δ. Στο κτίριο γραφείων η αντίστοιχη αύξηση στην απαίτηση για ψύξη καταγράφηκε 4,8% στη Ζώνη Α, 2,66% στη Ζώνη Β, 4,8% στη Ζώνη Γ και 11,71% στη Ζώνη Δ.



Εικόνα 2: Ετήσια απαίτηση ενέργειας για θέρμανση και ψύξη στις 4 κλιματικές Ζώνες, με τη χρήση συμβατικού θερμοστάτη και τοιχοποιία πλήρωσης από διάτρητες οπτοπλίνθους.

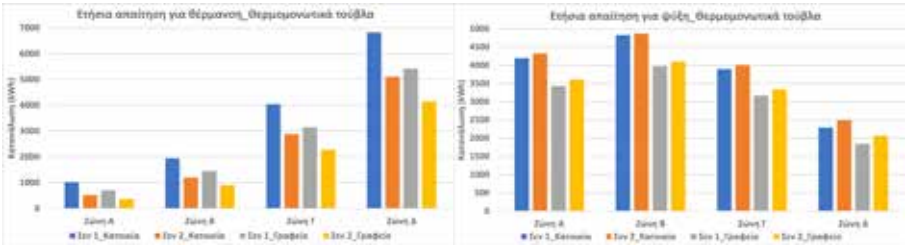


Εικόνα 3: Ετήσια απαίτηση ενέργειας για θέρμανση και ψύξη στις 4 κλιματικές Ζώνες, με τη χρήση θερμοστάτη λειτουργικής θερμοκρασίας και τοιχοποιία πλήρωσης από διάτρητες οπτοπλίνθους.

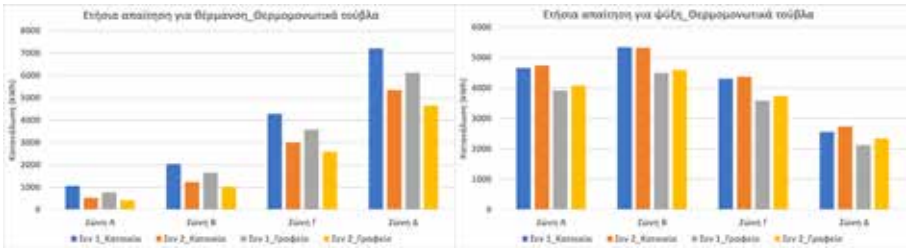
Στην περίπτωση του θερμοστάτη λειτουργικής θερμοκρασίας, στην κατοικία, κατά την περίοδο θέρμανσης υπολογίσθηκε μείωση της ενεργειακής απαίτησης του χώρου στο σενάριο 2, της τάξεως του 50,28% στη Ζώνη Α, 39,81% στη Ζώνη Β, 30,18% στη Ζώνη Γ και 26,06% στη Ζώνη Δ. Για το γραφείο οι ανάλογες μειώσεις ανέρχονται σε 46,79% στη Ζώνη Α, 37,77% στη Ζώνη Β, 28,09% στη Ζώνη Γ και 24,26% στη Ζώνη Δ. Ως προς την κατανάλωση για ψύξη, στην κατοικία καταγράφηκε

αύξηση της απαιτούμενης ενέργειας στο σενάριο 2 κατά 1,02% στη Ζώνη Α, μείωση κατά 1,09% στη Ζώνη Β και αύξηση κατά 0,75% και 6,33% στις Ζώνες Γ και Δ, αντίστοιχα. Στο γραφείο, η απαίτηση ενέργειας για ψύξη αυξήθηκε στο σύνολο των Ζωνών στο 2^{ο} σενάριο, με το αυξημένο πάχος μόνωσης, κατά 3,42%, 1,67%, 3,62% και 9,58% στις Ζώνες Α, Β, Γ και Δ, αντίστοιχα.

Όσον αφορά την τοιχοποιία πλήρωσης με θερμομονωτικά τούβλα, παρατηρείται παρόμοια συμπεριφορά με τη συμβατική τοιχοποιία. Το σενάριο 2 φαίνεται πως συμβάλλει σε μειωμένη απαίτηση την περίοδο θέρμανσης του κτιρίου, σε αντίθεση με τους μήνες λειτουργίας του συστήματος ψύξης, όπου εμφανίζει την τάση αύξησης της ενεργειακής απαίτησης στην πλειονότητα των θερμικών Ζωνών. Τα ανωτέρω παρατηρήθηκαν τόσο στην περίπτωση της κατοικίας, όσο και στην περίπτωση του γραφείου. Στις Εικόνες 4 και 5 παρουσιάζονται οι απαιτήσεις σε (kWh), όπως προέκυψαν για το σύνολο των εξεταζόμενων περιπτώσεων.



Εικόνα 4: Ετήσια απαίτηση ενέργειας για θέρμανση και ψύξη στις 4 κλιματικές Ζώνες, με τη χρήση συμβατικού θερμοστάτη και τοιχοποιία πλήρωσης από θερμομονωτικά τούβλα.



Εικόνα 5: Ετήσια απαίτηση ενέργειας για θέρμανση και ψύξη στις 4 κλιματικές Ζώνες, με τη χρήση θερμοστάτη λειτουργικής θερμοκρασίας και τοιχοποιία πλήρωσης από θερμομονωτικά τούβλα.

Πιο συγκεκριμένα, για τον συμβατικό θερμοστάτη, η μείωση που καταγράφηκε στην ενεργειακή απαίτηση για θέρμανση κατά το σενάριο 2, στην περίπτωση της κατοικίας ήταν 48,63%, 38,5%, 28,76% και 25,19% για τις Ζώνες Α, Β, Γ και Δ, αντίστοιχα. Στην περίπτωση του γραφείου, τα ποσοστά αυτά είναι 48,16%, 38,04%, 27,64% και 23,57%, για τις τέσσερις κλιματικές Ζώνες, αντίστοιχα. Ως προς την ψύξη, παρατηρήθηκε πάλι στο σενάριο 2 μία αυξητική τάση, με την απαίτηση του σεναρίου αυτού, στην περίπτωση της κατοικίας, να ανέρχεται αυτής του σεναρίου 1 κατά 3,07% στη Ζώνη Α, κατά 0,89% στη Ζώνη Β, κατά 2,81% στη Ζώνη Γ και κατά 8,95% στη Ζώνη Δ. Τα ποσοστά αυτά στο κτίριο γραφείου είναι ελαφρώς υψηλότερα, καθώς παρουσιάζεται αύξηση 5,34%, 3,23%, 5,38% και 12,36%, στις Ζώνες Α, Β, Γ και Δ, αντίστοιχα.

Στον θερμοστάτη λειτουργικής θερμοκρασίας καταγράφηκαν παρόμοια αποτελέσματα στη θέρμανση, με αυτά των αντίστοιχων περιπτώσεων της συμβατικής τοιχοποιίας, ενώ τα φορτία για ψύξη στο σενάριο 2 προέκυψαν ελαφρώς μεγαλύτερα για την περίπτωση της τοιχοποιίας από θερμομονωτικά τούβλα. Ειδικότερα, στην κατοικία, η απαίτηση για θέρμανση στο σενάριο 2 μειώθηκε κατά 50,1% στη Ζώνη Α, κατά 39,64% στη Ζώνη Β, κατά 30,01% στη Ζώνη Γ και κατά 25,8% στη Ζώνη Δ, σε σύγκριση με το σενάριο 1. Η αντίστοιχη μείωση στην απαίτηση του σεναρίου 2 στο γραφείο είναι 46,94%, 37,79%, 27,98% και 24,05%, στις Ζώνες Α, Β, Γ και Δ, αντίστοιχα. Στη Ζώνη Β στο ψυκτικό φορτίο της κατοικίας καταγράφηκε μείωση στο σενάριο 2 της τάξεως του 0,35%, ενώ σε όλες τις άλλες περιπτώσεις, η απαίτηση του σεναρίου 2 στην ψύξη υπολογίσθηκε υψηλότερη από εκείνη του

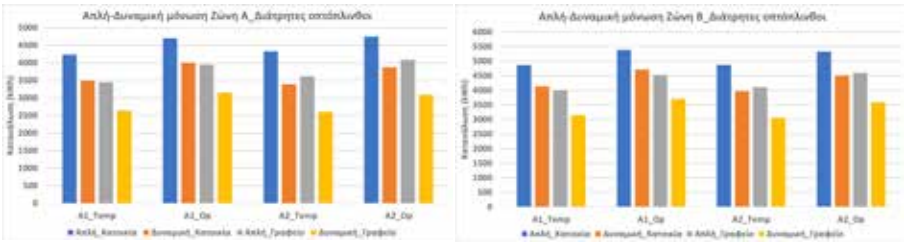
σεναρίου 1. Στην κατοικία τα ποσοστά αύξησης ήταν 1,75%, 1,49% και 7,3%, για τις Ζώνες Α, Γ και Δ, αντίστοιχα, ενώ στο κτίριο γραφείων η αύξηση ήταν 4,02%, 2,24%, 4,21% και 10,29%, για τις Ζώνες Α, Β, Γ και Δ, αντίστοιχα.

Τα δύο υλικά κατασκευής της τοιχοποιίας πλήρωσης, παρουσιάζουν παρόμοιες απαιτήσεις, τόσο σε θέρμανση όσο και σε ψύξη, στις αντίστοιχες περιπτώσεις. Πιο συγκεκριμένα, οι διαφορά στις απαιτήσεις είναι παντού κάτω του 1,5%, με το θερμομονωτικό τούβλο να οδηγεί συνήθως σε χαμηλότερη απαίτηση όλη την περίοδο του χρόνου. Ωστόσο, τα ποσοστά είναι σταθερά πολύ χαμηλά και επομένως, κρίνονται ως ανάξια σημασίας.

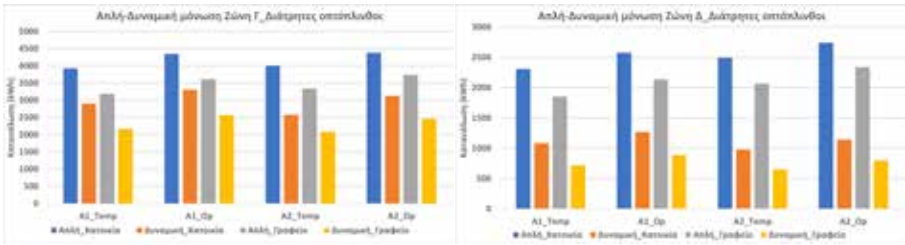
3.2. Δυναμική μόνωση

Με την εισαγωγή της δυναμικής μόνωσης τους μήνες που υφίστανται ψυκτικές απαιτήσεις στο κτίριο, παρατηρούνται έντονες διαφοροποιήσεις στα ψυκτικά φορτία των τεσσάρων κλιματικών Ζωνών, σε σχέση με τα αρχικά σενάρια της απλής θερμομονωτικής προστασίας. Η μείωση της ενεργειακής απαίτησης για ψύξη που εντοπίζεται, διαφέρει από Ζώνη σε Ζώνη και διαφοροποιείται ακόμη, από τη χρήση του κτιρίου και το είδος του εγκατεστημένου θερμοστάτη. Οι συνολικές απαιτήσεις δίνονται στα διαγράμματα των Εικόνων 6 και 7 για την συμβατική τοιχοποιία και των Εικόνων 8 και 9 για την τοιχοποιία από θερμομονωτικά τούβλα.

Πιο αναλυτικά, για την περίπτωση της τοιχοποιίας από διάτρητες οπτοπλίνθους, για χρήση κατοικίας στη Ζώνη Α, η μείωση των ψυκτικών φορτίων που καταγράφηκε για τον συμβατικό θερμοστάτη ήταν της τάξεως του 17,59% για το σενάριο 1 και του 21,57% για το σενάριο 2. Στον θερμοστάτη λειτουργικής θερμοκρασίας η εξοικονόμηση ενέργειας από τη δυναμική μόνωση για το σενάριο 1 υπολογίσθηκε 14,83% και για το σενάριο 2, 18,38%. Για χρήση γραφείου τα αντίστοιχα ποσοστά για τον συμβατικό θερμοστάτη ανέρχονται σε 23,29%, στο σενάριο 1 και σε 27,93%, στο σενάριο 2, ενώ για τον θερμοστάτη λειτουργικής θερμοκρασίας σε 20,26%, στο σενάριο 1 και σε 24,36%, στο σενάριο 2.



Εικόνα 6: Ενεργειακή απαίτηση για ψύξη Ζωνών Α και Β, κατοικίας και γραφείου, για απλή και δυναμική μόνωση, για τους δύο θερμοστάτες και τα δύο Σενάρια, με συμβατική τοιχοποιία.



Εικόνα 7: Ενεργειακή απαίτηση για ψύξη Ζωνών Γ και Δ, κατοικίας και γραφείου, για απλή και δυναμική μόνωση, για τους δύο θερμοστάτες και τα δύο Σενάρια, με συμβατική τοιχοποιία.

Αντίστοιχα, στη Ζώνη Β η δυναμική μόνωση στην κατοικία οδήγησε σε χαμηλότερη ενεργειακή απαίτηση για ψύξη της τάξεως του 15,06%, στο σενάριο 1, του 18,58% στο σενάριο 2, για τον συμβατικό θερμοστάτη, ενώ για τον θερμοστάτη λειτουργικής θερμοκρασίας του 12,48%, στο σενάριο

1 και του 15,41%, στο σενάριο 2. Στο γραφείο, για τον συμβατικό θερμοστάτη καταγράφηκε μείωση 21,13%, στο σενάριο 1 και 25,45%, στο σενάριο 2, ενώ για τον θερμοστάτη λειτουργικής θερμοκρασίας 18,21%, στο σενάριο 1 και 21,89%, στο σενάριο 2.

Στην κλιματική Ζώνη Γ, στην κατοικία η δυναμική μόνωση προκαλεί μείωση του ψυκτικού φορτίου, η οποία για τον συμβατικό θερμοστάτη ανέρχεται στο 26,15% στο σενάριο 1 και 31,22% στο σενάριο 2, συγκριτικά με την περίπτωση της απλής μόνωσης στο κτιριακό περίβλημα. Στην περίπτωση του γραφείου, η μείωση αυτή είναι 31,86% για το σενάριο 1 και 37,52% για το σενάριο 2. Λίγο μικρότερη εξοικονόμηση ενέργειας παρατηρείται στην περίπτωση του θερμοστάτη λειτουργικής θερμοκρασίας, καθώς στο κτίριο κατοικίας η απαίτηση για ψύξη με τη δυναμική μόνωση μειώνεται κατά 23,82% στο σενάριο 1 και κατά 28,42% στο σενάριο 2, ενώ στο κτίριο γραφείων κατά 28,88% στο σενάριο 1 και κατά 34,25% στο σενάριο 2.

Τέλος, από τη μελέτη της Ζώνης Δ, προέκυψε μείωση των απαιτήσεων για ψύξη, κατά την εφαρμογή της δυναμικής μόνωσης, που στην περίπτωση της κατοικίας, για τον συμβατικό θερμοστάτη ανέρχεται σε 53,1% στο Σενάριο 1, 60,75% στο Σενάριο 2, ενώ για τον θερμοστάτη λειτουργικής θερμοκρασίας σε 50,65% στο Σενάριο 1 και σε 58,24% στο Σενάριο 2. Στο γραφείο, τα ποσοστά αυτά είναι σαφώς υψηλότερα, καθώς για τον συμβατικό θερμοστάτη ανέρχονται σε 61,18% στο σενάριο 1 και 68,43% στο σενάριο 2, ενώ για τον θερμοστάτη λειτουργικής θερμοκρασίας σε 58,43% στο σενάριο 1 και σε 65,85% στο σενάριο 2.

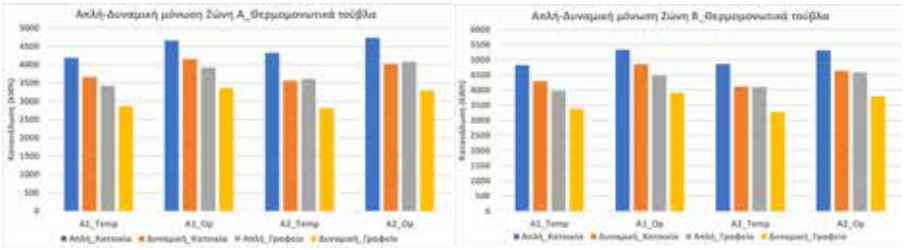
Όπως φαίνεται από τις Εικόνες 8 και 9, τα αποτελέσματα που λήφθηκαν από την ανάλυση του κτιρίου για τοιχοποιία πλήρωσης από θερμομονωτικά τούβλα, διαφέρουν από εκείνα που ήδη παρατέθηκαν, για την συμβατική τοιχοποιία. Πιο συγκεκριμένα, στα θερμομονωτικά τούβλα η μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας για ψύξη, προέκυψε μικρότερη από εκείνη στην περίπτωση της συμβατικής τοιχοποιίας. Ωστόσο και στις δύο εξεταζόμενες καταστάσεις, η εξοικονόμηση ενέργειας στο κτίριο γραφείου είναι μεγαλύτερη, όπως και στον συμβατικό θερμοστάτη, έναντι του θερμοστάτη λειτουργικής θερμοκρασίας.

Ειδικότερα, στην Α κλιματική Ζώνη, η μείωση που επιτυγχάνεται στην ενέργεια για ψύξη με τη δυναμική μόνωση, σε σχέση με την αντίστοιχη περίπτωση της απλής θερμομονωτικής προστασίας, για την κατοικία και τον συμβατικό θερμοστάτη ανέρχεται σε 12,7% στο σενάριο 1 και 17,49 στο σενάριο 2, ενώ για τον θερμοστάτη λειτουργικής θερμοκρασίας, σε 10,75% στο σενάριο 1 και σε 15,07% στο σενάριο 2. Για τις αντίστοιχες περιπτώσεις του κτιρίου γραφείων, για τον συμβατικό θερμοστάτη επιτυγχάνεται εξοικονόμηση 16,34% στο σενάριο 1, 21,85% στο σενάριο 2 και για τον θερμοστάτη λειτουργικής θερμοκρασίας 14,16% στο σενάριο 1 και 19,14% στο σενάριο 2.

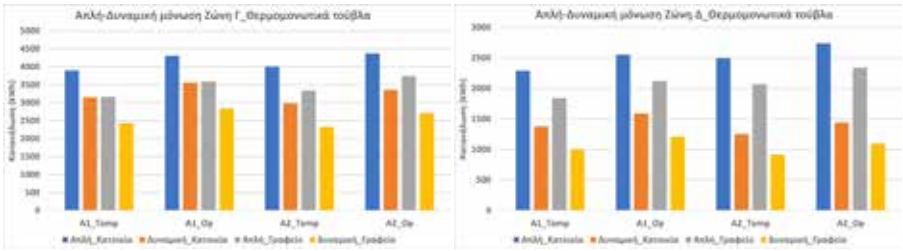
Στη Ζώνη Β, η εξοικονόμηση που επιτυγχάνεται με τη δυναμική μόνωση είναι χαμηλότερη αυτής στην Ζώνη Α. Στην περίπτωση του κτιρίου κατοικίας, για τον συμβατικό θερμοστάτη, στο σενάριο 1 εξοικονομείται 10,93%, στο σενάριο 2 15,3%, ενώ στον θερμοστάτη λειτουργικής θερμοκρασίας 9,08% στο σενάριο 1 και 12,88% στο σενάριο 2. Αντιστοίχως, στο γραφείο στον συμβατικό θερμοστάτη προκύπτει εξοικονόμηση κατά 14,78% στο σενάριο 1, κατά 20,04% στο σενάριο 2 και στον θερμοστάτη λειτουργικής θερμοκρασίας κατά 12,66% στο σενάριο 1 και κατά 17,2% στο σενάριο 2.

Στην κλιματική Ζώνη Γ, όπως η μείωση της απαιτούμενης ενέργειας για ψύξη, λόγω της λειτουργίας της δυναμικής μόνωσης, είναι μεγαλύτερη αυτής στη Ζώνη Α. Πιο αναλυτικά, για την κατοικία, στην περίπτωση του συμβατικού θερμοστάτη το ποσοστό εξοικονόμησης ανέρχεται στο 19,32% για το σενάριο 1, στο 25,5% για το σενάριο 2, ενώ με τον θερμοστάτη λειτουργικής θερμοκρασίας τα ποσοστά αυτά μεταβάλλονται σε 17,53% για το σενάριο 1 και σε 23,22% για το σενάριο 2. Στην περίπτωση του γραφείου, τα ποσοστά εξοικονόμησης αυξάνονται, καθώς για τον συμβατικό θερμοστάτη και το σενάριο 1 αγγίζει το 23,2%, για το σενάριο 2 το 30,03%, ενώ για τον θερμοστάτη λειτουργικής θερμοκρασίας, το 20,92% στο σενάριο 1 και το 27,44% στο σενάριο 2.

Τέλος, στη Φλώρινα και στη Ζώνη Δ, το ποσοστό μείωσης της ενέργειας για ψύξη λόγω της προσθήκης της δυναμικής μόνωσης, γίνεται ακόμη υψηλότερο. Για την κατοικία μεγαλύτερη μείωση επιτυγχάνεται με τον συμβατικό θερμοστάτη, καθώς στο σενάριο 1 το ποσοστό εξοικονόμησης υπολογίστηκε 39,78% και στο σενάριο 2 49,7%, ενώ για τον θερμοστάτη λειτουργικής θερμοκρασίας τα αντίστοιχα ποσοστά είναι σαφώς χαμηλότερα, με το σενάριο 1 να εξοικονομεί 37,77% της απαιτούμενης ενέργειας με απλή μόνωση και το σενάριο 2 47,45%. Στην περίπτωση του γραφείου, παρατηρείται κάτι αντίστοιχο, καθώς για τον συμβατικό θερμοστάτη και το σενάριο 1 το ποσοστό μεταπίπτει στο 45,47%, στο σενάριο 2 στο 55,64%, ενώ για τον θερμοστάτη λειτουργικής θερμοκρασίας, για το σενάριο 1 στο 43,04% και για το σενάριο 2 στο 53,12%.



Εικόνα 8: Ενεργειακή απαίτηση για ψύξη Ζωνών Α και Β, κατοικίας και γραφείου, για απλή και δυναμική μόνωση, για τους δύο θερμοστάτες και τα δύο Σενάρια, με τοιχοποιία θερμομονωτικών τούβλων.



Εικόνα 9: Ενεργειακή απαίτηση για ψύξη Ζωνών Γ και Δ, κατοικίας και γραφείου, για απλή και δυναμική μόνωση, για τους δύο θερμοστάτες και τα δύο Σενάρια, με τοιχοποιία θερμομονωτικών τούβλων.

Για την καλύτερη μελέτη της συμπεριφοράς των δύο θερμοστατών που εξετάστηκαν παράλληλα με τις υπόλοιπες παραμέτρους και την κατανόηση της αιτίας που η ύπαρξη θερμοστάτη λειτουργικής θερμοκρασίας οδηγεί σε αυξημένη ενεργειακή απαίτηση, παρατίθεται στην Εικόνα 10 το διάγραμμα της μέσης θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα και της λειτουργικής θερμοκρασίας του χώρου, τον μήνα Ιούνιο, για μία τυχαία εξεταζόμενη περίπτωση, με δυναμική μόνωση. Ο Ιούνιος επιλέχθηκε, καθώς κατά τη διάρκειά του δεν επικρατούν ακραίες εξωτερικές θερμοκρασίες. Από το διάγραμμα διακρίνεται ξεκάθαρα ότι η λειτουργική θερμοκρασία του χώρου είναι κατά κανόνα υψηλότερη, καθώς επηρεάζεται από τις αυξημένες επιφανειακές θερμοκρασίες της εσωτερικής επιφάνειας των εξωτερικών τοίχων, που αυξάνονται αρκετά την ημέρα, λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας.

Εικόνα 10: Ζώνη Α, Σενάριο 1 με συμβατικό θερμοστάτη και δυναμική μόνωση: Διαφορές μέσης θερμοκρασίας εσωτερικού αέρα-λειτουργικής θερμοκρασίας

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία εξετάζει το κατά πόσο η αυξημένη θερμομονωτική προστασία σε ένα κτίριο λειτουργεί επιβαρυντικά ως προς την ενεργειακή του απαίτηση την περίοδο ψύξης και υπό ποιες προϋποθέσεις. Για τον σκοπό αυτό εξετάστηκε ένα τυχαίο κτίριο, στις τέσσερις κλιματικές Ζώνες, με πάχη μόνωσης αυτά των δύο ακραίων Ζωνών, για χρήση κατοικίας και γραφείου και για συμβατικό και λειτουργικής θερμοκρασίας θερμοστάτη, με απλή και δυναμική μόνωση. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις και την επεξεργασία τους συγκεντρώνονται στα εξής:

- Από την ανάλυση στις Ζώνες για την απλή θερμομονωτική προστασία, φαίνεται να υπάρχει μία τάση αύξησης του ψυκτικού φορτίου για το αυξημένο πάχος μόνωσης, ωστόσο, είναι ποσοστιαία πολύ μικρή και σαν ετήσια εικόνα, η αυξημένη θερμομονωτική προστασία μειώνει σημαντικά τις απαιτήσεις για θέρμανση, εξοικονομώντας πολλές kWh.
- Η δυναμική μόνωση συμβάλλει σημαντικά στη μείωση της απαιτούμενης ενέργειας για ψύξη, καθώς τη νύχτα το κτίριο αποβάλλει ελεύθερα την πλεονάζουσα θερμότητα. Μεγαλύτερη εξοικονόμηση παρατηρείται στην κλιματική Ζώνη Δ, ενώ μικρότερη στη Ζώνη Β. Αυτό οφείλεται στις θερμές νύχτες της Ζώνης Β, λόγω του φαινομένου της αστικής νησίδας, επομένως, το κτίριο αποβάλλει στο περιβάλλον μικρότερα ποσά θερμότητας. Ωστόσο, η εξοικονόμηση ενέργειας στη Ζώνη Α και τη Ζώνη Γ, όπου οι απαιτήσεις για ψύξη είναι υψηλότερες της Ζώνης Δ, κρίνονται ως πιο σημαντικές.
- Στην περίπτωση της δυναμικής μόνωσης, η αυξημένη θερμομονωτική προστασία τη διάρκεια της μέρας, οδηγεί σε μεγαλύτερες εξοικονομήσεις ενέργειας, καθώς η θερμότητα που αποθηκεύεται στο κτίριο είναι λιγότερη και αποβάλλεται πιο γρήγορα τις νύχτες.
- Με τη δυναμική μόνωση παρατηρείται μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας για ψύξη στο κτίριο γραφείων. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην υπερθέρμανση του χώρου του γραφείου από τις 16:00 και μετά που δεν λειτουργεί ο κλιματισμός. Σε αντίθεση με την κατοικία, δεν υπάρχουν καθόλου απώλειες λόγω αερισμού για δεκαέξι ώρες, οπότε η απουσία μόνωσης τις νυχτερινές ώρες συμβάλλει στην αποφόρτιση του χώρου σε μεγάλο βαθμό.
- Για τις περιπτώσεις ύπαρξης της δυναμικής μόνωσης, ο θερμοστάτης λειτουργικής θερμοκρασίας οδηγεί σε υψηλότερες απαιτήσεις και λιγότερη εξοικονόμηση ενέργειας τους θερινούς μήνες, σε σχέση με τον συμβατικό θερμοστάτη. Αιτία αυτού είναι οι υψηλές επιφανειακές θερμοκρασίες των τοίχων, ιδίως τις απογευματινές ώρες, που ενεργοποιούν τον θερμοστάτη και το σύστημα απαιτεί περισσότερη ενέργεια στην προσπάθειά του να τις ελαττώσει.
- Τα δύο υλικά της τοιχοποιίας, η συμβατική οπτόπλινθος και το θερμομονωτικό τούβλο, στα σενάρια με την απλή μόνωση, οδηγούν σε παρόμοιες ενεργειακές απαιτήσεις, με το συμβατικό τούβλο να δίνει ελαφρώς υψηλότερες για ψύξη, κάτι που οφείλεται στο ότι κατά τη διάρκεια της ημέρας, η θερμότητα που διαπερνά τη μόνωση φτάνει πιο γρήγορα στο εσωτερικό, λόγω του μεγαλύτερου λ του υλικού. Με την ύπαρξη δυναμικής μόνωσης όμως, τόσο στην κατοικία, όσο και στο γραφείο, καταγράφηκε μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας για ψύξη με τη συμβατική οπτόπλινθο. Η εξήγηση είναι ότι το μεγαλύτερο λ του συμβατικού τούβλου επιτρέπει στη θερμότητα που είναι εγκλωβισμένη στον χώρο να αποβληθεί πιο γρήγορα στο περιβάλλον, κατά τη διάρκεια της νύχτας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), “Global Warming of 1,5oC,” 2018.

[2] European Commission, “Sustainable buildings for Europe’s climate-neutral future,” 2019. https://ec.europa.eu/easme/en/news/sustainable-buildings-europe-s-climate-neutral-future.

[3] European Commission, “Energy use in buildings.” https://ec.europa.eu/energy/eu-buildings-factsheets-topics-tree/energy-use-buildings_en.

[4] European Commission, *A Renovation Wave for Europe - greening our buildings, creating jobs, improving lives, COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE*

AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS. 2020.

[5] E. Rodrigues, M. S. Fernandes, N. Soares, Á. Gomes, A. R. Gaspar, and J. J. Costa, "The potential impact of low thermal transmittance construction on the European design guidelines of residential buildings," *Energy Build.*, vol. 178, pp. 379–390, 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.08.009.

[6] K. M. S. Chvatal and H. Corvacho, "The impact of increasing the building envelope insulation upon the risk of overheating in summer and an increased energy consumption," *J. Build. Perform. Simul.*, vol. 2, no. 4, pp. 267–282, 2009, doi: 10.1080/19401490903095865.

[7] W. A. Friess, K. Rakhshan, and M. P. Davis, "A global survey of adverse energetic effects of increased wall insulation in office buildings: degree day and climate zone indicators," *Energy Effic.*, vol. 10, no. 1, pp. 97–116, 2017, doi: 10.1007/s12053-016-9441-z.

[8] M. S. Fernandes, E. Rodrigues, A. R. Gaspar, J. J. Costa, and Á. Gomes, "The impact of thermal transmittance variation on building design in the Mediterranean region," *Appl. Energy*, vol. 239, pp. 581–597, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.01.239.

[9] M. Detommaso, A. Gagliano, L. Marletta, F. Nocera, F. Bisegna, and L. Tronchin, "Effectiveness of VIPs and PCMs on the energy performance and thermal comfort in buildings," 2020, doi: 10.1109/EEEIC/ICPSEurope49358.2020.9160717.

[10] S. Verbeke and A. Audenaert, "Thermal inertia in buildings: A review of impacts across climate and building use," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, pp. 2300–2318, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.08.083.

[11] Υ.Π.ΕΝ., *Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2017: Αναλυτικές εθνικές προδιαγραφές παραμέτρων για τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης κτηρίων και την έκδοση του πιστοποιητικού ενεργειακής απόδοσης*. 2017.

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΑΠΑΙΤΗΣΕΩΝ ΤΩΝ ΝΕΩΝ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΩΝ ΓΙΑ ΦΥΣΙΚΟ ΦΩΤΙΣΜΟ (EN17037) ΣΤΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΚΤΙΡΙΩΝ ΓΡΑΦΕΙΩΝ

Άρης Τσαγκρασούλης[1], Αντώνιος Κονταδάκης[1], Λάμπρος Δούλος[2,3], Κώσταντίνος Λάσκος[4]

[1] Τμήμα Αρχ. Μηχανικών, Παν. Θεσσαλίας,
[2] Εργαστήριο Φωτοτεχνίας, Τμήμα ΗΜΜΥ, ΕΜΠ
[3] Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο , Μεταπτυχιακό πρόγραμμα «Σχεδιασμός Φωτισμού»
[4] Energy and Buildings
e-mail: atsagras@uth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Την τελευταία δεκαετία υπήρξε μια σημαντική αλλαγή στην εκτίμηση των συθηκών φυσικού φωτισμού στο εσωτερικό των κτιρίων. Η αλλαγή αυτή οφείλεται και στην αύξηση της υπολογιστικής ισχύος των Η/Υ, γεγονός που επέτρεψε την εκτίμηση του φυσικού φωτισμού σε ωριαία βάση χρησιμοποιώντας τυπικά μετεωρολογικά έτη. Έτσι το 2013 στις ΗΠΑ εισήχθη η οδηγία IES LM-83-12 ενω στην Ευρώπη το 2018 το πρότυπο EN 17017-2018 «Daylight in buildings" με το οποίο προτείνεται μια σειρά κριτηρίων που επιτρέπουν την αξιολόγηση των βασικών παραμέτρων που σχετίζονται με το φυσικό φως με κυριάρχο βέβαια την επάρκεια σε φυσικό φως. Για κάθε ένα από αυτά τα κριτήρια, το πρότυπο καθορίζει τρείς κατηγορίες απόδοσης: ελάχιστη (Κατ.1), μεσαία (Κατ.2) και υψηλή (Κατ.3). Το συγκεκριμένο κριτήριο ικανοποιείται είτε με υπολογισμό της χωρικής κατανομής του Παράγοντα Φυσικού Φωτισμού (ΠΦΦ, στατική μέθοδος) είτε με εκτίμηση της χωρικής αυτονομίας φωτισμού που προέρχεται απο ωριαίες προσομοιώσεις (χΑΦ, δυναμική μέθοδος). Προφανώς η ένταξη στις προαναφερθείσες κατηγορίες απόδοσης εξαρτάται απο τις ιδιότητες και το μέγεθος του ανοίγματος σε σχέση με τον χώρο, την ύπαρξη συστημάτων σκίασης και τον προσανατολισμό. Όμως η αλλαγή αυτών των παραμέτρων επηρεάζει και την κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση , ψύξη και φωτισμό. Στην συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιούμε ενα τυπικό χώρο γραφείων και μεταβάλλωντας τα χαρακτηριστικά της πρόσοψης εκτιμάται η κατηγορία απόδοσης τόσο με στην στατική όσο και με την δυναμική μέθοδο. Ταυτόχρονα πραγματοποιείται και υπολογισμός της ενεργειακής κατανάλωσης ωστε να εκτιμηθεί η επίδραση της κάθε κατηγορίας στο ενεργειακό ισοζύγιο του χώρου που εξετάζεται. Η συγκεκριμένη επίδραση είναι καταλυτικής σημασίας για την εθνική μεθοδολογία υπολογισμού της ενεργειακής αποδοτικότητας των κτιρίων. Τα συμπεράσματα είναι :

- Σε αστικό περιβάλλον τόσο η στατική όσο και η δυναμική έχουν παρόμοια αποτελέσματα εκτός των περιπτώσεων στις οποίες τα επίπεδα φωτισμού στο εσωτερικό του χώρου επηρεάζονται σε σημαντικό βαθμό απο την ανάκλαση της ηλ. ακτινοβολίας σε απέναντι του ανοίγματος εμπόδια. Αυτό συμβαίνει για λόγο επιφάνειας αναοίγματος προς επιφάνεια δαπέδου WFR >= 35%. Σε πρακτικό επιπεδο, σε αυτή την περίπτωση, αυτό σημαίνει οτι η δυναμική μέθοδος η οποία είναι πολυ απαιτητική στον υπολογισμό δεν διαφοροποιείται σημαντικά απο την στατική δηλ. την κατανομή των ΠΦΦ των οποίων ο υπολογισμός είναι ευκολότερος.

- Στην μέση κατηγορία (Κατ. 2), χωρίς εμπόδια, η δυναμική μέθοδος προσφέρει καλύτερα αποτελέσματα γιατι μπορεί να επιτευχθεί με μικρότερο μέγεθος ανοιγμάτων και συνεπώς να είναι μικρότερη και η κατανάλωση ενέργειας.

- Το πρότυπο EN 17037 ωθεί τις σχεδιαστικές ομάδες στην επίτευξη καλύτερης κατηγορίας επάρκειας φ. φωτισμού. Φυσικά αυτό συνοδεύεται και απο αύξηση της κατανάλωσης και αυτό θα πρέπει να τονίζεται. Μπορεί να επιτευχθεί η ανώτερη κατηγορία επάρκειας φ. φωτισμού με ταυτόχρονα μειωμένη κατανάλωση ενέργειας; Σε περιπτώσεις σαν τον χώρο που εξετάσθηκε, ενα δυναμικό σύστημα σκίασης μπορεί να συμβάλλει σε αυτή την κατεύθυνση. Εδώ όμως χρειάζεται και αλλαγή της εθνικής μεθοδολογίας ώστε να μπορεί να εκτιμηθεί αυτή η δυναμική σκίαση.

Λέξεις Κλειδιά: Φυσικός φωτισμός, χωρική αυτονομία φωτισμού, παράγοντες φυσικού φωτισμού, EN 17037.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Παραδοσικά η εκτίμηση του φυσικού φωτισμού στο εσωτερικό των κτιρίων πραγματοποιούνταν με την χρήση των Παραγοντων Φυσικού Φωτισμού (ΠΦΦ). Ο ΠΦΦ ορίζεται σαν ο λόγος του φωτισμού στο εσωτερικό προς τον φωτισμό στο εξωτερικό (χωρίς εμπόδια) κάτω απο συνθήκες πλήρως νεφοσκεπούς ουρανού [1]. Είναι ενας απλός δείκτης με κύριο πλεονέκτημα την απλότητα του υπολογισμού του και την δυνατότητα να επαληθευθεί με πραγματικές μετρήσεις. Αυτή όμως η απλότητα δημιουργεί και τα μειονεκτήματά του. Λόγω αζιμουθιακής συμμετρίας της κατανομής λαμπρότητας στον ουράνιο θόλο ο ΠΦΦ δεν εξαρτάται απο τον προσανατολισμό (αν και έχουν προταθεί συντελεστές διόρθωσης [2]). Έτσι π.χ. σε νότιου προσανατολισμού προσόψεις, ο σχεδιασμός μπορεί να οδηγησει σε αυξημένο μέγεθος υαλοπινάκων αυξάνωντας έτσι και τα ηλιακά κέρδη κατα την διάρκεια των θερινών μηνών [3]. Όπως προαναφέρθηκε, λόγω της ευκολίας υπολογισμού του , ο ΠΦΦ εξακολουθεί και χρησιμοποιείται μέχρι σήμερα έχοντας υιοθετηθεί σαν δείκτης σχεδιασμού απο ευρωπαικούς κανονισμούς (EN 15193-1 [4] , EN 17037 [5]) και φυσικα σε εθνικές οδηγίες ή συστηματα περιβαλλοντικης και ενεργειακης αξιολόγησης κτιρίων [6]. Η χρήση του αντιπροσωπεύει το «χειρότερο σενάριο» συνεπώς η εξοικονόμηση ενέργειας που υπολογίζεται μπορεί να είναι στην πράξη μεγαλύτερη

Λόγω της αύξηση της υπολογιστικής ισχύος των Η/Υ έγινε δυνατός ο υπολογισμός των ωριαίων τιμών φωτισμού με την βοήθεια κλιματικών αρχείων. Μια χρονοσειρά όμως ωριαίων τιμών φωτισμού δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί εύκολα σαν δείκτης σχεδιασμού. Έτσι προτάθηκαν (Climatic Based Daylight Modelling, CBDM [7]) η αυτονομία φωτισμού (ΑΦ, ποσοτό ωρών λειτουργίας στο οποίο ο φωτισμός είναι μεγαλύτερος απο κάποιο όριο) και οι χρήσιμες τιμές φωτισμού (ποσοστό ωρών στο οποίο ο φωτισμός είναι μεγαλύτερος απο ένα κάτω όριο και μικρότερος απο ένα άνω όριο (π.χ. 3000lx) [8].

Η μεγάλη αλλαγή πραγματοποιήθηκε με τον Αμερικανικό κανονισμό IES LM 83-12 [9] στον οποίο προτείνονται δύο δείκτες εκτίμησης του φυσικού φωτισμού α) η χωρική αυτονομία φωτισμού $sDA_{300\ lx/50\%}$ η οποία ορίζεται ώς το ποσοστό του χώρου (επιφάνεια εργασίας) στο οποίο οι τιμές φωτισμού είναι μεγαλύτερες απο 300 lx στο 50% του χρόνου λειτουργίας σε ετήσια βάση (ωράριο 8:00-16:00). (χΑΦ) και β) η ετήσια έκθεση σε ηλιακό φωτισμό $ASE_{1000\ lx/250\ h}$. Δηλ. άμεσος ηλιακός φωτισμός (>=1000 lx) όχι περισσότερο απο 250 ώρες σε ετήσια βάση σε ποσοστό μικρότερο απο το 7% της επιφάνειας εργασίας.

Η μεθοδολογία υπολογισμού των προαναφερθέντων δεικτών του IES LM 83-12 είναι υπολογιστικά απαιτητική [10] και προυποθέτει την λειτουργία κάποιου συστήματος σκίασης. Αυτό το σύστημα ενεργοποιείται στην περίπτωση που ενα ποσοτό > 2% των σημείων υπολογισμού στην επφάνεια εργασίας λαμβάνει άμεσο ηλιακό φωτισμό > 1000 lx.

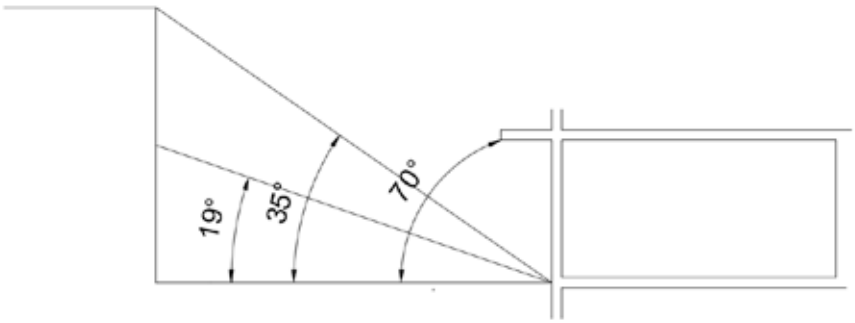
Στο ίδιο πνεύμα , δηλ. της υιοθέτησης δυναμικών κριτηρίων για την εκτίμηση του φυσικού φωτισμού κινείται και το ευρωπαικό προτυπο EN 17037. Δημοσιεύθηκε στα τέλη του 2018 μετά από ένα πολυετές διάστημα συζητήσεων. Το συγκεκριμένο πρότυπο προσπαθεί να γεφυρώσει τις δύο προσεγγίσεις δηλ. την εκτίμηση του φ.φ. με χρήση ενος στατικού δείκτη (ΠΦΦ) και την εκτίμηση μεσω της χρήσης ενος δυναμικού δείκτη (χΦΑ). Προτείνονται δε μια σειρά κριτηρίων που επιτρέπουν την αξιολόγηση των βασικών παραμέτρων που σχετίζονται με το φυσικό φως. Τα κριτήρια είναι: α) η επάρκεια σε φυσικό φως, β) η θέα, γ) η έκθεση σε ηλιακό φως και δ) η προστασία απο την θάμβωση. Για κάθε ένα από αυτά τα κριτήρια, το πρότυπο καθορίζει τρείς κατηγορίες απόδοσης: ελάχιστη, μεσαία και υψηλή. Στην συγκεκριμένη εργασία ενδιαφερόμαστε για το πρώτο κριτήριο για το οποίο η απαίτηση στην χαμηλότερη κατηγορία είναι (Κατ. 1) είναι η επίτευξη 300 lx στο 50% της επιφάνειας εργασίας στο 50% του χρόνου με φυσικό φως και ταυτόχρονα η επίτευξη 100 lx στο 95% της επιφάνειας εργασίας πάλι για 50% του χρόνου. Στη μεσαία κατηγορία (Κατ. 2) τα προαναφερθέντα επίπεδα τροποποιούνται σε 500 lx και 300 lx ενω στην υψηλή κατηγορία (Κατ. 3) 750 lx και 500 lx αντίστοιχα. Είναι προφανές ότι για τον υπολογισμό αυτό χρειάζεται η εκτίμηση των τιμών φ.φ. σε ωριαίο επίπεδο χρησιμοποιώντας κάποιο τυπικό μετεωρολογικό έτος. Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονισθεί η σπουδαιότητα της ακρίβειας των δεδομένων που υπάρχουν στα κλιματικά αρχεία , ιδίως αυτών που σχετίζονται με τον φ.φωτισμό. Εναλλακτικά το πρότυπο προβλέπει να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν κριτήριο και η χωρική κατανομή των ΠΦΦ στην επιφάνεια εργασίας. Έτσι για την Αθήνα, η απαίτηση στην χαμηλότερη κατηγορία είναι (κατ. 1) είναι η επίτευξη ΠΦΦ >1.5% στο 50% της επιφάνειας εργασίας και ταυτόχρονα η επίτευξη >0.5% στο 95% της επιφάνειας εργασίας. Στη μεσαία κατηγορία (κατ. 2) οι τιμές των ΠΦΦ τροποποιούνται σε 2.6% και 1.5 % lx ενώ στην υψηλή κατηγορία (κατ. 3) 3.9% και 2.6%. Λόγω πρόσφατης έκδοσης του πρότυπου η βιβλιογραφία είναι

περιορισμένη αλλά όχι ανύπαρκτη. Οι B. Paule & F. Flourentzou [11] πραγματοποίησαν μια ανάλυση για την επίδραση των απαιτήσεων του πρότυπου στο ενεργειακό ισοζύγιο τυπικών χώρων καταλήγωντας στα εξής συμπεράσματα. Το πρότυπο φαίνεται να προωθεί την αύξηση των διαστάσεων των ανοιγμάτων με σημαντική όμως αύξηση της ενεργειακής κατανάλωσης. Κατή την γνώμη των συγγραφέων η υψηλή κατηγορία θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί με την υποσημείωση ότι μπορεί να είναι ιδιαίτερα επιβαρυντική στην ενεργειακή κατανάλωση. Σε μια παρόμοια εργασία ο B. Paule [12] διαπίστωσε ότι το πρότυπο δύκολα μπορεί να εφαρμοσθεί σε πυκνό αστικό ιστό καθώς επίσης και σε χώρους των οποίων το βάθος είναι μεγαλύτερο απο το διπλάσιο του ύψους. Οι N. Nataša Šprah & Mitja Košir [13] διερεύνησαν την συμβατότητα του νέου πρότυπου με τον Σλοβενικό κτιριοδομικό κανονισμό. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι απαιτείται σχετικά χαμηλή αστική πυκνότητα για την εκπλήρωση των απαιτήσεων της χαμηλότερης κατηγορίας και ανέπτυξαν μια μεθοδολογία για τον συνδυασμό των παραμέτρων που επηρεάζουν την κατηγοριοποίηση τους όσον αφορά την επάρκεια του φ. φωτισμού

Η συγκεκριμένη εργασία εντάσσεται στο πλαίσιο της αναθεώρησης της εθνικής μεθοδολογίας για την ενεργειακή αποδοτικότητα των κτιρίων και έχει σαν σκοπό να εξετασθεί η επίπτωση στο ενεργειακό ισοζύγιο ένος τυπικού χώρου γραφείου της υιοθέτησης των νέων προδιαγραφών για τον φυσικό φωτισμό. Εξετάσθηκαν και οι δύο προσεγγίσεις (στατική με χρήση ΠΦΦ και δυναμική με χρήση ωριαίων τιμών φ.φωτισμού) σε συνδυασμό με την ύπαρξη εξωτερικών εμποδίων.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκε ένας τυπικός χώρος γραφείου με διαστάσεις 3.4 x 5.4 x 2.7 m. Για τον εξεταζόμενο χώρο ελέγχθηκαν οκτώ (8) διαφορετικοί λόγοι ανοίγματος προς δάπεδο (WFR), από 10 έως 45% σε δύο προσανατολισμούς, Νότο και Βορρά. Σε όλες τις διαμορφώσεις υπάρχουν εξωτερικά εμπόδια (Περίπτωση #1 όταν η γωνία εμποδίου είναι 19^0 και #3 όταν η γωνία αυτή γίνει 35^0) ενω στο νότο έχει εξετασθεί και η περίπτωση υιοθέτησης πρόβολου (Περίπτωση #3). Στην εικόνα 1 παρουσιάζεται η γεωμετρία των εξωτερικών εμποδίων.



Εικόνα 1: Γεωμετρική αναπαράσταση εξωτερικών εμποδίων που χρησιμοποιήθηκαν.

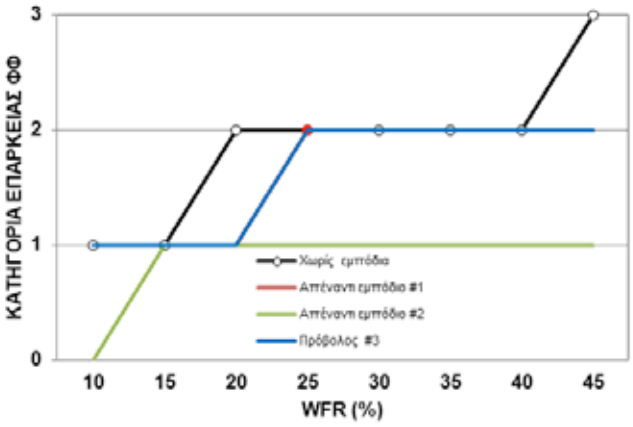
Όλες οι επιφάνειες του χώρου θεωρούνται αδιαβατικές εκτός της εξωτερικής πρόσψης της οποίας ο συντελεστής θερμοπερατότητας είναι συμβατός με την ΤΟΤΕΕ 20701-1 [14]. Ο διπλός υαλοπίνακας που χρησιμοποιήθηκε έχει σχετικά αυξημένη διαπερατότητα Tvis=0.73, συντελεστή ηλιακών κερδών g=0.68 και συντελεστή θερμοπαρατότητας 1.9 W/(m^2K). Για το σύστημα φωτισμού υιοθετήθηκε η βασική τιμή των 16W/m^2 για την εγκατεστημένη ισχύ, ενω υπάρχουν επίσης 15W/m^2 εσωτερικά κέρδη. Ο τεχνητός φωτισμός ελέγχεται απο ενα σύστημα ρύθμισης της φωτεινής ροής το οποίο είναι ικανό να μειώνει την εκπομπή φωτεινής ροής απο τα φωτιστικά στο 5% της αρχικής εκπομπής ενω τότε η καταναλισκώμενη ισχύς είναι το 15% της αρχικής. Οι υπόλοιπες παράμετροι που συνδέονται με την λειτουργία του χώρου είναι αυτές που προβλέπονται απο την προαναφερθείσα ΤΟΤΕΕ (επιθυμητή θερμοκρασία χειμώνα 20^0 , θέρους 26^0), Σαν ωράριο λειτουργίας θεωρείται το διάστημα 8:00-18:00 καθημερινώς εκτός Σαββάτου-Κυριακής..

Για τον υπολογισμό της κατηγορίας φυσικού φωτισμού χρησιμοποιήθηκαν ωριαίες τιμές φωτισμού σε κάνναβο 96 σημείων. Ο υπολογισμός πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό DAYSIM [15] με τις εξής

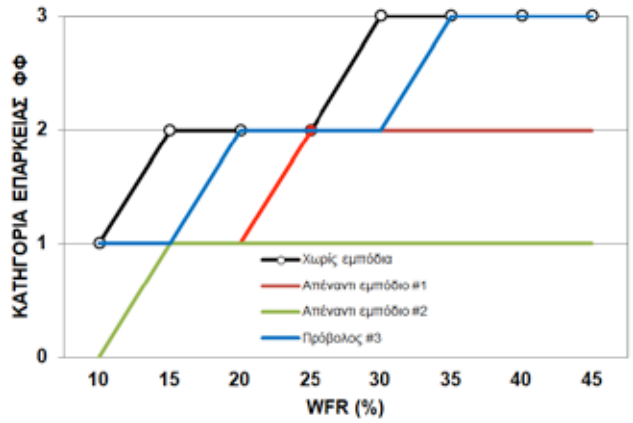
κύριες παραμέτρους : -ab 5 –ad 1500 –ar 300 χρησιμοποιώντας το κλιματικό αρχείο για την Αθήνα απο τον ιστότοπο του EnergyPlus [16]. Οι παράμετροι ab,ad εκφράζουν τον αριθμό των ανακλάσεων και τον αριθμό των εκπεμπόμενων ακτίνων μετά απο κάθε ανάκλαση. Η παράμετρος ar καθορίζει την μέγιστη πυκνότητα των σημείων που πραγματοποιούνται οι υπολογισμοί φωτισμού ώστε για τα ενδιάμεσα σημεία αυτών, να μπορεί να χρησιμοποιηθεί γραμμική παρεμβολή. Οι ιδιότητες του υαλοπίνακα υπολογίσθηκαν με το λογισμικό LBNL Window 7.7 [17] , οι οποίες και χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο του χώρου στο λογισμικό ENERGYPLUS [18] για τον υπολογισμό του ενεργειακού του ισοζύγιου.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

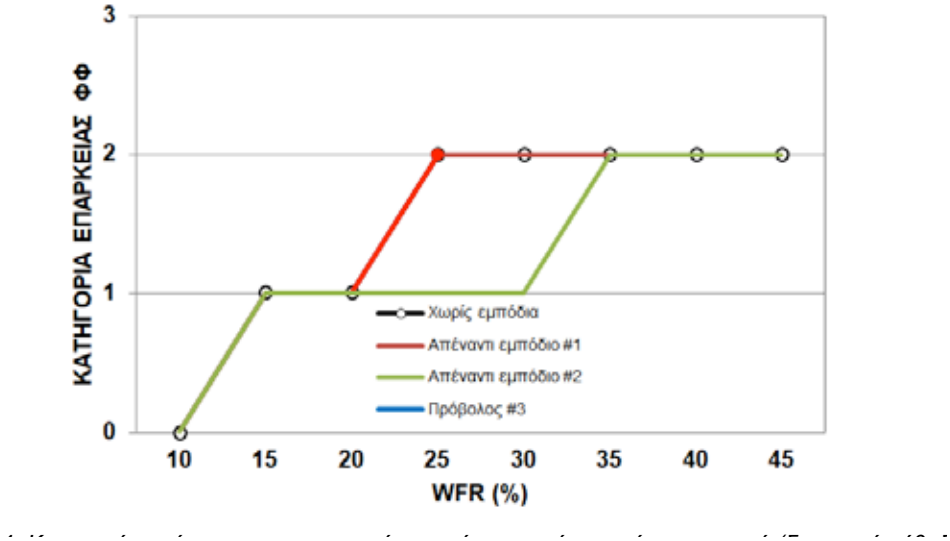
Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται η κατηγοριοποίηση (Κατ. 1, 2 και 3) της επάρκειας του φ. φωτισμού για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις: α) με χρήση των ΠΦΦ (στατική μέθοδος, Εικ. 2), β) για νότιο προσανατολισμό με δυναμικό υπολογισμό (Εικ. 3), και γ) για βόρειο προσανατολισμό με δυναμικό υπολογισμό (Εικ. 4).



Εικόνα 2: Κατηγορία επάρκειας φ. φωτισμού με χρήση ΠΦΦ (στατική μέθοδος).



Εικόνα 3: Κατηγορία επάρκειας φ. φωτισμού με χρήση ωριαίων τιμών φωτισμού (δυναμική μέθοδος) Νότιος προσανατολισμός.

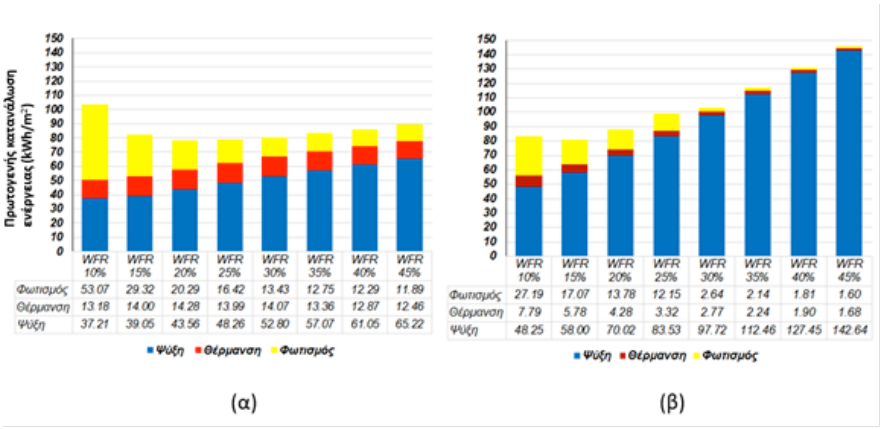


Εικόνα 4: Κατηγορία επάρκειας φ. φωτισμού με χρήση ωριαίων τιμών φωτισμού (δυναμική μέθοδος) Βόρειος προσανατολισμός.

Όπως φαίνεται απο τα παραπάνω διαγράμματα, η κατηγοριοποίηση διαφέρει ανάλογα με το αν χρησμοποιηθεί στατική (ΠΦΦ) ή δυναμική μέθοδος υπολογισμού. Χωρίς κάποιο εξωτερικό εμπόδιο και για νότιο προσανατολισμό η δυναμική μέθοδος οδηγεί εύκολα στην υψηλή κατηγορία (Κατ. 3) για λόγους WFR > =30%. Στην περίπτωση που χρησιμοποιηθεί η στατική μέθοδος, η υψηλή κατηγορία επιτυγχάνεται μόνο όταν WFR=45%. Σε πρακτικό επίπεδο αν η σχεδιαστική ομάδα έχει σαν στόχο την υψηλότερη κατηγορία επάρκειας φ. φωτισμού και χρησιμοποιήσει την στατική μέθοδο θα καταλήξει σε αυξημένο ποσοτό υαλοπίνακα επι της πρόσοψης (στην περίπτωση που εξετάζεται 90%). Είναι προφανές, θα παρουσιασθεί και στη συνέχεια, ότι η αύξηση του λόγου WFR αυξάνει και την κατανάλωση για ψύξη. Παρόμοια συμπεριφορά ισχύει και στην περίπτωση που υιοθετηθεί πρόβολος. Εάν ο προσανατολισμός του χώρου είναι βόρειος η υψηλότερη κατηγορία (Κατ. 3) δεν επιτυγχάνεται.

Η ύπαρξη εμποδίων αμβλύνει τις διαφορές των μεθόδων. Στην περίπτωση του ψηλότερου εξωτερικού εμποδίου η κατηγορία που επιτυγχάνεται είναι η χαμηλότερη (Κατ. 1) για όλες τις περιπτώσεις WFR τόσο για την δυναμική μέθοδο (νότιος προσανατολισμός) όσο και για την στατική μέθοδο. Όταν όμως ο προσαντολισμός γίνει βόρειος η δυναμική μέθοδος επιτυγχάνει την επόμενη κατηγορία (Κατ.2) λόγω της ανάκλασης του ηλιακού φωτισμού στο εμπόδιο. Ετσι σε πυκνο αστικό περιβάλλον οι δύο μέθοδοι δεν έχουν μεγάλες διαφορές και συνήθως οδηγούν στην ίδια κατηγορία εκτός των περιπτώσεων που η ανάκλαση απο τα εξωτερικά εμπόδια αυξάνει τα επιπεδα φωτισμού στο εσωτερικό σημαντικά.

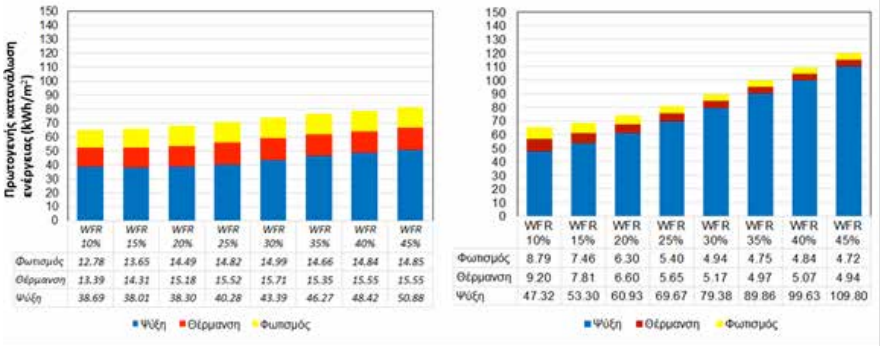
Τα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζουν την πρωτογενή κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με τον λόγο WFR. Είναι προφανές ότι η επιδίωξη της ανώτερης κατηγορίας επάρκειας φυσικού φωτισμού οδηγεί σε αυξημένη κατανάλωση και θα πρέπει να χρησιμοποιείται με πολυ προσοχή. Προφανώς το ενεργειακό ισοζύγιο μπορεί να μεταβληθεί π.χ. με χρήση κινούμενων σκιάστρων όμως αυτό θα πρέπει να μπορεί να ληφθεί υπόψη και στην εθνική μεθοδολογία για την ενεργειακή αποδοτικότητα των κτιρίων. Αν χρησιμοποιηθεί η στατική μέθοδος κατηγοριοποίησης, η κατηγορία 2 επιτυγχάνεται για λόγους WFR από 20-40%. Αν χρησιμοποιηθεί η δυναμική μέθοδος για νότιο προσανατολισμό , η ίδια κατηγορία επιτυγχάνεται με WFR από 15-25% ενώ για βόρειο προσανατολισμό για > 25% Αυτοί οι λόγοι WFR όμως αντιστοιχούν σε διαφορετικές καταναλώσεις. Από την Εικόνα 5, φαίνεται ότι η ελάχιστη πρωτογενής κατανάλωση στην περίπτωση που δεν υπαρχει εξωτερικό εμπόδιο επιτυγχάνεται για WFR=20% όσον αφορά τον βόρειο προσανατολισμό ενώ μειώνεται σε WFR=15 % για τον νότιο προσανατολισμό. Έτσι η χρήση της στατικής μεθόδου κατηγοριοποίησης της επάρκειας φ.φωτισμού μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένη κατανάλωση σε σχέση με την δυναμική μέθοδο



Εικόνα 5: Πρωτογενής κατανάλωση α) Βόρειος προσανατολισμός χωρίς εμπόδια και β) Νότιος προσανατολισμός χωρίς εμπόδια.

Η αύξηση του λόγου WFR έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της κατανάλωσης για φωτισμό. Όμως αυτή η μείωση είναι σημαντική όταν ο λόγος WFR είναι σχετικά μικρός. Από μια τιμή και πάνω (>25%) η μείωση αυτή είναι πολυ μικρή λόγω «κορεσμού» του χώρου σε φ. φωτισμό. Δηλ. το σύστημα ρύθμισης απενεργοποιεί τον τεχνητό φωτισμό όταν τα επίπεδα φ.φ. > 500 lx , γεγονός που απο κάποιο μέγεθος ανοίγματος και πάνω συμβαίνει ούτως ή άλλως.

Σε αστικό περιβάλλον, τα γειτονικά κτίρια επηρεάζουν την φωτεινή ροή που εισέρχεται στο χώρο. Αν εξετασθεί η περίπτωση #2 (δηλ. το απέναντι κτίριο απέχει 8μ απο τον εξεταζόμενο χώρο και ύψος έναν επιπλέον όροφο) φαίνεται οτι με τη χρήση της στατικής μεθόδου επιτυγχάνεται η κατηγορία επάρκειας 1 για όλους τους λόγους WFR. Το ίδιο συμβαίνει και με την χρήση της δυναμικής μεθόδου και νότιο προσανατολισμό. Όπως έχει ήδη αναφερθεί ο βορειος προσανατολισμός διαφέρει, λόγω της ανάκλασης της ηλ. ακτινοβολίας στο απέναντι κτίριο και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται και η κατηγορία 2 για WFR>=35%. Όπως φαίνεται και απο την Εικόνα 6 ή μεταβολή της πρωτογενούς κατανάλωσης για βόρειο προσανατολισμό με τον λόγο WFR είναι σχετικά μικρή.



Εικόνα 6: Πρωτογενής κατανάλωση α) Βόρειος προσανατολισμός χωρίς εμπόδια και β) Νότιος προσανατολισμός με το ψηλότερο εξωτερικό εμπόδιο #2.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η συγκεκριμένη εργασία συγκρίνει δύο μεθόδους κατηγοριοποίησης της επάρκειας φ. φωτισμού όπως αυτές περιγράφονται στο πρότυπο EN 17037. Τα συμπεράσματα είναι τα εξής:

1) Η στατική μεθοδολογία με χρήση των ΠΦΦ είναι σχετικά εύκολη και μπορεί να ενσωματωθεί εύκολα στην καθημερινη πρακτική. Η δυναμική μέθοδος απαιτεί αξιόπιστα κλιματικά αρχεία και φυσικά την χρήση του κατάλληλου λογισμικού το οποίο με την σειρά του εξαρτάται απο την εμπειρία των χρηστών.

2) Το πρότυπο EN 17037 ωθεί τις σχεδιαστικές ομάδες στην επίτευξη καλύτερης κατηγορίας επάρκειας φ. φωτισμού. Φυσικά αυτό συνοδεύεται και απο αύξηση της κατανάλωσης και αυτό θα πρέπει να τονίζεται.

3) Στην μέση κατηγορία (Κατ. 2) χωρίς εμπόδια η δυναμική μέθοδος προσφέρει καλύτερα αποτελέσματα γιατι μπορεί να επιτευχθεί με μικρότερο μέγεθος ανοιγμάτων και συνεπώς να είναι μικρότερη και η κατανάλωση ενέργειας.

4) Σε αστικό περιβάλλον τόσο η στατική όσο και η δυναμική έχουν παρόμοια αποτελέσματα εκτός των περιπτώσεων στις οποίες τα επίπεδα φωτισμού στο εσωτερικό του χώρου επηρεάζονται σε σημαντικό βαθμό απο την ανάκλαση της ηλ. ακτινοβολίας σε απέναντι του ανοίγματος εμπόδια. Αυτό συμβαίνει για WFR >= 35%.

5) Μπορεί να επιτευχθεί η ανώτερη κατηγορία επάρκειας φ. φωτισμού με ταυτόχρονα μειωμένη κατανάλωση ενέργειας; Σε περπτώσεις σαν τον χώρο που εξετάσθηκε, ενα δυναμικό σύστημα σκίασης μπορεί να συμβάλλει σε αυτή την κατεύθυνση. Εδώ όμως χρειάζεται και αλλαγή της εθνικής μεθοδολογίας ώστε να μπορεί να εκτιμηθεί αυτή η δυναμική σκίαση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Moon, P. and Spencer, D. E. , 1942, “Illumination from a Non-uniform Sky”, Illuminating Engineering Society, 37, pp.707-726.

[2] BS 8206-2:2008 “Lighting for buildings – Part 2: Code of practice for daylighting”.

[3] Mardaljevic, J., Heschong, L. and Lee, E. ,2009. “Daylight Metrics and Energy Savings”, Lighting Research and Technology, 41(3), pp.261-283.

[4] EN 15193-1:2017, “Energy performance of buildings. Energy requirements for lighting. Specifications, Module M9”.

[5] EN 17037:2018, “Daylight in buildings”.

[6] BREEAM UK New Construction Technical Manual Offices , 2014,, SD 5076: 0.1 DRAFT.

[7] J. Mardaljevic, 2015, “Climate-Based Daylight Modelling and its Discontents”, Vol. 16, CIBSE Technical Symposium, London, UK, p. 17.

[8] Association Suisse des Electriciens, 1989, “Éclairage intérieur par la lumière du jour”, Association Suisse Des Electriciens, Swiss Norm SN 418911.

[9] Illuminating Engineering Society, 2012, “Approved method: IES Spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE)”, IES LM-83-12, Illuminating Engineering Society of North America, NY, USA.

[10] A.Tsangrassoulis, A. Kontadakis, A. Roetzel, 2015, “Comparing climate based daylight modelling with daylight factor assessment – implications for architects”, Living and Learning - Research for a Better Built Environment: 49th International Conference of the Architectural Science Association, Melbourne.

[11] B. Paule & F. Flourentzou ,2019, “Perspective on daylight provision according to the new European standard “Daylight in Buildings” (EN 17037)», J. Phys.: Conf. Ser. 1343 012165.

[12] Bernard Paule, 2019, “Impact of the new European standard on building design” VELUX Daylight Symposium, Paris.

[13] Nataša Šprah and Mitja Košir , 2020, “Daylight Provision Requirements According to EN 17037 as a Restriction for Sustainable Urban Planning of Residential Developments”, Sustainability, 12, 315; doi:10.3390/su12010315.

[14] ΤΟΤΕΕ 20701-1/2017, «Αναλυτικές εθνικές προδιαγραφές παραμέτρων για τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων και την έκδοση πιστοποιητικού ενεργειακής απόδοσης».

[15] DaySim, 2013. Reinhart CF, Daysim version 3.1: Cambridge, MA, USA.

[16] https://www.energyplus.net/weather-location/europe_wmo_region_6/GRC//GRC_Athens.167160_IWEC

[17] https://windows.lbl.gov/tools/window/software-download

[18] https://energyplus.net/

ΑΝΑΛΥΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΙΧΟΥ TROMBE ΜΕ ΘΕΡΜΟΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ

Αικατερίνη Μπαξεβάνου, Δημήτριος Φείδαρος, Αριστείδης Τσαγκρασούλης

Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, ΠΘ, 38333 Βόλος
e-mail: cbaxev@gmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα παθητικά ηλιακά συστήματα, όπως είναι ο τοίχος Trombe, είναι οικονομικά αποδοτικοί τρόποι για να μειωθεί η ενεργειακή κατανάλωση των κτιρίων για θέρμανση, ψύξη και αερισμό. Η προσομοίωση της λειτουργίας αυτών των συστημάτων μπορεί να γίνει είτε μοντέλα προσομοίωσης ενεργειακής συμπεριφοράς κτηρίων (Building Energy Simulation – BES) όπως είναι το TRNSYS, το EnergyPlus κ.α. είτε με Υπολογιστική Ρευστομηχανική (Computational Fluid Dynamics – CFD). Και στις δύο περιπτώσεις απαιτείται η αγορά εξειδικευμένου λογισμικού. Παράλληλα αναλυτικά υπολογιστικά εργαλεία αναπτύσσονται, τα οποία επίσης απαιτούν κάποιο προγραμματισμό για την επίλυση του συστήματος των εξισώσεων, στα οποία καταλήγουν, αλλά με λιγότερες απαιτήσεις σε λογισμικό. Η πλειοψηφία αυτών των αναλυτικών μοντέλων αφορά ενεργειακά ισοζύγια σε μόνιμες καταστάσεις με αποτέλεσμα να μη λαμβάνεται υπόψη η θερμοαποθήκευση, η οποία στην περίπτωση του τοίχου Trombe έχει σημαντική επίδραση στην ανάπτυξη των φαινομένων μεταφοράς.

Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε ένα αναλυτικό μοντέλο ισοζυγίου ενέργειας για την προσομοίωση της λειτουργίας ενός τοίχου Trombe σε μεταβατική κατάσταση λαμβάνοντας υπόψη τη θερμοαποθήκευση στον τοίχο.

Χρησιμοποιώντας αυτό το μοντέλο προσομοιώθηκε η λειτουργία ενός τοίχου Trombe για 7 τυπικές ημέρες του έτους. Τα αποτελέσματα δίνονται με τη μορφή της ημερήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας με την οποία εισέρχεται ο αέρας στο χώρο στον οποίο είναι τοποθετημένο το παθητικό σύστημα, της θερμοκρασία της εσωτερικής πλευράς του τοίχου αποθήκευσης και της παροχή του αέρα στο διάκενο. Τα αποτελέσματα αυτά συγκρίνονται με τα αποτελέσματα που θα έδινε σύστημα χωρίς θερμοαποθήκευση. Τα δύο συστήματα αξιολογούνται με βάση την ετήσια απόδοση όπως αυτή υπολογίζεται από μοντέλο ημισταθερής κατάστασης.

Το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της λειτουργίας ενός τοίχου Trombe καθώς και για την τροφοδοσία ρητών μοντέλων ημισταθερής κατάστασης με τιμές για την παροχή αέρα στο διάκενο αέρα για περιπτώσεις τοίχων Trombe χωρίς μηχανικό αερισμό.

Η θερμοαποθήκευση προσφέρει δυνατότητα καλύτερης αξιοποίησης των θερμικών κερδών του τοίχου Trombe κατά 35% σε ετήσιο μέσο όρο

Λέξεις Κλειδιά: τοίχος Trombe, θερμοαποθήκευση, αναλυτικό μοντέλο, ισοζύγιο ενέργειας

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα παθητικά ηλιακά συστήματα, όπως είναι ο τοίχος Trombe, είναι οικονομικά αποδοτικοί τρόποι για να μειωθεί η κατανάλωση των κτιρίων για θέρμανση, ψύξη και αερισμό. Η προσομοίωση της λειτουργίας αυτών των συστημάτων μπορεί να γίνει είτε με λογισμικό προσομοίωσης ενεργειακής απόδοσης κτηρίων (μοντέλα BES) [1, 2] είτε με Υπολογιστική Ρευστομηχανική (Computational Fluid Dynamics – CFD) [3, 4]. Και στις δύο περιπτώσεις απαιτείται η αγορά εξειδικευμένου λογισμικού. Άλλα μοντέλα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν πιο εύκολα από Μηχανικούς είναι τα μοντέλα ημι-σταθερής κατάστασης [5, 6] τα οποία όμως αφορούν μόνο λειτουργία με μηχανικό αερισμό. Τέλος αναπτύσσονται αναλυτικά υπολογιστικά εργαλεία, τα οποία επίσης απαιτούν κάποιο προγραμματισμό για την επίλυση του συστήματος των εξισώσεων στα οποία καταλήγουν αλλά με λιγότερες απαιτήσεις σε λογισμικό. Ωστόσο η πλειοψηφία αυτών των αναλυτικών μοντέλων αφορά μόνιμες καταστάσεις με αποτέλεσμα να μη λαμβάνεται υπόψη η θερμοαποθήκευση, η οποία στην περίπτωση του τοίχου Trombe έχει σημαντική επίδραση στην ανάπτυξη των φαινομένων μεταφοράς.

Οι ηλιακοί τοίχοι, γνωστοί και ως τοίχοι Trombe-Michel, αποτελούν τμήμα του κελύφους του κτηρίου και είναι σχεδιασμένοι έτσι ώστε να απορροφούν ηλιακή ακτινοβολία και να αποθηκεύουν θερμότητα την οποία αποδίδουν αργότερα στο κτήριο μειώνοντας έτσι τις ενεργειακές του ανάγκες. Αν ένας ηλιακός τοίχος έχει σχεδιαστεί και εγκατασταθεί σωστά μπορεί να μειώσει τις ενεργειακές ανάγκες μέχρι και 30% [7].

Η προσπάθεια των ερευνητών να αναπτύξουν αναλυτικά μοντέλα ισοζυγίου ενέργειας για την περιγραφή της λειτουργίας παθητικών ηλιακών συστημάτων έχει μακρά ιστορία. Στο [8] αναπτύχθηκε ένα αναλυτικό μοντέλο για τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης ενός τοίχου Trombe με μηνιαίο βήμα βασισμένο σε ένα ισοδύναμο ηλεκτροθερμικό κύκλωμα κάνοντας μια σειρά από απλοποιητικές παραδοχές. Πάνω σε αυτή τη λογική, του ισοδύναμου κυκλώματος, αναπτύχθηκαν αρκετά αναλυτικά μοντέλα. Τα περισσότερα από αυτά αφορούν τη λειτουργία ηλιακής καμινάδας [9, 10] αγνοώντας έτσι τη θερμοαποθήκευση ενώ άλλα μοντέλα αναφέρονται στον τοίχο Trombe [11], αλλά και πάλι στην εκδοχή του χωρίς θερμική μάζα. Ωστόσο υπάρχουν αναλυτικά μοντέλα τα οποία λαμβάνουν υπόψη τη θερμοαποθήκευση για ηλιακούς συλλέκτες τα οποία θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν στην ανάπτυξη αντίστοιχων μοντέλων για τοίχο Trombe [12] .

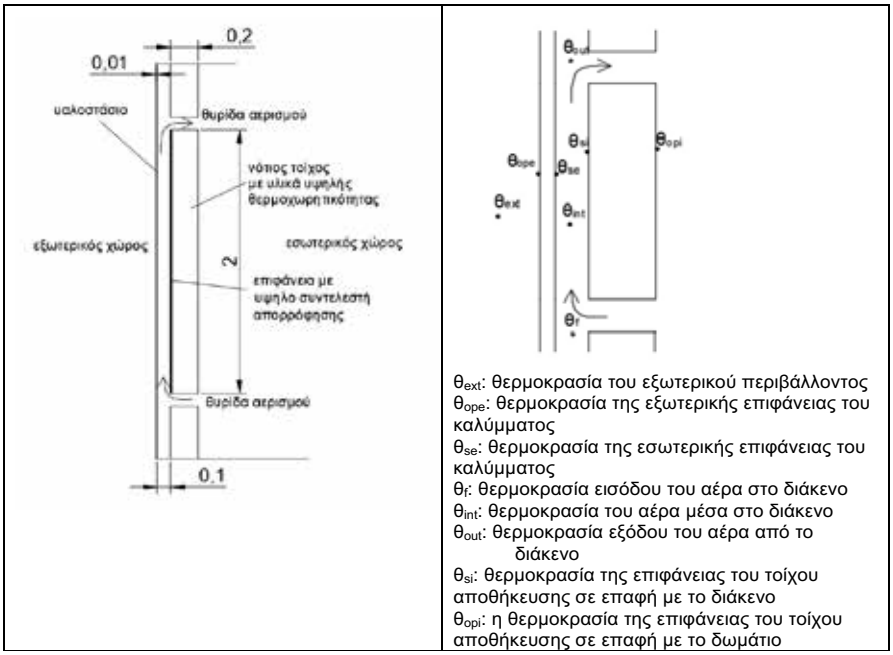
Όλα αυτά τα μοντέλα είναι πεπλεγμένα και απαιτούν επαναληπτική διαδικασία για την επίλυση του προτεινόμενου συστήματος εξισώσεων. Αλλά αντίθετα με τα μοντέλα ημισταθερής κατάστασης το χρησιμοποιούμενο σύστημα εξισώσεων είναι κλειστό και δεν χρειάζονται παραδοχές για τον υπολογισμό της παροχής του αέρα στο διάκενο, ακόμα και στην περίπτωση που δε χρησιμοποιείται μηχανικό αερισμός, εφόσον η παροχή υπολογίζεται αναλυτικά.

Ο στόχος της παρούσας εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός αναλυτικού μοντέλου για την προσομοίωση της λειτουργίας ενός τοίχου Trombe σε μεταβατική κατάσταση λαμβάνοντας υπόψη τη θερμοαποθήκευση στον τοίχο. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της λειτουργίας ενός τοίχου Trombe για 7 τυπικές ημέρες του έτους και τα αποτελέσματα συγκρίνονται με αυτά ενός μοντέλου το οποίο δε λαμβάνει υπόψη τη θερμοαποθήκευση [11]. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται με τη μορφή ημερήσιας μεταβολής θερμοκρασίας εξόδου του αέρα από το διάκενο, της θερμοκρασίας της επιφάνειας του τοίχου που είναι σε επαφή με το εξυπηρετούμενο δωμάτιο και της παροχής αέρα στο διάκενο αέρα ανάμεσα στο κάλυμμα και τον τοίχο απορρόφησης.

Τέλος τα αποτελέσματα των δύο μοντέλων τροφοδοτούν ρητά μοντέλα ημισταθερής κατάστασης με πληροφορίες σχετικά με την παροχή αέρα στο διάκενο προκειμένου να αξιολογηθεί η λειτουργία τοίχων Trombe χωρίς μηχανικό αερισμό με και χωρίς αποθήκευση θερμότητας.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η βασική γεωμετρία, η αρχή λειτουργίας και η ονοματολογία που υιοθετήθηκε δίνονται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1. Βασική γεωμετρία και ονοματολογία θερμοκρασιών στον τοίχο Trombe

2.1 Εξισώσεις ισοζυγίου ενέργειας

Το μοντέλο ισοζυγίου ενέργειας για την περιγραφή της λειτουργίας τοίχου Trombe λαμβάνοντας υπόψη τη θερμοαποθήκευση με ωριαίο βήμα συντάχθηκε τροποποιώντας το μοντέλο που είχαν αναπτύξει οι συγγραφείς [11] βάσει της εργασίας [12]. Οι βασικές εξισώσεις του μοντέλου είναι τρεις εξισώσεις ισοζυγίου [9, 13] οι οποίες αντιστοιχούν στη μετάδοση θερμότητας από την εσωτερική επιφάνεια του καλύμματος προς το διάκενο αέρα μεταξύ καλύμματος και τοίχου αποθήκευσης, τη μετάδοση θερμότητας μέσα στο διάκενο αέρα, και τη μετάδοση θερμότητας από τον αέρα προς τη εσωτερική επιφάνεια (επιφάνεια σε επαφή με το διάκενο) του τοίχου αποθήκευσης.

Η πρώτη εξίσωση ενεργειακού ισοζυγίου αφορά τον αέρα μέσα στο διάκενο

$$\dot{m} \cdot C_{p,air} \cdot (\theta_{out} - \theta_f) = A_{int} \cdot h_{cv1} \cdot (\theta_{se} - \theta_{int}) + A_{int} \cdot h_{cv2} \cdot (\theta_{si} - \theta_{int}) \quad (1)$$

Όπου $\dot{m}$ [kg/s] η παροχή μάζας μέσα στο διάκενο, $C_{p,air}$ [j/kgK] η ειδική θερμοχωρητικότητα του αέρα, θ_{out} [K] η θερμοκρασία με την οποία ο αέρας εγκαταλείπει το διάκενο και εισέρχεται στο χώρο του εξυπηρετούμενου δωματίου μέσω των άνω ανοιγμάτων αερισμού, θ_f [K] η θερμοκρασία με την οποία ο αέρας εισέρχεται στο διάκενο, θ_{int} [K] η θερμοκρασία του αέρα μέσα στο διάκενο, A_{int} [m^2] η επιφάνεια του τοίχου Trombe (ίση με το τμήμα του τοίχου που συμμετέχει στη λειτουργία του), h_{cv1} [W/m^2K] ο συντελεστής συναγωγής ανάμεσα στην εσωτερική επιφάνεια του καλύμματος και τον αέρα στο διάκενο, h_{cv2} [W/m^2K] ο συντελεστής συναγωγής ανάμεσα στην εσωτερική επιφάνεια του τοίχου και τον αέρα στο διάκενο, θ_{se} [K] η θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας του καλύμματος και θ_{si} [K] η θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας του τοίχου.

Η δεύτερη εξίσωση ενεργειακού ισοζυγίου αφορά την εσωτερική επιφάνεια του καλύμματος

$$\frac{\theta_{ope} - \theta_{se}}{Re^*} + N_i^* \cdot a_{est} \cdot I_t = \frac{\theta_{se} - \theta_{int}}{R_{cv1}} + \frac{\theta_{se} - \theta_{si}}{R_{rd}} \quad (2)$$

Όπου, θ_{ope} [K] είναι η θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας του καλύμματος, R_e^* [m^2K/W] είναι η θερμική αντίσταση του καλύμματος, Ni* [-] είναι ο συντελεστής διάχυτης ακτινοβολίας, a_{est} [-] η απορρόφηση του καλύμματος, I_t [W/m^2] η συνολική προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία

στην επιφάνεια του καλύμματος, R_{cv1} [m^2K/W] η αντίσταση συναγωγής μεταξύ της εσωτερικής επιφάνειας του καλύμματος και του αέρα στο διάκενο και R_{rd} είναι η αντίσταση μετάδοσης θερμότητας με ακτινοβολία ανάμεσα στις δύο επιφάνειες που περιβάλλουν το διάκενο αέρα.

Η τρίτη εξίσωση ενεργειακού ισοζυγίου αφορά την επιφάνεια του τοίχου αποθήκευσης που είναι σε επαφή με το διάκενο αέρα (εσωτερική επιφάνεια του τοίχου). Σε αυτή θα ληφθεί υπόψη και η θερμοαποθήκευση του τοίχου Trombe.

$$\frac{\theta_{int}-\theta_{si}}{R_{cv2}}+\frac{\theta_{se}-\theta_{si}}{R_{rd}}+S=\frac{\theta_{si}-\theta_{opi}}{R_i^*}+M_W C_{p,w}\frac{\partial T_w}{\partial t} \qquad (3)$$

Όπου S [W/m^2] είναι η ηλιακή ακτινοβολία η οποία απορροφάται από την επιφάνεια απορρόφησης του τοίχου Trombe, R_{cv2} [m^2/WK] είναι η αντίσταση συναγωγής ανάμεσα στην εσωτερική επιφάνεια του τοίχου και τον αέρα στο διάκενο, θ_{opi} [K] είναι η θερμοκρασία της επιφάνειας του τοίχου αποθήκευσης που είναι σε επαφή με το εξυπηρετούμενο δωμάτιο, R_i^* [m^2/WK] είναι η θερμική αντίσταση του τοίχου αποθήκευσης, M_W η μάζα του τοίχου Trombe ανηγμένη στην επιφάνεια του τοίχου [kg/m2], $C_{p,w}$ [J/kgK]η ειδική θερμοχωρητικότητα του τοίχου Trombe και T_w [K] η μέση θερμοκρασία του τοίχου Trombe,

2.2 Δευτερεύουσες σχέσεις

Η παροχή αέρα μέσα στο διάκενο υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση [10]

$$\dot{m}=C_d\cdot\frac{\rho\cdot A_{cs}}{\sqrt{1+A_r}}\sqrt{\frac{2\cdot g\cdot L\cdot(\theta_{int}-\theta_f)}{\theta_f}} \qquad (4)$$

Όπου, C_d είναι ο συντελεστής παροχής ανοίγματος ο οποίος λαμβάνεται ίσος με 0.6, ρ [kg/m^3] είναι η πυκνότητα του αέρα, A_{cs} [m^2] το εμβαδό της διατομής του διάκενου αέρα, A_r [-] είναι το κλάσμα διατομής εισόδου/διατομής εξόδου του διάκενου, g [m/s^2] η επιτάχυνση της βαρύτητας και L η απόσταση ανάμεσα στα κάτω και άνω ανοίγματα αερισμού.

Ο συντελεστής συναγωγής μεταξύ της εσωτερικής επιφάνειας του καλύμματος και του αέρα στο διάκενο δίνεται από τη σχέση

$$h_{cv1}=\frac{Nu_1 k_{air}}{L} \qquad (5)$$

Όπου, Nu_1 ο αριθμός Nusselt και k_{air} [W/mK] η θερμική αγωγιμότητα του αέρα. Ο αριθμός Nu δίνεται από την ακόλουθα σχέση

$$Nu_1=\left\{0.825+\frac{0.387xRa_{L1}^{1/6}}{[1+(0.492/Pr)^{9/16}]^{8/27}}\right\}^2 \qquad (6)$$

Όπου, Ra_{L1} ο αριθμός Rayleigh και Pr ο αριθμός Prandtl. Ο αριθμός Ra_L υπολογίζεται από τη σχέση

$$Ra_{L1}=\frac{g\beta|\theta_{se}-\theta_{int}|L^3}{v_{air}^2}\Pr \qquad (7)$$

Όπου, β είναι ο συντελεστής θερμικής διαστολής του αέρα και v_{air} το κινηματικό ιξώδες. Ο συντελεστής θερμικής διαστολής δίνεται από τη σχέση

$$\beta=\frac{1}{\theta_{int}} \qquad (8)$$

Ο συντελεστής συναγωγής ανάμεσα στην εσωτερική επιφάνεια του τοίχου απορρόφησης και τον αέρα στο διάκενο h_{cv2} γίνεται χρησιμοποιώντας τις σχέσεις 5 έως 7 αντικαθιστώντας τη διαφορά θερμοκρασίας με το $\theta_{si}-\theta_{int}$. Οι αντιστάσεις συναγωγής R_{cv1} και R_{cv2} υπολογίζονται ως

$$R_{cvi}=\frac{1}{h_{cvi}} \qquad (9)$$

Ο συντελεστής αντίστασης μετάδοσης θερμότητας με ακτινοβολία ανάμεσα στις δύο επιφάνειες του διάκενου δίνονται από τη σχέση

$$R_{rd}=\frac{\sigma\cdot(\theta_{se}^2+\theta_{si}^2)\cdot(\theta_{se}+\theta_{si})}{\frac{1}{\varepsilon_g}+\frac{1}{\varepsilon_w}-1} \qquad (10)$$

Όπου, $\sigma=5.67x10^{-8}$ [J/s] είναι η σταθερά Stefan-Boltzman, ε_g ο συντελεστής εκπομπής της εσωτερικής επιφάνειας του καλύμματος και ε_w ο συντελεστής εκπομπής της εσωτερικής

επιφάνειας του τοίχου. Προκειμένου να κλείσει το σύστημα των εξισώσεων άλλες δύο εξισώσεις ισοζυγίου ενέργειας χρησιμοποιούνται. Η μια αφορά το ισοζύγιο ενέργειας ανάμεσα στην επιφάνεια του τοίχου απορρόφησης που είναι σε επαφή με το εξυπηρετούμενο δωμάτιο και τον αέρα μέσα στο δωμάτιο.

$$\frac{\theta_{si}-\theta_{opi}}{R_i^*} = \frac{\theta_{opi}-\theta_i}{R_i} \qquad (11)$$

Όπου, θi η θερμοκρασία μέσα στο δωμάτιο. Και η δεύτερη αφορά το ισοζύγιο ενέργειας ανάμεσα στην εξωτερική επιφάνεια του καλύμματος και τον εξωτερικό αέρα.

$$(\mathrm{h_{rs}} + \mathrm{h_{wind}}) \cdot (\theta_{ext} - \theta_{\mathrm{ope}}) = \frac{\theta_{\mathrm{ope}}-\theta_{\mathrm{se}}}{\mathrm{Re^*}} \qquad (12)$$

Όπου h_{rs} [W/m^{2}K] είναι ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας με ακτινοβολία ανάμεσα στην εξωτερική επιφάνεια του καλύμματος και τον ουρανό, θ_{ext} [K] η θερμοκρασία του εξωτερικού περιβάλλοντος και h_{wind} [W/m^{2}K] ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή ανάμεσα στην εξωτερική επιφάνεια του καλύμματος και το περιβάλλον. Ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας με ακτινοβολία δίνεται από την ακόλουθη σχέση

$$\mathrm{h_{rs}} = \varepsilon_g \cdot \sigma \cdot (\theta_{\mathrm{ope}} + \theta_{\mathrm{sky}}) \cdot (\theta_{\mathrm{ope}}^2 + \theta_{\mathrm{sky}}^2) \cdot \frac{\theta_{\mathrm{ope}}-\theta_{\mathrm{sky}}}{\theta_{\mathrm{ope}}-\theta_{\mathrm{f}}} \qquad (13)$$

Όπου, θ_{sky} [K] η ισοδύναμη θερμοκρασία του ουρανού η οποία υπολογίζεται ως

$$\theta_{\mathrm{sky}} = 0.0552 \cdot \theta_{ext}^{1.5} \qquad (14)$$

2.3 Παραδοχές

Γίνεται η παραδοχή ότι η θερμοκρασία του αέρα μέσα στο διάκενο, θ_{int} [K] είναι η μέση τιμή της θερμοκρασίας στην είσοδο και της θερμοκρασίας στην έξοδο.

$$\theta_{int} = \frac{\theta_f+\theta_{out}}{2} \qquad (15)$$

Επίσης γίνονται οι ακόλουθες παραδοχές: α) η θερμοκρασία του δωματίου παραμένει σταθερή και ίση με τη θερμοκρασία σχεδιασμού με χρήση κατάλληλου συστήματος θέρμανσης, β) οι θερμοφυσικές ιδιότητες του αέρα θεωρούνται σταθερές, γ) Οι εσωτερικές επιφάνειες που περικλείουν το διάκενο θεωρούνται ισόθερμες, δ) η θερμική αντίσταση συναγωγής ανάμεσα στην επιφάνεια του τοίχου που είναι σε επαφή με το δωμάτιο και το εσωτερικό του δωματίου λαμβάνεται από το EN-ISO-6946 [14]. Τέλος γίνεται η παραδοχή ότι η μέση θερμοκρασία του τοίχου απορρόφησης υπολογίζεται ως μέσος όρος των θερμοκρασιών των δύο επιφανειών του τοίχου.

$$T_w = \frac{T_{si}+T_{opi}}{2} \qquad (16)$$

Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται ένα κλειστό σύστημα εξισώσεων.

2.4 Βοηθητικές σχέσεις

Κάποιες βοηθητικές σχέσεις χρησιμοποιούνται για υπολογισμό μεταβλητών οι οποίες όμως δεν είναι πεπλεγμένες με τις ανωτέρω εξισώσεις και είναι δυνατό να υπολογιστούν ξεχωριστά. Ο συντελεστής συναγωγής μεταξύ της εξωτερικής επιφάνειας του καλύμματος και του περιβάλλοντος υπολογίζεται από τη σχέση.

$$\mathrm{h_{wind}} = 5.7 + 3.8\mathrm{w} \qquad (17)$$

Όπου, w [m/s] η ταχύτητα του ανέμου

Η ηλιακή ακτινοβολία η οποία απορροφάται από την επιφάνεια συλλογής του τοίχου Trombe δίνεται από την ακόλουθη σχέση [15] για κατακόρυφο τοίχο με νότιο προσανατολισμό.

$$S = I_b R_b (\tau\alpha)_b + \frac{I_d(\tau\alpha)_d}{2} + \rho_g \frac{I(\tau\alpha)_g}{2} \qquad (18)$$

Όπου, I [W/m^2] η ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο, I_b [W/m^2] είναι η άμεση ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο, I_d [W/m^2] η διάχυτη ακτινοβολία. ρ_g [-] η ανάκλαση του εδάφους και R_b [-] ο λόγος της ακτινοβολίας σε κεκλιμένη επιφάνεια προς την ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο. Ο παράγοντας περατότητας-απορρόφησης $(\tau\alpha)_n$ για κάθετα προσπίπτουσα ακτινοβολία

υπολογίζεται με βάση τις οπτικές ιδιότητες του καλύμματος και του τοίχου και στη συνέχεια τροποποιείται ανάλογα με τη γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας.

$$(\tau\alpha)_n = \frac{\tau_n a_n}{1-(1-a_n)\rho_d} \qquad (19)$$

Όπου, τ_n είναι η περατότητα του καλύμματος για κάθετη ακτινοβολία, α_n η απορροφητικότητα του τοίχου συλλογής και ρ_d η ανάκλαση της εσωτερικής επιφάνειας του καλύμματος. Οι θερμικές αντιστάσεις του καλύμματος και του τοίχου υπολογίζονται βάσει του EN-ISO-6946.

Τέλος η μάζα αποθήκευσης του τοίχου Trombe, M_W ανοιγμένη στην επιφάνεια του τοίχου Trombe δίνεται από την ακόλουθη σχέση

$$M_W = \frac{m_W}{A_{sw}} \qquad (20)$$

2.5 Υλοποίηση μοντέλου

Προκειμένου να υλοποιηθεί το μοντέλο σε κάθε χρονικό βήμα χρησιμοποιούνται τιμές θερμοκρασίας από το προηγούμενο χρονικό βήμα. Έτσι για ωριαίο χρονικό βήμα η παράγωγος $\theta T_W/\theta t$, υπολογίζεται ως εξής

$$\frac{\partial T_W}{\partial t} = \frac{Tw - T_{w,old}}{3600} \qquad (21)$$

3. ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Εξετάστηκε η λειτουργία ενός τοίχου Trombe-Michel όπως αυτός που παρουσιάζεται στην εικόνα 1 για 7 χαρακτηριστικές μέρες του έτους (15η μέρα των μηνών Οκτωβρίου, Νοεμβρίου, Δεκεμβρίου, Ιανουαρίου, Φεβρουαρίου, Μαρτίου και Απριλίου) θεωρώντας ότι ο τοίχος Trombe εξυπηρετεί δωμάτιο το οποίο βρίσκεται σε γεωγραφική θέση με γεωγραφικό πλάτος 39.39° και γεωγραφικό μήκος 22.75°. Τα κλιματολογικά στοιχεία ελήφθησαν από την TOTEE20701-3/2010 [16]. Το κάλυμμα θεωρείται ότι είναι ένας διπλός 4-15-5 υαλοπίνακας low-e και η επιφάνεια συλλογής του τοίχου απορρόφησης είναι βαμμένη μαύρη. Οι ιδιότητες που έχουν ληφθεί υπόψη δίνονται στον ακόλουθο πίνακας 1. Η θερμοκρασία σχεδιασμού του δωματίου είναι 20 °C.

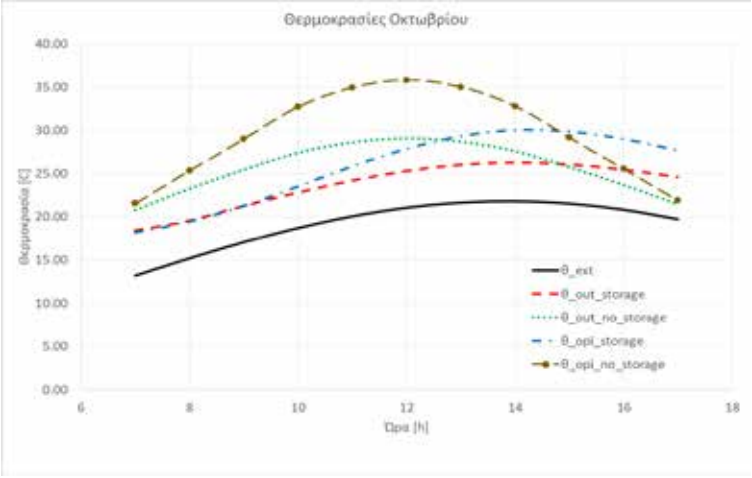
Πίνακας 1. Ιδιότητες υλικών

Ιδιότητα	Μονάδα	Τιμή
Ειδική θερμοχωρητικότητα του αέρα, $C_{p,air}$	J/KgK	1006
Θερμική αγωγιμότητα του αέρα, k_{air}	W/mK	0.0242
Πυκνότητα του αέρα, ρ	[kg/m^3]	1.225
Αριθμός Pr του αέρα	[-]	0.73
Κινηματικό ιξώδες του αέρα, ν_{air}	m^2/s	1.51E-05
Συντελεστής εκπομπής της εσωτερικής επιφάνειας του καλύμματος, ε_g	[-]	0.1
Πυκνότητα του τοίχου, ρ_w	kg/m^3	2000
Ειδική θερμοχωρητικότητα του τοίχου, $C_{p,w}$	J/kgK	1000
Συντελεστής εκπομπής της εσωτερικής επιφάνειας του τοίχου, ε_w	[-]	0.97
Συντελεστής θερμική αντίσταση συναγωγής της επιφάνειας του τοίχου που είναι σε επαφή με το δωμάτιο προς το εσωτερικό του δωματίου, R_i	m^2/WK	0.1
Κλάσμα διατομών εισόδου/εξόδου του διάκενου, A_r	[-]	1

Διατομή του διάκενου αέρα, A_{ch}	m^2	0.15
Εσωτερική επιφάνεια του καλύμματος, A_{cst}	m^2	5.46
Θερμική αντίσταση του καλύμματος, R_c*	m^2/kW	0.456
Θερμική αντίσταση του τοίχου, R_i*	m^2/kW	0.074
Απορρόφηση του καλύμματος, α_{cst}	[-]	0.05
Περατότητα του καλύμματος, τ_c	[-]	0.6
Ανακλαστικότητα της εσωτερικής επιφάνειας του καλύμματος, ρ_d	[-]	0.1
Απορρόφηση του τοίχου, α_w	[-]	0.97
Ανάκλαση του εδάφους, ρ_g	[-]	0.2

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο Σχήμα 2 δίνονται οι ημερήσιες μεταβολές της θερμοκρασίας με την οποία ο αέρας εγκαταλείπει το διάκενο και εισέρχεται στο εξυπηρετούμενο δωμάτιο, θ_{out}, και η θερμοκρασία που αναπτύσσει η επιφάνεια του τοίχου Trombe που είναι σε επαφή με το δωμάτιο, θ_{opi}, για υπολογισμούς τοίχου Trombe με μάζα αποθήκευσης και τοίχου Trombe χωρίς μάζα αποθήκευσης καθώς και η ημερήσια μεταβολή της εξωτερικής θερμοκρασίας, θ_{ext}, για την εξεταζόμενη τοποθεσία για το μήνα Οκτώβριο. Συγκεκριμένα η εξωτερική θερμοκρασία θ_{ext} δίνεται με μαύρη συνεχή γραμμή, η θερμοκρασία εξόδου του αέρα από το διάκενο για σύστημα με αποθήκευση θερμότητας $\theta_{out,storage}$ δίνεται με κόκκινη διακεκομμένη γραμμή, η θερμοκρασία εξόδου του αέρα από το διάκενο για σύστημα χωρίς αποθήκευση θερμότητας $\theta_{out,nostorage}$ δίνεται με πράσινη γραμμή με τελείες, η θερμοκρασία της επιφάνειας του τοίχου που είναι σε επαφή με το δωμάτιο για το σύστημα με αποθήκευση θερμότητας, $\theta_{opi,storage}$, δίνεται με μπλε γραμμή με παύλες και τελείες και τέλος η θερμοκρασία της επιφάνειας του τοίχου που είναι σε επαφή με το δωμάτιο για σύστημα χωρίς αποθήκευση θερμότητας, $\theta_{opi,nostorage}$, δίνεται με καφέ γραμμή με παύλες και συμπαγείς κύκλους του ίδιο χρώματος.

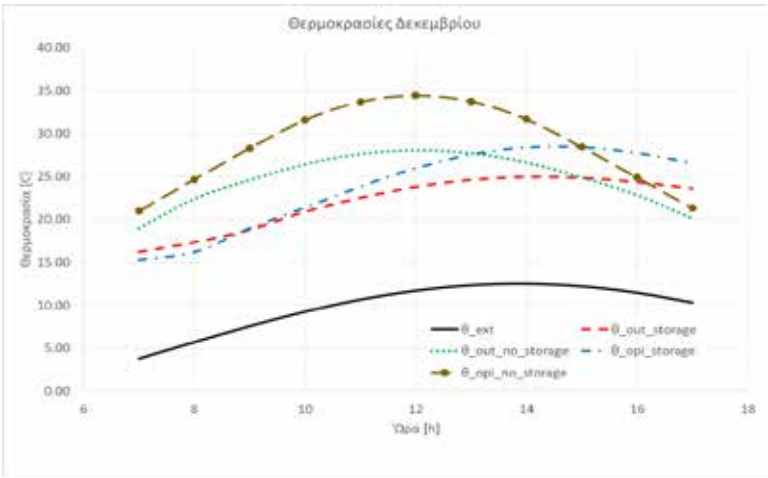


Σχήμα 2. Ημερήσια μεταβολή θερμοκρασιών τοίχου Trombe, Οκτώβριος

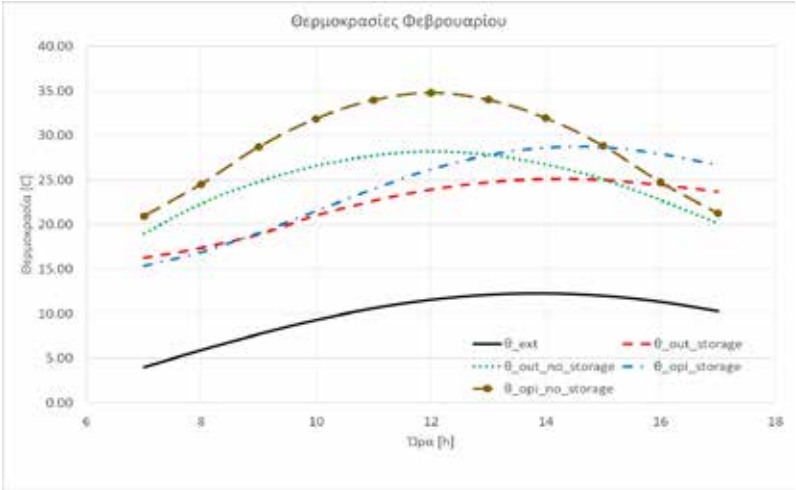
Η πρώτη παρατήρηση είναι ότι οι θερμοκρασίες του συστήματος χωρίς αποθήκευση θερμότητας είναι μεγαλύτερες από αυτές του συστήματος με αποθήκευση θερμότητας μέχρι τις πρώτες απογευματινές ώρες και ακολουθούν κυρίως τη μεταβολή της προσπίπτουσας ηλιακής

ακτινοβολίας. Αντιθέτως οι θερμοκρασίες του συστήματος με αποθήκευση θερμότητας παρουσιάζουν μια χρονική υστέρηση ως προς την προσπίπτουσα ακτινοβολία της τάξης των 2 ωρών ενώ τις 2 πρώτες πρωινές ώρες η θερμοκρασίες είναι μικρότερες από τη θερμοκρασία σχεδιασμού του δωματίου (20 ^{o}C), εφόσον θερμότητα από την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία χρησιμοποιείται για την αύξηση της θερμοκρασίας του τοίχου. Συνεπώς κατά τις ώρες αυτές είναι προτιμότερο τα ανοίγματα αερισμού να μένουν κλειστά. Ωστόσο στο τέλος της ημέρας τόσο η θερμοκρασία της επιφάνειας του τοίχου όσο και του αέρα που εξέρχεται από το διάκενο είναι υψηλότερες και ο τοίχος συνεχίζει να προσφέρει θερμότητα στο δωμάτιο κατά την εκφόρτισή του ακόμα και όταν δεν υπάρχει εξωτερική προσπίπτουσα ακτινοβολία.

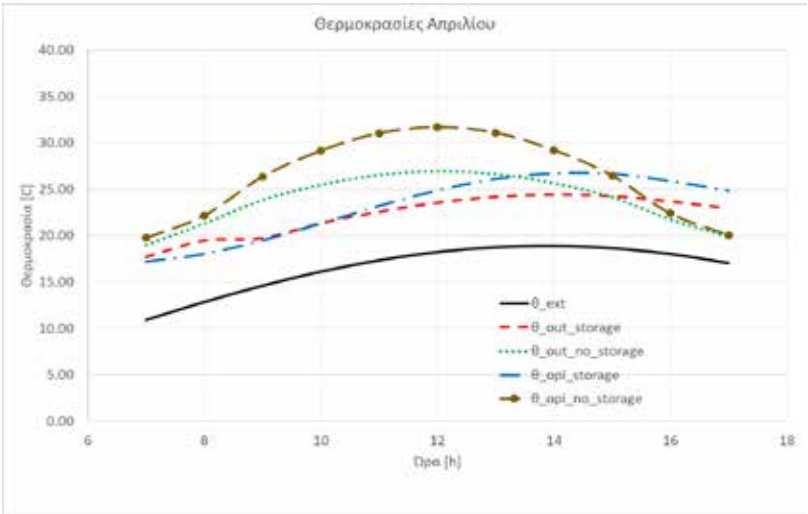
Στα Σχήματα 3, 4 και 5 δίνονται ενδεικτικά οι ίδιες ημερήσιες μεταβολές θερμοκρασίας για τους μήνες Δεκέμβριο, Φεβρουάριο και Απρίλιο χρησιμοποιώντας τους ίδιους συμβολισμούς. Τους υπόλοιπους θερινούς μήνες ο τοίχος Trombe μπορεί είτε να λειτουργήσει ως ηλιακή καμινάδα και το μοντέλο που αναπτύχθηκε να τροποποιηθεί ανάλογα κυρίως σε ότι αφορά τη θερμοκρασία εισόδου του αέρα στο διάκενο, είτε να καλυφθεί/σκιαστεί πλήρως ώστε να μην επιβαρύνει το εξυπηρετούμενο δωμάτιο με επιπλέον θερμικές προσόδους.



Σχήμα 3. Ημερήσια μεταβολή θερμοκρασιών τοίχου Trombe, Δεκέμβριος



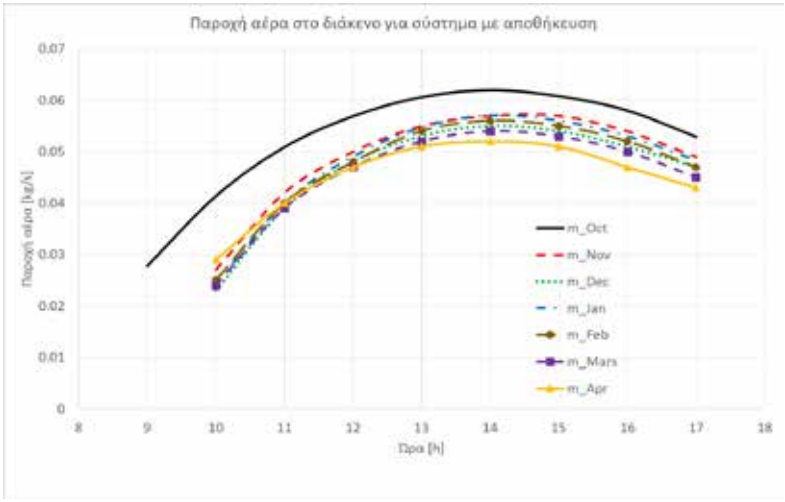
Σχήμα 4. Ημερήσια μεταβολή θερμοκρασιών τοίχου Trombe, Φεβρουάριος



Σχήμα 5. Ημερήσια μεταβολή θερμοκρασιών τοίχου Trombe, Απρίλιος

Στους μήνες αυτούς ο τοίχος Trombe για συστήματα με αποθήκευση θερμότητας αρχίζει να λειτουργεί θετικά μετά τις τρεις πρώτες πρωινές ώρες. Κατά τους μήνες Δεκέμβριο και Φεβρουάριο η χρονική υστέρηση γίνεται 3 ώρες. Το μήνα Απρίλιο η απόδοση του τοίχου Trombe μειώνεται λόγω της μείωσης της διαθέσιμης ηλιακής ακτινοβολίας στο νότιο κάθετο τοίχο και τη μείωση των αντιστοίχων γινομένων περατότητας απορρόφησης που εξαρτώνται από τη γωνία πρόσπτωσης παρά την υψηλότερη εξωτερική θερμοκρασία. Ο Δεκέμβριος με το Φεβρουάριο παρουσιάζουν σχεδόν την ίδια συμπεριφορά ενώ η καλύτερη απόδοση αντιστοιχεί στον Οκτώβριο.

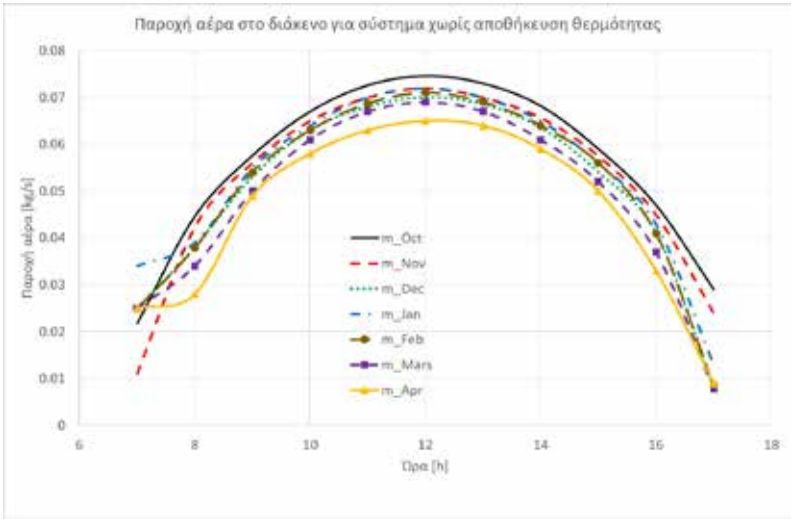
Στο Σχήμα 6 δίνεται η ημερήσια μεταβολή της παροχής μάζας διαμέσου του διακένου αέρα για τους εξεταζόμενους μήνες για σύστημα με αποθήκευση θερμότητας. Για κάθε μήνα η παροχή δίνεται μόνο για τις ώρες κατά τις οποίες ο τοίχος Trombe συνεισφέρει θετικά θεωρώντας ότι τις άλλες ώρες τα ανοίγματα αερισμού είναι κλειστά.



Σχήμα 6. Παροχή μάζας αέρα στο διάκενο για σύστημα με αποθήκευση θερμότητας

Η μέγιστη παροχή για όλες τις περιπτώσεις επιτυγχάνεται για το μήνα Οκτώβριο και η χαμηλότερη για το μήνα Απρίλιο. Οι υπόλοιποι χειμερινοί μήνες δε διαφέρουν σημαντικά. Η παροχή εξαρτάται από τη διαθέσιμη ακτινοβολία στο νότιο τοίχο και τη γωνία πρόπτωσης που καθορίζει και το γινόμενο περατότητας – απορρόφησης καθώς και από τη διαφορά εσωτερικής και εξωτερικής θερμοκρασίας. Ξεκινά από τιμές μεγαλύτερες από 0.02 kg/s ενώ τα μέγιστα είναι πάνω από 0.05 kg/s και διατηρείται πάνω από 0.04 kg/s στο τέλος της ηλιακής ημέρας. Επίσης τα μέγιστα εμφανίζονται με χρονική υστέρηση η οποία είναι εντονότερη τους χειμερινούς μήνες.

Στο Σχήμα 7 δίνεται η ημερήσια μεταβολή της παροχής μάζας για τους εξεταζόμενους μήνες για σύστημα χωρίς αποθήκευση θερμότητας.

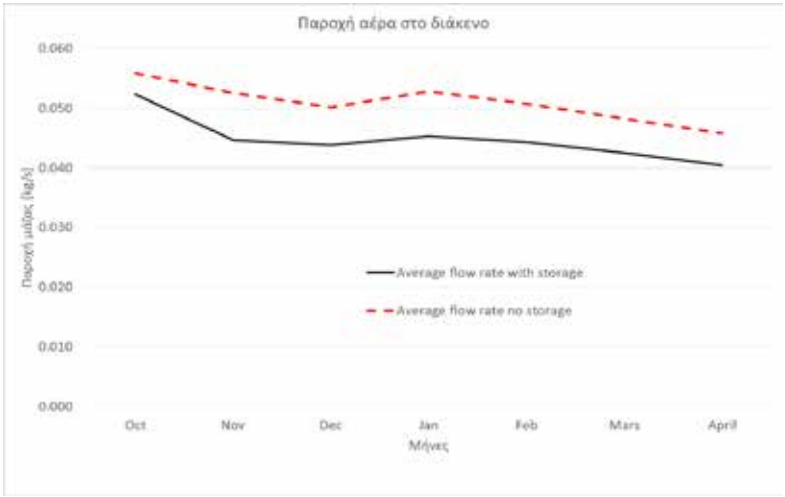


Σχήμα 7. Παροχή μάζας αέρα στο διάκενο για σύστημα χωρίς αποθήκευση θερμότητας

Οι μέγιστες τιμές της παροχής, οι οποίες ακολουθούν την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, είναι μεγαλύτερες από αυτές που εμφανίζει το σύστημα με αποθήκευση θερμότητας λόγω μεγαλύτερων θερμοκρασιακών διαφορών. Και εδώ η μεγαλύτερη παροχή αντιστοιχεί στον Οκτώβριο και η μικρότερη στον Απρίλιο χωρίς όμως εντυπωσιακές διαφοροποιήσεις.

Τέλος στο Σχήμα 8 δίνεται η ετήσια μεταβολή της μέσης ημερήσιας παροχής αέρα στο διάκενο για σύστημα με και χωρίς αποθήκευση. Η παροχή για σύστημα με αποθήκευση θερμότητας δίνεται με συνεχή μαύρη γραμμή ενώ η παροχή για σύστημα χωρίς αποθήκευση θερμότητας δίνεται με διακεκομμένη κόκκινη γραμμή.

Η τάση που παρουσιάζεται είναι η ίδια και στις δύο περιπτώσεις με μέγιστο τον Οκτώβριο και ελάχιστο τον Απρίλιο. Η παροχή του συστήματος με αποθήκευση θερμότητας είναι κατά μέσο όρο 10% μικρότερη από αυτή του συστήματος χωρίς αποθήκευση θερμότητας. Ωστόσο αν αυτές οι μέσες τιμές χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση των θερμικών ηλιακών προσόδων μέσω του τοίχου Trombe με ένα μοντέλο ημισταθερής κατάστασης [17] αυτή η διαφορά οδηγεί σε μείωση προσόδων μικρότερη του 1%. Ωστόσο δεδομένου ότι οι πρόσοδοι αυτοί δεν μπορούν να αξιοποίηθούν πάντα πλήρως θα πρέπει η σύγκριση των συστημάτων να γίνει με βάση όχι τα ιδανικά θερμικά κέρδη (με την παραδοχή ότι όλα τα θερμικά κέρδη μπορούν να αξιοποιηθούν, άρα ο συντελεστής χρήσης θα είναι 1) αλλά με βάση τα αξιοποιήσιμα θερμικά κέρδη από τον τοίχο Trombe. Χρησιμοποιώντας λοιπόν το ίδιο μοντέλο ημισταθερής κατάστασης προκύπτει ότι τα τελικά αξιοποιήσιμα θερμικά κέρδη του συστήματος με αποθήκευση θερμότητας είναι κατά 35% (ετήσιος μέσος όρος) μεγαλύτερα από αυτά του συστήματος χωρίς αποθήκευση θερμότητας. Η διαφορά αυτή ξεκινάει από 15% τον Οκτώβριο και φτάνει το 45% κατά τους χειμερινούς μήνες.



Σχήμα 8. Ετήσια μεταβολή μέσης παροχής αέρα στο διάκενο.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε ένα μοντέλο ισοζυγίου ενέργειας με ωριαίο βήμα για τον υπολογισμό της λειτουργείας ενός τοίχου Trombe-Michel λαμβάνοντας υπόψη και την αποθήκευση θερμότητας στον τοίχο Trombe. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό ενός τοίχου Trombe και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με αυτά ενός αντίστοιχου μοντέλου που δε λαμβάνει υπόψη τη θερμοαποθήκευση. Εξετάστηκαν οι θερμοκρασίες που αναπτύχθηκαν στον τοίχο Trombe με τα δύο μοντέλα και η παροχή αέρα διαμέσου του διακένου αέρα. Το προτεινόμενο ισοζύγιο ενέργειας επιτυγχάνει να μοντελοποιήσει τη διαφοροποίηση που οφείλεται στη θερμοαποθήκευση και τη χρονική υστέρηση στην απόδοση της θερμότητας λόγω της αξιοποίησης της θερμικής μάζας. Με βάση τα αποτελέσματα ο εξεταζόμενος τοίχος Trombe στη συγκεκριμένη θέση έχει την πιο αποτελεσματική λειτουργία κατά τον Οκτώβριο και τη χειρότερη τον Απρίλιο. Κατά τους υπόλοιπους χειμερινούς μήνες η απόδοση παραμένει σχεδόν η ίδια.

Το μοντέλο που δε λαμβάνει υπόψη τη θερμοαποθήκευση προβλέπει υψηλότερες θερμοκρασίες και παροχή αέρα στο διάκενο από το παρόν μοντέλο κατά 10%. Ωστόσο όταν οι υπολογιζόμενες παροχές μάζας χρησιμοποιούνται σε μοντέλο ημισταθερής κατάστασης αυτή η διαφορά μειώνεται σε λιγότερο από 1% σε ότι τις θερμικές προσόδους από ιδανική λειτουργία του τοίχου Trombe (περίπτωση στην οποία όλα τα θερμικά κέρδη αξιοποιούνται) ενώ αν στο μοντέλο ημισταθερής κατάστασης υπολογιστούν τα αξιοποιήσιμα θερμικά κέρδη λαμβάνοντας υπόψη τη θερμική μάζα του συστήματος προκύπτει ότι το σύστημα με θερμοαποθήκευση υπερτερεί κατά 35% του συστήματος χωρίς θερμοαποθήκευση.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία έχει υλοποιηθεί στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος ΕΛΙΔΕΚ - Αριθμητική και πειραματική διερεύνηση της απόδοσης ηλιακών αεροθερμικών συστημάτων για κτήρια μηδενικής κατανάλωσης ενέργεια - NUMEXSAH, το οποίο χρηματοδοτείται από τη ΓΓΕΤ

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] DesignBuilder Software Ltd - Home, 2020, https://designbuilder.co.uk//

[2] EnergyPlus,2020, https://energyplus.net/

[3] Guohui G., 1998, “A parametric study of Trombe walls for passive cooling of buildings”, Energy and Buildings, 27, pp.37–43.

[4] Hami, K., Draoui, B. and Hami, O., 2012, “The thermal performances of a solar wall”, Energy, 39, pp.11-16.

[5] EN ISO 13790, 2008, Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling

[6] Ruis-Pardo, A., Alvarez Dominguez, S.A., Fernadez, J.A.S., 2010, “Revision of the Trombe wall calculation method proposed by UNE EN-ISO 13790”, Energy and Buildings, 42, pp.763–773.

[7] Wang, R. and Zhai X.,2018, Handbook of Energy Systems in Green Buildings, R Springer, Verlag Gmbh Germnay

[8] Duffin, R.J. and Knowless, G., 1985, “A simple design method for a Trombe wall”, Solar Energy, 34(1), pp. 69-72.

[9] Balocco, C., 2002, “A simple model to study ventilated facades energy performance”, Energy and Building, 34, pp. 469-475.

[10] Ong, K.S., 2003, “A mathematical model of a solar chimney”, Renewable Energy, 28(7), pp. 1047-1060.

[11] Baxevanou, C., Fidaros, D. and Tsangrassoulis, A., 2019, “An energy balance model for passive solar systems operation, Journal of Physics: Conference Series”, 1343, 12130

[12] Saxena, A., Varun and El-Sebaii, 2015, “A.A, A thermodynamic review of solar air heaters”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 43, pp. 863-890.

[13] Bloem, J.J., Lodi, C., Cipriano, J., and Chemisana, D., 2012, “An outdoor test reference environment for double skin applications of building integrated photovoltaic systems”, Energ. Buildings, 50, pp. 63–73.

[14] EN ISO 6946, 2007, Building components and building elements - Thermal resistance and thermal transmittance – Calculation method

[15] Duffie, J.A., and Beckman, W.A., 2013, Solar engineering of thermal processes, Wiley, New Jersey, 4rth Edition.

[16] ΤΟΤΕΕ20701-3/2010, 2014, ‘Κλιματικά δεδομένα ελληνικών περιοχών’, Γ' έκδοση, Τεχνική Οδηγία Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδος, Αθήνα

[17] C. Baxevanou, D. Fidaros, A. Tsangrassoulis, ‘Analytic model for solar air heaters performance assessment’ RoomVent 2020, 14-17 February 2021, Torino, ItalyRoomVent

2Δ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΙΧΟΥ TROMBE ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΟΥ ΣΕ ΟΙΚΙΣΚΟ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

Δημήτριος Φείδαρος, Αικατερίνη Μπαξεβάνου, Αριστείδης Τσαγκρασούλης

Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 38333 Βόλος
e-mail: dfeid@uth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο Τοίχος Trombe είναι ένα παθητικό σύστημα ρύθμισης του μικροκλίματος ενός κτιρίου. Στόχος της εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός 2Δ μοντέλου υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (Computational Fluid Dynamics – CFD) για τη μελέτη της λειτουργίας μιας τομής τοίχου Trombe προκειμένου να μελετηθούν οι μηχανισμοί μετάδοσης θερμότητας ανάμεσα στις συνιστώσες του παθητικού συστήματος και να υπολογιστούν οι σχετικοί συντελεστές καθώς και η παροχή αέρα στο διάκενο.

Για τη μελέτη των φαινομένων μεταφοράς που αναπτύσσονται στην προσομοιωμένη 2Δ γεωμετρία σε μόνιμη κατάσταση επιλύθηκαν οι μερικές διαφορικές εξισώσεις της συνέχειας, της διατήρηση της ορμής, της ενέργειας καθώς της ακτινοβολίας με τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων. Η τύρβη μοντελοποιήθηκε με το μοντέλο k-ε υψηλού αριθμού Re, η ακτινοβολία με το μοντέλο Discrete Ordinates (DO) σε τέσσερα φασματικά εύρη (UV, VIS, NIR και IR) ενώ η εξίσωση της ενέργειας επιλύεται και μέσα στα στερεά. Η εξίσωση της ακτινοβολίας συζευγνύεται με την εξίσωση της ενέργειας μέσω ενός όρου πηγής, όπως αυτή σχηματίζεται ως μερική διαφορική εξίσωση. Το οπτικά και θερμικά διαπερατό υλικό προσομοιώνεται ως αδιάφανο υπόστρωμα που θεωρείται ως αμφίπλευρο σύνολο δύο ημιαδιάφανων επιφανειών οπτικά και θερμικά συζευγμένων ως στερεό υλικό και τον αέρα εντός του διάκενου, ενώ με αντίστοιχο τρόπο αντιμετωπίστηκε η θερμική σύζευξη του αέρα και της επιφάνειας συλλογής του τοίχου αποθήκευσης.

Συγκεκριμένα προσομοιώθηκε η κάθετη τομή ενός τοίχου Trombe ύψους 2.8 m, με απόσταση ανάμεσα στις οπές αερισμού 2 m, με διάκενο αέρα 10 cm και τοίχο αποθήκευσης πάχους 10 cm από οπτόπλινθους χωρίς μόνωση, ο οποίος είναι εγκατεστημένος σε ένα δωμάτιο ύψους 2.8 m και μήκους 3 m. Τα αποτελέσματα αφορούν τις θερμοκρασίες εντός του διάκενου, του τοίχου αποθήκευσης θερμότητας και της προσαγωγής αέρα στο δωμάτιο, την παροχή αέρα στο διάκενο και τους συντελεστές μετάδοσης θερμότητας.

Το υπολογιστικό μοντέλο που αναπτύχθηκε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογιστεί η παροχή αέρα εντός του διακένου για οποιαδήποτε σχετική γεωμετρία του τοίχου Trombe σε οποιεσδήποτε εξωτερικές κλιματικές συνθήκες. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για σύνταξη πινάκων παροχής αέρα στο διάκενο και συντελεστών μετάδοσης θερμότητας που θα τροφοδοτεί ρητά υπολογιστικά μοντέλα. Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πιστοποίηση αναλυτικών μοντέλων σε ότι αφορά τον τύπο της ροής μέσα στο διάκενο και τη χρήση συντελεστών μετάδοσης θερμότητας. Τέλος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού της επιφάνειας απορρόφησης και της γεωμετρίας των οπών αερισμού.

Λέξεις κλειδιά: Τοίχος Trombe, υπολογιστική ρευστομηχανική, μετάδοση θερμότητας

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα παθητικά συστήματα θέρμανσης όπως είναι ο τοίχος Trombe αναδεικνύονται σε απαραίτητα δομικά στοιχεία στο δρόμο προς τα κτήρια μηδενικής ενέργειας. Μοντέλα ημισταθερής κατάστασης [1, 2] τα οποία επιτρέπουν γρήγορους σχετικά υπολογισμούς για το γενικό σχεδιασμό υποχρεώνονται σε απλοποιήσεις, υιοθετώντας γενικές τιμές για τους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας ενώ δεν είναι σε θέση να καθοδηγήσουν τους σχεδιαστές σε ότι αφορά λεπτομέρειες της κατασκευής οι οποίες όμως θα μπορούσαν να αυξήσουν την απόδοση των παθητικών στοιχείων. Μοντέλα ενεργειακού ισοζυγίου [3, 4, 5] αλλά και μοντέλα ενεργειακής προσομοίωσης κτηρίων [6, 7] θεωρούν μονοδιάστατη μετάδοση θερμότητας, κάνουν γενικευμένες παραδοχές σε ότι αφορά τη μορφή της ροής, άρα και της μετάδοσης θερμότητας μέσα στο διάκενο, ενώ χρησιμοποιούν συντελεστές για να λάβουν υπόψη την καθ' ύψος εξέλιξη της θερμοκρασίας [2].

Η υπολογιστική ρευστοδυναμική (Computational Fluid Dynamic – CFD) αν και είναι μια χρονοβόρα και υπολογιστικά απαιτητική μέθοδος για το σχεδιασμό και την αξιολόγηση της λειτουργίας ενός τοίχου Trombe μπορεί να συνδράμει στο σχεδιασμό λεπτομερειών (μορφή της επιφάνειας απορρόφησης του τοίχου Trombe, γεωμετρία ανοιγμάτων κλπ). Επιπλέον μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να τροφοδοτήσει μοντέλα ημισταθερής κατάστασης με δόκιμους συντελεστές μετάδοσης θερμότητας ή να προβλέψει τον τύπο της ροής επιτρέποντας στα μοντέλα ενεργειακού ισοζυγίου να υπολογίσουν σωστά τους συντελεστές αυτούς. Τέλος μπορούν να χρησιμοποιηθούν για επικύρωση αναλυτικών μοντέλων.

Υπάρχουν μελέτες υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (ΥΡΔ), οι οποίες προσομοιώνουν ολόκληρη τη λειτουργία τοίχων αεροθερμικών παθητικών συστημάτων μαζί με το χώρο τον οποίο εξυπηρετούν. Άλλες μελέτες ΥΡΔ επικεντρώνουν στη λειτουργία και βελτιστοποίηση συγκεκριμένων τμημάτων του παθητικού συστήματος.

Στη βιβλιογραφία απαντώνται μελέτες παθητικών αεροθερμικών συστημάτων οι οποίες ξεκινούν από 2Δ γεωμετρίες με μέθοδο πεπερασμένων όγκων [8], θεωρώντας τη ροή τυρβώδη ή στρωτή [9] προσομοιώνοντας όλο το χώρο. Αλλά και μελέτες με μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων [4]. Υπάρχουν όμως πλέον και μελέτες σε 3Δ γεωμετρίες με τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων. Στην εργασία [10] γίνεται μελέτη ΥΡΔ με προσομοίωση της ακτινοβολίας με μοντέλο DO ενός δωματίου στο Βελιγράδι εξοπλισμένου με τοίχο Trombe για χαρακτηριστικές ημέρες ενός τυπικού μετεωρολογικού έτους. Στην εργασία [11] γίνεται μελέτη ενός συστήματος ηλιακής καμινάδας με υπεδάφιους σωλήνες. Το μοντέλο ΥΡΔ πιστοποιείται με αντίστοιχη πειραματική διάταξη. Αντίστοιχη μελέτη ηλιακής καμινάδας γίνεται και στο [12].
Οι ηλιακοί τοίχου είναι ένα πρακτικό σύστημα για παραγωγή θερμού αέρα από την ηλιακή ενέργεια. Άρα γενικά μπορούν να θεωρηθούν αεροθερμικά συστήματα. Η αρχή της λειτουργίας τους είναι η ίδια με αυτή των ηλιακών συλλεκτών, συνεπώς ο μελετητής μπορεί να αξιοποιήσει και μελέτες ΥΡΔ που αφορούν γενικά αεροθερμικά συστήματα είτε η παραγόμενη θερμότητα προορίζεται για τη θέρμανση χώρου είναι για την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης.

Από ένα μεγάλο αριθμό μελετών για ηλιακούς συλλέκτες μπορούν να συλλεχθούν και να αξιολογηθούν πληροφορίες για την αύξηση της απόδοσης εστιάζοντας στην αύξηση της μεταφοράς θερμότητας με σωστή επεξεργασία της επιφάνειας απορρόφησης (τραχύτητα, πτερύγια κ.λπ.) [13]. Η εργασία [14] εξετάζει την ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας χρησιμοποιώντας πτερύγια, ράβδους ή καμπύλες επιφάνειες στην επιφάνεια συλλογής. Η εργασία [15] εξετάζει επίσης τη χρήση πτερυγίων, τη χρήση πολλαπλών διαδρομών αέρα και τη χρήση καλωδίων κάθετα προς τη διαδρομή αέρα προκειμένου να αυξηθεί η αναταραχή και κατά συνέπεια ο συντελεστής μεταφοράς καθώς και η επιφάνεια ανταλλαγής θερμότητας.

Στην παρούσα εργασία αναπτύσσεται 2Δ μοντέλο υπολογιστικής ρευστοδυναμικής για την προσομοίωση της λειτουργίας τοίχου Trombe-Michel. Τα εξεταζόμενα φαινόμενα μεταφοράς μοντελοποιούνται με τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων. Η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και η μετάδοση ηλιακής και θερμικής ακτινοβολίας προσομοιώνονται με το μοντέλο DO. Η εξεταζόμενη 2Δ τομή του τοίχου Trombe περιλαμβάνει τα ανοίγματα αερισμού. Τα αποτελέσματα δίνονται με τη μορφή γραμμών ροής στο εξεταζόμενο πεδίο, κατανομής θερμοκρασίας, κατανομής ταχυτήτων στο διάκενο αέρα και στα ανοίγματα αερισμού καθώς συντελεστών μετάδοσης θερμότητας.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1 Μαθηματικό μοντέλο

Για την περιγραφή των φαινομένων μεταφοράς που λαμβάνουν χώρα κατά τη λειτουργία του αεροθερμικού συστήματος επιλύονται με τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων οι Reynolds Averaged Navier-Stokes [16,17] εξισώσεις για μόνιμη κατάσταση. Συγκεκριμένα επιλύονται οι εξισώσεις της συνέχειας, της διατήρησης της ορμής σε δύο κατευθύνσεις (x,y), της διατήρησης της ενέργειας, της διατήρησης της ακτινοβολίας καθώς και οι εξισώσεις που αντιστοιχούν στο μοντέλο τύρβης. Η ροή θεωρείται διδιάστατη, μόνιμη, ασυμπίεστη και τυρβώδης. Η επίδραση της τύρβης στην αναπτυσσόμενη ροή και τη μετάδοση θερμότητας μοντελοποιήθηκε μέσω του standard k-ε μοντέλου υψηλού αριθμού Re [18]. Η επίδραση της θερμικής άνωσης μοντελοποιείται χρησιμοποιώντας την προσέγγιση Boussinesq. Η μοντελοποίηση της ακτινοβολίας πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του μοντέλου Discrete Ordinate (DO) [19, 20]. Οι εξισώσεις της ακτινοβολίας λύνονται σε δύο κατευθύνσεις και για τέσσερα φάσματα μήκους κύματος: α) Υπεριώδη ακτινοβολία-UV (λ=0.1-0.38 μm), β) Ορατή ακτινοβολία - VIS (λ=0.38 – 0.76 μm), γ) Υπέρυθρη ακτινοβολία κοντά στο φάσμα της ορατής – NIR (λ=0.74 – 1.4 μm) και δ) Υπέρυθρη ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος - IR (λ=1.4 – 1000 μm). Η εξισώσεις ενέργειας και ακτινοβολίας επιλύονται και στο εσωτερικό των στερεών υλικών που υπάρχουν μέσα στο υπολογιστικό πεδίο. Η επίδραση της θερμικής άνωσης προσομοιώνεται με την προσέγγιση Boussinesq.

2.2 Αριθμητικό μοντέλο

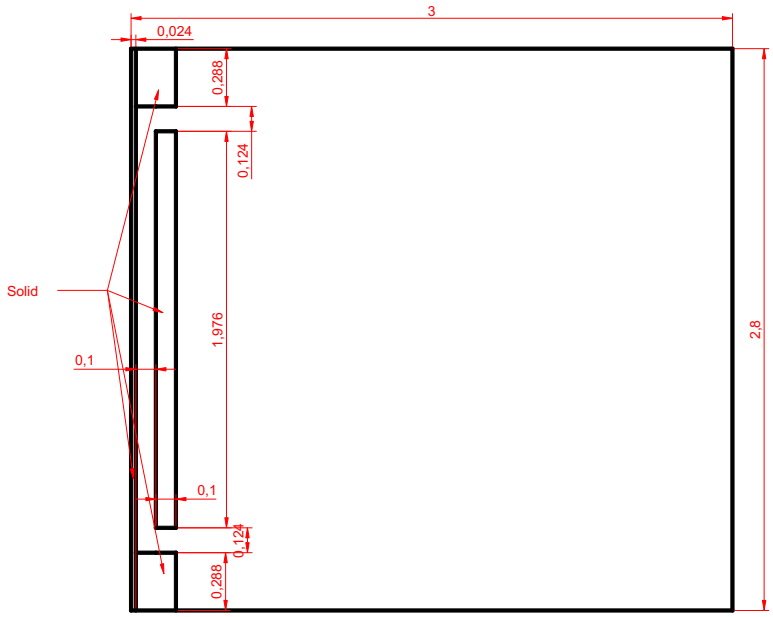
Χρησιμοποιήθηκε δομημένο πλέγμα από 57408 κελιά. Δεδομένου ότι στα στερεά όρια χρησιμοποιούνται συναρτήσεις τοίχου η απόσταση του πρώτου υπολογιστικού κελιού έχει επιλεχθεί έτσι ώστε η αδιαστατοποιημένη απόσταση y+ να είναι μεταξύ 10 και 40. Για τη σύζευξη των ταχυτήτων με την πίεση χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος SIMPLEC. Η διακριτοποίηση των όρων συναγωγής των εξισώσεων μεταφοράς της ορμής και της τύρβης γίνεται με $2^{ης}$ τάξης ανάντη σχήμα – SOU, ενώ των όρων συναγωγής της εξίσωσης της ενέργειας γίνεται με το τρίτης τάξης σχήμα MUSCL και της ακτινοβολίας με $1^{ης}$ τάξης ανάντη σχήμα. Οι όροι διάχυσης όλων των εξισώσεων γίνεται με το σχήμα των κεντρικών διαφορών. Το κριτήριο σύγκλισης τέθηκε 10^{-4} για όλες τις μεταβλητές πλην της ενέργειας για την οποία τέθηκε 10^{-6} και της ακτινοβολίας για την οποία τέθηκε 10^{-5}

3. ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Ο εξεταζόμενος τοίχος Trombe αποτελείται από έναν τοίχο αποθήκευσης θερμότητας με υψηλό συντελεστή απορρόφησης ηλιακής ακτινοβολίας ο οποίος καλύπτεται από υαλοστάσιο. Μεταξύ του τοίχου και του υαλοστασίου υπάρχει διάκενο μέσα στο οποίο κυκλοφορεί αέρας. Ο αέρας εισέρχεται στο διάκενο μεταξύ τοίχου αποθήκευσης και καλύμματος μέσω ανοίγματος αερισμού στο κάτω μέρος του τοίχου αποθήκευσης θερμαίνεται και επιστρέφει στο δωμάτιο μέσω άνω ανοίγματος αερισμού.

3.1 Εξεταζόμενη γεωμετρία

Στο 2Δ μοντέλο προσομοιώνεται η λειτουργία μιας τομής του τοίχου Trombe, η οποία περιλαμβάνει τις οπές του τοίχου συλλογής/αποθήκευσης, καθώς και το δωμάτιο του οικίσκου όπως φαίνεται στο σχήμα 1. Το πεδίο της προσομοίωσης ταυτίζεται με τα εξωτερικά όρια του οικίσκου. Η εξεταζόμενη τομή είναι στον άξονα Βορράς – Νότος με τον τοίχο Trombe να είναι στη Νότια πλευρά του δωματίου.



Σχήμα 1. Εξεταζόμενη 2Δ γεωμετρία

3.2 Οριακές συνθήκες

Το διαπερατό υλικό μοντελοποιείται ως αμφίπλευρο υαλοστάσιο αποτελούμενο από μια εξωτερική επιφάνεια ένα εσωτερικό στερεό στοιχείο και μια εσωτερική επιφάνεια. Η εξωτερική επιφάνεια είναι ημιδιάφανη επιφάνεια τοίχου στο οποίο εφαρμόζεται μικτή οριακή συνθήκη συναγωγής και ακτινοβολίας με γνωστές (α) την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στα τέσσερα φάσματα, (β) τη θερμοκρασία του αέρα (γ) το συντελεστή συναγωγής με τον εξωτερικό αέρα (δ) την ισοδύναμη θερμοκρασία του ουρανού για τον υπολογισμό της ανταλλαγής θερμικής ακτινοβολίας. Η εξωτερική αυτή επιφάνεια είναι θερμικά και οπτικά συζευγμένη με το στερεό του καλύμματος. Το στερεό του καλύμματος είναι θερμικά και οπτικά συζευγμένο από την άλλη πλευρά με μια ημιδιάφανη επιφάνεια τοίχου. Η ημιδιάφανη εσωτερική επιφάνεια είναι επίσης θερμικά και οπτικά συζευγμένη με τον αέρα στο διάκενο.
Η εσωτερική (επιφάνεια που βλέπει το διάκενο) επιφάνεια του τοίχου συλλογής/αποθήκευσης είναι επίσης ημιδιάφανος τοίχος (αλλά με συντελεστή απορρόφησης αρκετά μεγάλο για να εξαντλείται η προσπίπτουσα ακτινοβολία στο πρώτο κελί) η οποία από τη μια πλευρά είναι οπτικά και θερμικά συζευγμένη με τον αέρα στο διάκενο ενώ από την άλλη πλευρά είναι συζευγμένη με το στερεό του τοίχου ο οποίος επίσης αντιμετωπίζεται ως ‘αμφίπλευρο υαλοστάσιο.
Η επιφάνεια του τοίχου αποθήκευσης που είναι σε επαφή με το δωμάτιο είναι ένας αδιάφανος τοίχος θερμικά συζευγμένος από τη μια πλευρά με το στερεό του τοίχου και από την άλλη με τον αέρα στο εσωτερικό του οικίσκου.
Όλες οι υπόλοιπες επιφάνειες των τοίχων του οικίσκου θεωρούνται αδιαβατικές επιφάνειες με θερμοκρασία ίση με τη θερμοκρασία σχεδιασμού. Αυτή επιλέγεται για να υπάρχει η δυνατότητα σύγκρισης με τα αναλυτικά μοντέλα στα οποία θεωρείται ότι σε όλη τη διάρκεια της λειτουργίας επιτυγχάνονται συνθήκες θερμικής άνεσης.

3.3 Οπτικές ιδιότητες υλικών

Το διαπερατο υλικό αποτελείται από δύο υαλοπίνακες με εσωτερικό διάκενο αέρα. Ωστόσο στην προσομοίωση αντιμετωπίζεται ως ένα υλικό με το ίδιο πάχος και ισοδύναμες θερμικές και οπτικές ιδιότητες.

Με δεδομένα τις περατότητες, τ_{ti} και ανακλαστικότητες, ρ_{ti} των επί μέρους τζαμιών [21 – 23] υπολογίζεται η περατότητα, τ_t, απορρόφηση, α_t, και ανακλαστικότητα, ρ_t, του όλου καλύμματος (σύστημα δύο υαλοστασίων και διάκενου αέρα) για κάθετα προσπίπτουσα ακτινοβολία [21]

$$\tau_t = \frac{\tau_{t1}\cdot\tau_{t2}}{1-\rho_{t1}\cdot\rho_{t2}} \qquad (1)$$

$$\rho_t = \rho_{t1} + \frac{\tau_t\cdot\rho_{t2}\cdot\tau_{t1}}{\tau_{t2}} \qquad (2)$$

$$\alpha_t = 1 - \rho_t - \tau_t \qquad (3)$$

Στη συνέχεια και με τις ακόλουθες σχέσεις υπολογίζονται ο ισοδύναμος συντελεστής διάθλασης,n, και ο ισοδύναμος συντελεστής απορρόφησης, α_s (extinction coefficient) για την όλη δομή.

Ολική περατότητα $\tau_t = \tau_\alpha \cdot \left(\frac{1-r}{1+r}\right) \cdot \left(\frac{1-r^2}{1-(r x \tau_\alpha)^2}\right)$ (4)

Ολική ανακλαστικότητα $\rho_t = r(1 + \tau_\alpha \cdot \tau_t)$ (5)

Ολική απορροφητικότητα $\alpha_t = (1 - \tau_\alpha) \cdot \left(\frac{1-r}{1-r\cdot\tau_\alpha}\right)$ (6)

Όπου, r, η ανακλαστικότητα του υαλοστασίου, και τ_α η περατότητα λόγω απορρόφησης.

$$r = \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2 \Rightarrow n = \frac{r+1+2\sqrt{r}}{1-r} \qquad (7)$$

$$\alpha_s = \frac{1}{d}\ln\left(\frac{1}{1-a}\right) \qquad (8)$$

$$\tau_\alpha = 1 - \alpha \qquad (9)$$

Όπου α, η απορρόφηση του υαλοστασίου και d το πάχος του υαλοστασίου.

Οι υπολογισμοί αυτοί γίνονται για τις οπτικές ιδιότητες του υαλοστασίου σε κάθε ένα από τα εξεταζόμενα φάσματα μήκους κύματος.

Με βάση τις παραπάνω σχέσεις και για κάλυμμα από διπλό υαλοπίνακα 4-15-5 με αέρα και επιλεκτική επιφάνεια, low-e οι υπολογιζόμενες οπτικές ιδιότητες του ισοδύναμου καλύμματος που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση δίνονται στον πίνακα 1.

Πίνακας 1. Φασματικές οπτικές ιδιότητες καλύμματος

Οπτική ιδιότητα	UV	VIS	NIR	IR
α_s	38.53	12.97	32.35	326
n	1.846	1.906	1.825	1

Για τον τοίχο αποθήκευσης ο συντελεστής απορρόφησης αs θωρείται ίσος με 1000 και ο συντελεστής διάθλασης ίσος με 1.418 σε όλο το εξεταζόμενο φάσμα μήκους κύματος.

3.4 Θερμικές ιδιότητες υλικών

Στον ακόλουθο πίνακα 2. δίνονται οι θερμικές ιδιότητες των χρησιμοποιούμενων υλικών. Για το κάλυμμα πάλι πρόκειται για θερμικές ιδιότητες του ισοδύναμου συμπαγούς καλύμματος.

Πίνακας 2. Θερμικές ιδιότητες υλικών

	Πυκνότητα [kg/m^3]	Θερμική αγωγιμότητα [W/mK]	Ειδική θερμοχωρητικότητα [J/kgK]
Κάλυμμα	938.26	0.057	750.21
Τοίχος αποθήκευσης	2000	0.65	1000

3.5 Εξωτερικές κλιματικές συνθήκες

Προσομοιώθηκε η λειτουργία του τοίχου Trombe για θερμοκρασία εξωτερικού αέρα 23.73 ^{o}C τις ακόλουθες φασματικές τιμές κάθετα προσπίπτουσας ακτινοβολίας στην εξωτερική επιφάνεια του καλύμματος.

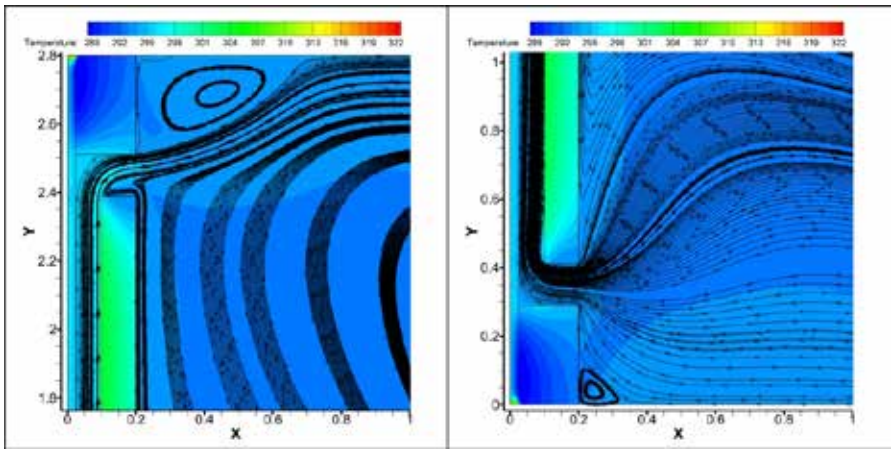
Πίνακας 3. Κάθετα προσπίπτουσα ακτινοβολία στην εξωτερική επιφάνεια του καλύμματος

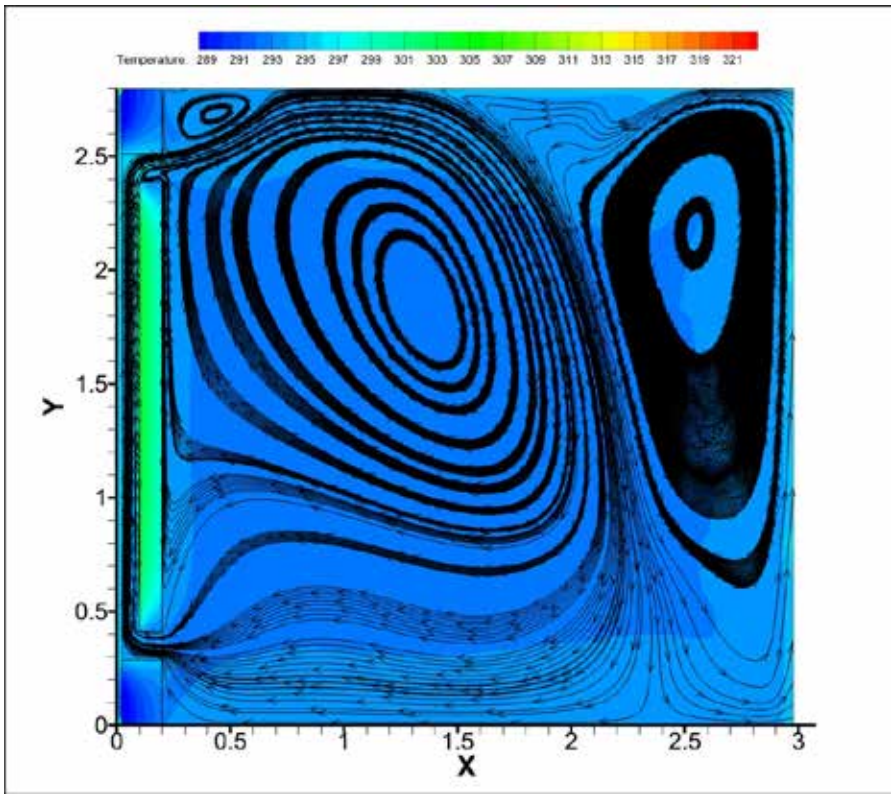
	UV	VIS	NIR	IR
Άμεση ακτινοβολία [W/m^2]	42.92	157.37	110.87	50.07
Διάχυτη ακτινοβολία [W/m^2]	16.46	60.37	42.53	19.21

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο Σχήμα 3 δίνονται οι ισοθερμοκρασιακές καμπύλες σε όλο το υπολογιστικό πεδίο και το ροικό πεδίο. Η θερμοκρασία του τοίχου Trombe αυξάνει λόγω της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και θερμαίνει τον αέρα στο διάκενο ενώ μέσω του τοίχου αποθήκευσης η θερμοκρασία μεταφέρεται στην εσωτερική πλευρά του τοίχου. Η μέση θερμοκρασία του τοίχου αποθήκευσης είναι 27.01 ^{o}C, με την επιφάνεια που είναι σε επαφή με το διάκενο να έχει μέση θερμοκρασία 29.61 oC και την επιφάνεια που είναι σε επαφή με το δωμάτιο να έχει μέση θερμοκρασία 24.5 oC. Ο θερμός αέρας ανέρχεται λόγω της θερμικής άνωσης και εισέρχεται στο δωμάτιο από το άνω άνοιγμα, ενώ κρύος αέρας μπαίνει από το κάτω άνοιγμα στο διάκενο.

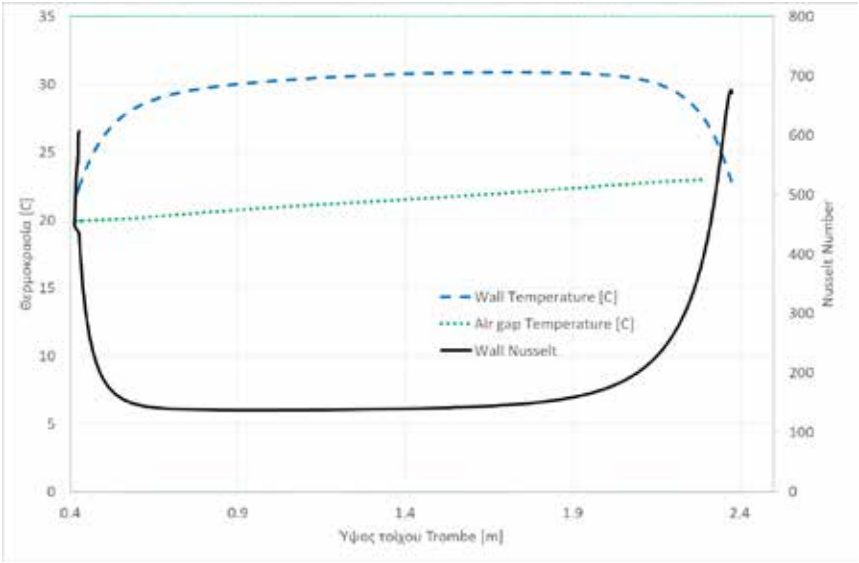
Στο Σχήμα 2 δίνονται οι λεπτομέρειες της ροής στα κάτω και άνω ανοίγματα αερισμού όπου μπορούν να μελετηθούν τα πρότυπα της ροής καθώς και οι αποκολήσεις ροής και οι ανακυκλοφορίες που οφείλονται στις ακμές των ανοιγμάτων.





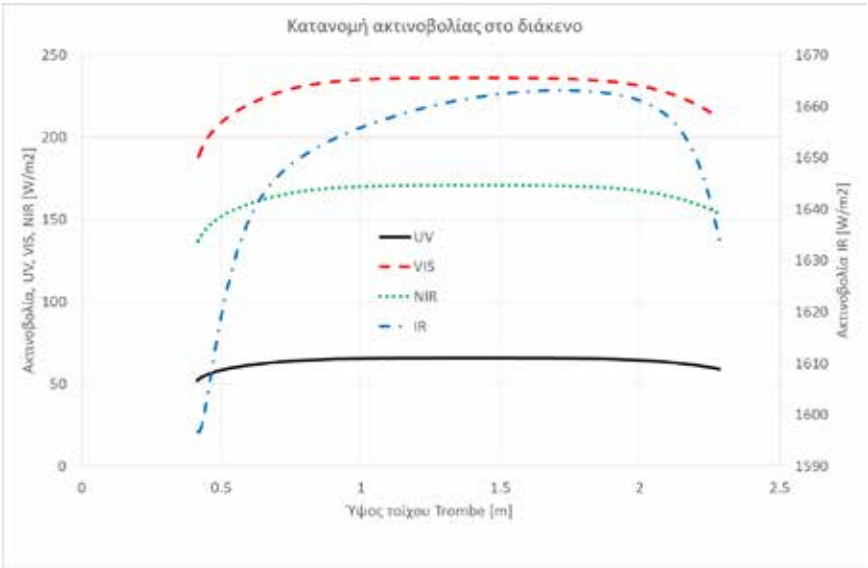
Σχήμα 3. Κατανομή θερμοκρασίας και ροικό πεδίο

Στο Σχήμα 4 δίνεται η καθ' ύψος μεταβολή της θερμοκρασίας και του αριθμού Nusselt πάνω στην επιφάνεια του τοίχου αποθήκευσης η οποία είναι σε επαφή με το διάκενο, καθώς και η καθ' ύψος μεταβολή της θερμοκρασίας του αέρα στο κέντρο του διάκενου. Καθώς ο αέρας ανέρχεται η θερμοκρασία του αυξάνει. Το ίδιο συμβαίνει και στην επιφάνεια του τοίχου εκτός από τα τμήματα που είναι κοντά στα ανοίγματα αερισμού. Στο μεγαλύτερο τμήμα του τοίχου ο αριθμός Nusselt είναι της τάξης του 100.



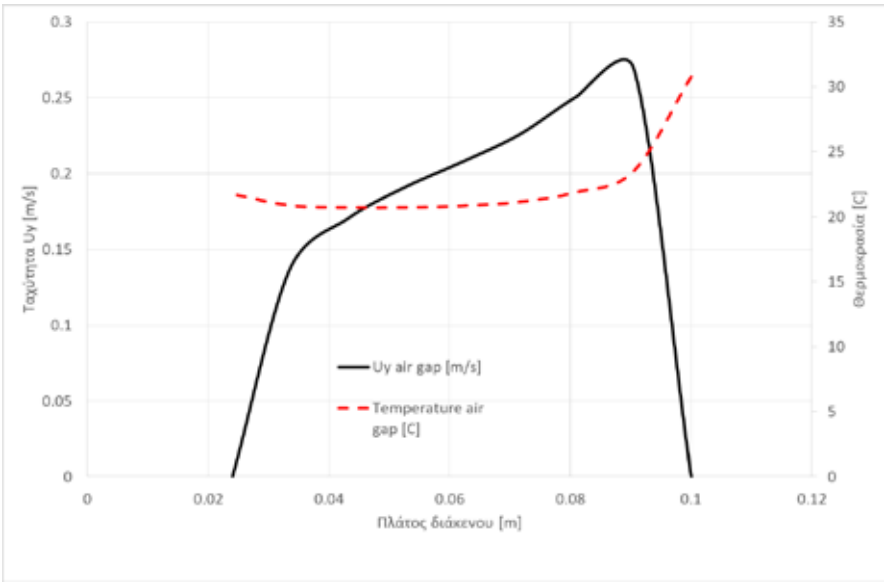
Σχήμα 4. Θερμοκρασία και αριθμός Nusselt στην επιφάνεια απορρόφησης και στο διάκενο.

Στο Σχήμα 5 δίνεται η καθ ύψος μεταβολή της ακτινοβολίας και στα 4 εξεταζόμενα φάσματα στο κέντρο του διάκενου.



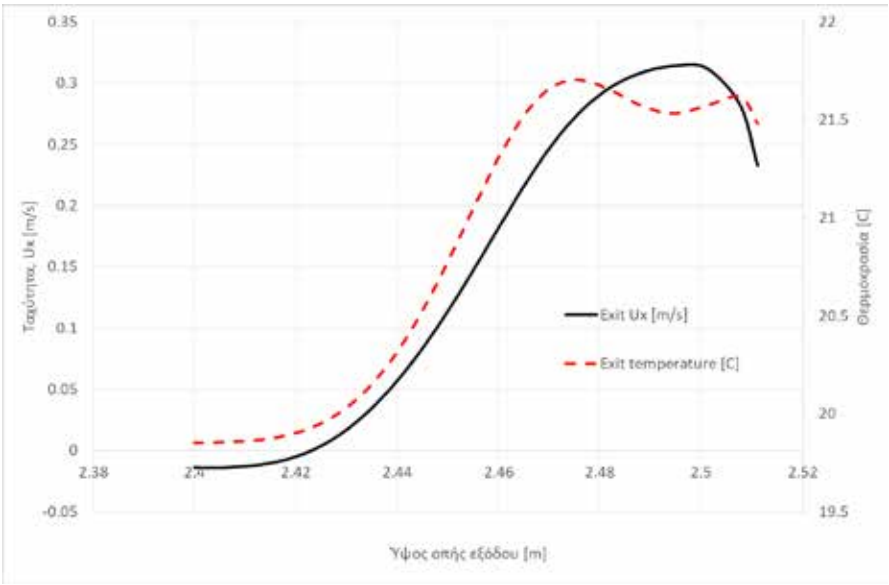
Σχήμα 5. Ακτινοβολία μέσα στο διάκενο

Στο Σχήμα 6 δίνονται οι κατανομές θερμοκρασίας και της y συνιστώσας της ταχύτητας μέσα στο διάκενο σε ύψος 1.4 m. Η ροή φαίνεται πλήρως ανεπτυγμένη ενώ είναι σαφής η αύξηση της θερμοκρασίας από την επαφή του αέρα με τον τοίχο απορρόφησης. Η παροχή μάζας του αέρα μέσα στο διάκενο είναι 0.0156 kg/s.



Σχήμα 6. Κατανομές θερμοκρασίας και ταχύτητας μέσα στο διάκενο

Τέλος στο Σχήμα 7 δίνονται οι κατανομές θερμοκρασίας και της x συνιστώσας της ταχύτητας στην έξοδο του αέρα από το διάκενο προς το δωμάτιο. Η θερμοκρασία του αέρα έχει αυξηθεί κατά 2 ^{o}C, ενώ υπάρχει αποκόλλησή ροής με αποτέλεσμα να παρατηρείται μια μικρή ανακυκλοφορία.



Σχήμα 7. Κατανομές θερμοκρασίας και ταχύτητας στο άνω άνοιγμα αερισμού

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αναπτύχθηκε ένα CFD υπολογιστικό μοντέλο για την προσομοίωση της λειτουργίας ενός τοίχου Trombe σε μια 2Δ τομή που περιλαμβάνει τα ανοίγματα αερισμού. Η φυσική της λειτουργίας του τοίχου Trombe προσομοιώθηκε με επιτυχία. Το υπολογιστικό μοντέλο που αναπτύχθηκε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογιστεί η παροχή αέρα εντός του διακένου για οποιαδήποτε σχετική γεωμετρία του τοίχου Trombe σε οποιεσδήποτε εξωτερικές κλιματικές συνθήκες. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για σύνταξη πινάκων παροχής αέρα στο διάκενο και συντελεστών μετάδοσης θερμότητας που θα τροφοδοτεί ρητά υπολογιστικά μοντέλα. Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πιστοποίηση αναλυτικών μοντέλων σε ότι αφορά τον τύπο της ροής μέσα στο διάκενο και τη χρήση συντελεστών μετάδοσης θερμότητας. Τέλος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού της επιφάνειας απορρόφησης και της γεωμετρίας των οπών αερισμού.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία έχει υλοποιηθεί στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος ΕΛΙΔΕΚ - Αριθμητική και πειραματική διερεύνηση της απόδοσης ηλιακών αεροθερμικών συστημάτων για κτήρια μηδενικής κατανάλωσης ενέργεια - NUMEXSAH, το οποίο χρηματοδοτείται από τη ΓΓΕΤ

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] ISO 13790:2008, 2008, Thermal performance of buildings—calculation of energy use for space heating.

[2] Ruis-Pardo, A., Dominguez, S.A. and Fernadez, J.A.S., 2010, “Revision of the Trombe wall calculation method proposed by UNE EN-ISO 13790”, Energy and Buildings, 42, pp.763–773.

[3] Ong, K.S., 2003, “A mathematical model of a solar chimney”, Renewable Energy, 28(7), pp. 1047-1060.

[4] Balocco, C., 2002, “A simple model to study ventilated facades energy performance”, Energy and Building, 34, pp. 469-475.

[5] Baxevanou, C., Fidaros, D. and Tsangrassoulis, A., 2019, An energy balance model for passive solar systems operation, *Journal of Physics: Conference Series, 1343*, 12130.

[6] Sacht, H.M., Braganca, L., Almeida, M. and Caran, R., 2011, “Trombe wall thermal performance for a modular façade system in different Portuguese climates: Lisbon, Porto, Lajes and Funchal”, Proceedings of Building Simulation 2011: 12th Conference of International Building Performance Simulation Association, 14-16 November

[7] Jaber, S. and Ajib, S., 2011, “Optimum design of Trombe wall system in Mediterranean region”, Solar Energy, 85, pp. 1891–1898.

[8] Guohui G., 1998, “A parametric study of Trombe walls for passive cooling of buildings”, Energy and Buildings, 27, pp.37–43.

[9] Hami, K., Draoui, B. and Hami, O., 2012, “The thermal performances of a solar wal”, Energy, 39, pp. 11-16.

[10] Bajc, T., Todorovic, M.N. and Svorcan, J., 2015, “CFD analyses for passive house with Trombe wall and impact to energy demand”, Energy and Buildings, 98, pp. 39–44.

[11] Serageldin, A.A., Abdelrahman, A.K. and Ookawara, S., 2018, “Parametric study and optimization of a solar chimney passive ventilation system coupled with an earth-to-air heat exchanger”, Sustainable Energy Technologies and Assessments, 30, pp. 263–278.

[12] Mokheimer, E.M.A., Shakeel, M.R. and Al-Sadah, J., 2017, “A novel design of solar chimney for cooling load reduction and other applications in buildings”, Energy and

[13] Saxena, A., Varun and El-Sebaii, A.A., 2015, “A thermodynamic review of solar air heaters”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 43, pp. 863–890.

[14] Singh Bisht, V., Kumar Patil, A. and Gupta, A., 2018, “Review and performance evaluation of roughened solar air heaters”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 81, pp. 954–977.

[15] Kabeel, A.E., Hamed, M.H., Omara, Z.M. and Kandeal, A.W., 2017, “Solar air heaters: Design configurations, improvement methods and applications – A detailed review”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 70, pp. 1189–1206.

[16] Launder, B.E., and Spalding, D.B., 1974, “The numerical computation of turbulent flows”, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 3, pp. 269-289.

[17] Ferziger, J.H. and Peric, M., 1996, Computational Methods for Fluid Dynamics, Springer, London.

[18] Launder, B.E., Morse, A., Ridi, W., and Spalding, D.B., 1972, “Prediction of free shear flows - A comparison of the performance of six turbulence models”, Procs. Conf. On free turbulent shear flows, Langely Research Center, Hampton, Virginia.

[19] Chui, E.H., and Raithby, G.D., 1993, “Computation of radiant heat transfer on a nonorthogonal mesh using the finite-volume method”, Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals: An International Journal of Computation and Methodology, 23 (3), pp. 269-288.

[20] Raithby, G.D., 1999, “Discussion of the finite-volume method for radiation, and its application using 3D unstructured meshes”, Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals: An International Journal of Computation and Methodology, 35(4), pp. 389-405.

[21] J.A.Duffie and W.A. Beckman, 2006, Solar Engineering of Thermal Processes, 3rd Edition, Wiley, New Jersey.

[22] ASHRAE Handbook Fundamentals, 2009, Inch-Pound Edition, 1791 Tullie Circle, N.E., Atlanta, GA 30329.

[23] Rubin., M., 1985, “Optical properties of soda lime silica glasses”, Sol. Energy Mater. 12, pp. 275-288.

ΡΗΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΘΕΡΙΝΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΙΧΟΥ TROMBE ΩΣ ΗΛΙΑΚΗ ΚΑΜΙΝΑΔΑ

Αικατερίνη Μπαξεβάνου, Δημήτριος Φείδαρος, Αριστείδης Τσαγκρασούλης

Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, ΠΘ, 38333 Βόλος
e-mail: cbaxev@gmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σε μια πορεία προς κτίρια μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας οι σχεδιαστές επιστρατεύουν μεταξύ άλλων παθητικά συστήματα για τη θέρμανση και την ψύξη των κτιρίων. Ένα τέτοιο σύστημα είναι ο τοίχος Trombe ο οποίος (αν και σχεδιασμένος για χειμερινή λειτουργία) κατά τη θερινή περίοδο μπορεί να συμβάλει και στην ψύξη του χώρου αυτού λειτουργώντας ως ηλιακή καμινάδα για το χρονικό διάστημα που το επιτρέπουν οι εξωτερικές κλιματικές συνθήκες.

Αν και έχουν αναπτυχθεί υπολογιστικές μέθοδοι για την περιγραφή της λειτουργίας αυτών των παθητικών συστημάτων, εντοπίζεται ένα μικρό κενό για φιλικά προς τον χρήστη υπολογιστικά εργαλεία που μπορούν να καθοδηγήσουν τις ομάδες σχεδιασμού κατά τα πρώτα στάδια του σχεδιασμού. Σήμερα τα διαθέσιμα υπολογιστικά εργαλεία διακρίνονται σε τέσσερις κατηγορίες: α) Μοντέλα ημισταθερής κατάστασης βάσει του ISO13790(2008) τα οποία όμως είναι σχεδιασμένα για μηχανικό αερισμό, β) αναλυτικά μοντέλα υπολογισμού ενεργειακού ισοζυγίου τα οποία απαιτούν προγραμματισμό, γ) μοντέλα προσομοίωσης ενεργειακής συμπεριφοράς κτηρίων με τη μορφή εμπορικών κωδίκων τα οποία απαιτούν αγορά και εκμάθηση εξειδικευμένου λογισμικού και τέλος δ) Μοντέλα CFD τα οποία απαιτούν εξειδικευμένες υπολογιστικές δεξιότητες. Είναι προφανές ότι από τις προαναφερόμενες κατηγορίες μοντέλων μόνο τα μοντέλα ημι-σταθερής κατάστασης θα μπορούσαν να εξελιχθούν σε ρητά μοντέλα που να μπορούν να χρησιμοποιηθούν εύκολα στη φάση του αρχικού σχεδιασμού ενός κτηρίου.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός ρητού μοντέλου υπολογισμού της εξοικονόμησης ενέργειας που προσφέρει ο τοίχος Trombe σε θερινή λειτουργία με εξισώσεις οι οποίες θα μπορούν να λυθούν διαδοχικά χωρίς απαίτηση ειδικού λογισμικού και γνώσεων προγραμματισμού. Για το λόγο αυτό αναπτύχθηκε μοντέλο ημισταθερής κατάστασης με μηνιαίο βήμα για τη λειτουργία του τοίχου Trombe ως ηλιακή καμινάδα υιοθετώντας το μοντέλο ισοδύναμου ηλεκτρικού κυκλώματος σύμφωνα με τη λογική που περιγράφεται στο ISO 13790. Προϋπόθεση ωστόσο για τη χρήση του μοντέλου είναι η γνώση της παροχής αέρα μέσα στο διάκενο η λαμβάνεται από αναλυτικό μοντέλο ενεργειακού ισοζυγίου το οποίο αναπτύχθηκε και τροποποιήθηκε κατάλληλα από τους συγγραφείς.

Το μοντέλο εφαρμόστηκε σε οικίσκο εξοπλισμένο με τοίχο Trombe τοποθετημένο στην Κεντρική Ελλάδα και προέκυψε ότι λειτουργώντας ως ηλιακή καμινάδα δε μπορεί να συνεισφέρει θετικά στην κάλυψη των ψυκτικών φορτίων σε κανέναν από τους εξεταζόμενους μήνες. Κατά τους μήνες Μάιο, Ιούνιο και Σεπτέμβριο θα πρέπει να λειτουργήσει με κάποιο σύστημα αυτοματισμού το οποίο θα κλείνει τα ανοίγματα αερισμού και θα σκιάζει αυτόματα τον τοίχο Trombe κατά τα χρονικά διαστήματα κατά τα οποία τα θερμικά ηλιακά κέρδη μέσω αυτού υπερτερούν των απωλειών (κυρίως μέσω αερισμού). Ενώ τον Ιούλιο και τον Αύγουστο θα πρέπει να μένει πλήρως σκιασμένος και τα ανοίγματα αερισμού κλειστά. Ωστόσο ο ίδιος τοίχος σε περιοχές με χαμηλότερες θερμοκρασίες είναι δυνατό να συνεισφέρει θετικά στην κάλυψη των αναγκών δροσισμού κατά τους μήνες Μάιο και Σεπτέμβριο ακόμα και χωρίς αυτοματισμούς ενώ με αυτοματισμούς μπορεί να λειτουργήσει ακόμα και κατά τους καθαρά καλοκαιρινούς μήνες.

Λέξεις Κλειδιά: τοίχος Trombe, ηλιακή καμινάδα, μοντέλο ημισταθερής κατάστασης, μηνιαίο βήμα, ρητό μοντέλο

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο πλαίσιο σχεδιασμού κτηρίων μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν παθητικά συστήματα θέρμανσης και δροσισμού. Ένα τέτοιο παθητικό σύστημα μπορεί να είναι ένας τοίχος Trombe ο οποίος προσφέρει θέρμανση κατά τους χειμερινούς μήνες αλλά μπορεί και λειτουργήσει και ως ηλιακή καμινάδα, προσφέροντας δροσισμό κατά τους θερινούς μήνες. Προκειμένου να ενταχθεί ένα τέτοιο σύστημα στο σχεδιασμό ενός κτηρίου θα πρέπει ο σχεδιαστής Μηχανικός να έχει στη διάθεσή του ένα φιλικό προς το χρήστη υπολογιστικό εργαλείο για μια αρχική εκτίμηση της λειτουργίας του στα πρώτα στάδια του σχεδιασμού.

Για να λειτουργήσει ένας τοίχος Trombe ως ηλιακή καμινάδα στο άνω μέρος του υαλοστασίου τοποθετείται θυρίδα η οποία είναι ανοιχτή το καλοκαίρι ενώ η άνω θυρίδα που συνδέει το διάκενο με το εσωτερικό του δωματίου παραμένει κλειστή. Με αυτόν τον τρόπο ο ζεστός αέρας μέσα στο διάκενο ανέρχεται με θερμική άνωση και εξέρχεται από το διάκενο προς το εξωτερικό περιβάλλον. Στο χώρο του διάκενου δημιουργείται υποπίεση με αποτέλεσμα να εισέρχεται αέρας από το εσωτερικό του δωματίου. Προκειμένου η διάταξη να λειτουργήσει ως ηλιακή καμινάδα είναι απαραίτητο στη βόρεια πλευρά του δωματίου να υπάρχει άνοιγμα. Έτσι λόγω της υποπίεσης που δημιουργείται πλέον μέσα στο δωμάτιο αέρας υποχρεώνεται να μπει σε αυτό από το βόρειο άνοιγμα με αποτέλεσμα τον αερισμό του χώρου.

Η λειτουργία ενός τοίχου Trombe είναι ένα δυναμικό φαινόμενο με τα φαινόμενα μεταφοράς που εμπλέκονται να εξαρτώνται από τις συνεχώς μεταβαλλόμενες εξωτερικές συνθήκες και από τη θερμοαποθήκευση. Συνεπώς πρόκειται για ένα δύσκολο δυναμικό πρόβλημα. Για τον υπολογισμό του σχεδιασμού και της απόδοσης ενός τοίχου Trombe έχουν αναπτυχθεί 4 κατηγορίες μοντέλων ενώ έχουν γίνει και αρκετές πειραματικές μελέτες. Η πρώτη κατηγορία αφορά μοντέλα ημισταθερής κατάστασης έτσι όπως αυτά περιγράφονται στο ISO13790(2008)[1] ως ρητό μοντέλο καθώς και στις διορθώσεις αυτού που προτάθηκαν από τους Ruiz-Pardo et al. (2010)[2]. Τα προτεινόμενα αυτή τη στιγμή στη βιλβιογραφία μοντέλα ημισταθερής κατάστασης έχουν δύο βασικά προβλήματα που τα εμποδίζουν να χρησιμοποιηθούν άμεσα ως υπολογιστικά εργαλεία σε αρχικά στάδια σχεδιασμού. Το ένα είναι ότι έχουν σχεδιαστεί μόνο για μηχανικό αερισμού (απαιτούν δηλ. να είναι γνωστή η παροχή του αέρα μέσα στο διάκενο). Το δεύτερο είναι ότι δε λαμβάνουν υπόψη τη θερμική μάζα του τοίχου Trombe. Μια άλλη μεγάλη οικογένεια μοντέλων είναι αναλυτικά μοντέλα υπολογισμού ενεργειακού ισοζυγίου [3, 4, 5]. Τα μοντέλα αυτά απαιτούν προγραμματισμό δεδομένου για την αριθμητική επίλυση ενός πεπλεγμένου συστήματος εξισώσεων. Πέραν αυτών υπάρχουν μοντέλα προσομοίωσης ενεργειακής συμπεριφοράς κτηρίων τα οποία περιλαμβάνουν ως δομικά στοιχεία και παθητικά συστήματα τοίχου Trombe [6, 7, 8]. Η χρήση αυτών των μοντέλων απαιτεί αγορά και εκμάθηση εξειδικευμένου λογισμικού. Τέλος η λειτουργία ενός τοίχου Trombe, ή τμημάτων αυτού, μπορεί να μελετηθεί και με μοντέλα CFD [9, 10, 11], κάτι όμως που απαιτεί ειδικές γνώσεις υπολογιστικών μεθόδων ή/και λογισμικού. Είναι προφανές ότι από τις προαναφερόμενες κατηγορίες μοντέλων μόνο τα μοντέλα ημι-σταθερής κατάστασης θα μπορούσαν να εξελιχθούν σε ρητά μοντέλα που να μπορούν να χρησιμοποιηθούν εύκολα στη φάση του αρχικού σχεδιασμού ενός κτηρίου. Επιπλέον η πλειοψηφία των μοντέλων αφορούν τη χειμερινή χρήση του τοίχου Trombe και όχι το ενδεχόμενο χρήσης αυτού ως ηλιακής καμινάδας για δροσισμό.

Στην παρούσα εργασία στόχος είναι να αναπτυχθεί ένα ρητό μοντέλο υπολογισμού της συνεισφοράς ενός τοίχου Trombe ως ηλιακής καμινάδας του οποίου οι εξισώσεις μπορούν να λυθούν διαδοχικά σε ένα λογιστικό φύλλο και συνεπώς να μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τους μηχανικούς ακόμα και σε αρχικά στάδια σχεδιασμού. Για την εκτίμηση της παροχής του αέρα στο διάκενο χρησιμοποιείται μοντέλο ενεργειακού ισοζυγίου το οποίο έχει αναπτυχθεί από τους συγγραφείς με κάποια τροποποίηση.[12]

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Το μοντέλο ημισταθερής κατάστασης για τη λειτουργία ενός τοίχου Trombe κατά τη θερινή περίοδο ως ηλιακή καμινάδα αναπτύχθηκε βασισμένο στην αντιμετώπιση του τοίχου Trombe στο ISO13790 [1] και την αναθεώρηση του μοντέλου από τους Ruiz-Pardo et al [2] κάνοντας μια σειρά από απλοποιητικές παραδοχές σε ότι αφορά τον υπολογισμό των συντελεστών μετάδοσης θερμότητας μέσω συναγωγής και ακτινοβολίας.

Η συνολική προσφορά σε κατανάλωση ενέργειας για κάλυψη ψυκτικών φορτίων του τοίχου Trombe κατά τη θερινή του λειτουργία στη διάρκεια ενός μήνα, Q_{TCC} [kWh/mo], υπολογίζεται από τη σχέση

$$Q_{TCC}=\eta_{C,ls}Q_{C,ht}-Q_{C,gn} \qquad (1)$$

Όπου, $\eta_{C,gn}$, ο αδιάστατος συντελεστής αξιοποίησης ψυκτικών κερδών, ο οποίος εξαρτάται από τη θερμική αδράνεια του όλου κτηρίου στο οποίο είναι εγκατεστημένος ο τοίχος Trombe. Σε αυτή τη φάση θα θεωρηθεί ίσος με 1, δηλ. θα θεωρηθεί ότι όλα τα ψυκτικά κέρδη αξιοποιούνται. $Q_{C,ht}$ [kWh/mo] είναι οι συνολικές απώλειες θερμότητας από τον τοίχο Trombe και $Q_{C,gn}$ [kWh/mo] είναι τα συνολικά θερμικά κέρδη από τον τοίχο Trombe.

$$Q_{C,ht}=Q_{tr}+Q_{ve} \quad (2)$$

Στην παραπάνω σχέση Q_{tr} [kWh/mo] είναι η συνολική μετάδοση θερμότητας διαμέσου του κελύφους του τοίχου Trombe και Q_{ve} [kWh/mo] η συνολική μετάδοση θερμότητας λόγω αερισμού.

$$Q_{tr} = \left(H_{tr,adj}\left(\theta_{int,set}-\theta_e\right)t\right)/1000 \quad (3)$$

Όπου, $Ht_{r,adj}$ [W/K] είναι ο συνολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας διαμέσου του κελύφους του τοίχου Trombe, $\theta_{int,set}$ [^oC] είναι η θερμοκρασία σχεδιασμού του κτηρίου, η οποία θα θεωρηθεί 26 ^oC, θ_e [^oC] είναι η θερμοκρασία του εξωτερικού περιβάλλοντος και t, είναι η συνολική διάρκεια της περιόδου ημέρας του εξεταζόμενου μήνα [h].

$$H_{tr,adj}=H_o+\Delta H \quad (4)$$

Όπου, Ho [W/K] είναι ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας του τοίχου χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η κίνηση του αέρα στο διάκενο και η μετάδοση θερμότητας μέσω αυτής και ΔH [W/K] είναι η πρόσθετη μετάδοση θερμότητας λόγω της λειτουργίας του τοίχου Trombe ως ηλιακή καμινάδα.

$$H_o=H_D+H_g+H_U+H_A \quad (5)$$

Όπου, H_D [W/K] είναι η μετάδοση θερμότητας διαμέσου του τοίχου Trombe από τον εσωτερικό χώρο προς το εξωτερικό περιβάλλον λόγω αγωγής-συναγωγής, Hg [W/K] είναι η μετάδοση θερμότητας προς το έδαφος η οποία λαμβάνεται 0 εφόσον ο τοίχος Trombe δεν είναι σε επαφή με το έδαφος, H_U [W/K] είναι η μετάδοση θερμότητας προς μη κλιματιζόμενους χώρους η οποία επίσης θεωρείται 0 εφόσον δεν υπάρχει μη κλιματιζόμενος χώρος σε επαφή με τον τοίχο Trombe και H_A [W/K] είναι ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας προς γειτονικά κτήρια ο οποίος επίσης δε θα ληφθεί υπόψη.

$$H_D = b_{tr,x}\left[\sum_i A_i U_i + \sum_k l_k \psi_k + \sum_j x_j\right] \quad (6)$$

Όπου, $b_{tr,x}$ [-], είναι ο συντελεστής προσαρμογής ο οποίος λαμβάνει την τιμή 1 εφόσον ο τοίχος Trombe είναι σε επαφή με τον εξωτερικό αέρα, A_i [m^2] είναι το εμβαδό της επιφάνειας του στοιχείου i του κελύφους του κτηρίου, U_i [W/m^2K] είναι ο συντελεστής θερμοπερατότητας του στοιχείου i, l_k [m] είναι το μήκος της γραμμικής θερμογέφυρας k, ψ_k [W/mK] είναι η γραμμική θερμοπερατότητα της θερμογέφυρας k και x_j [W/K] είναι η σημειακή θερμογέφυρα j. Εφόσον η ανάλυση αφορά τον τοίχο Trombe δε λαμβάνονται υπόψη ούτε γραμμικές ούτε σημειακές θερμογέφυρες. Έτσι η μετάδοση θερμότητας διαμέσου του τοίχου Trombe υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση.

$$H_D = A_{sw}U_o \quad (7)$$

Όπου, A_{sw} [m^2] το εμβαδό της επιφάνειας του τοίχου Trombe και U_o [W/m^2K] η συνολική θερμοπερατότητα της όλης διάταξης του τοίχου Trombe.

$$\Delta H = \frac{\rho C_p \dot{V}\left(U_\delta^2\right)}{U_i^2}\kappa\delta \quad (8)$$

Όπου, ρ [kg/m^3] η πυκνότητα του αέρα, C_P [J/KgK] η ειδική θερμοχωρητικότητα του αέρα, $\dot{V}$ [m^3/s] η παροχή του αέρα διαμέσου του διάκενου ανάμεσα στο κάλυμμα και τον τοίχο αποθήκευσης, $1/U_i$ [W/m^2K] η εσωτερική θερμική αντίσταση, κ [-], αδιάστατη παράμετρος η οποία σχετίζεται με τη θερμοκρασία του στρώματος αέρα και δ [-] ο λόγος της αθροιστικής διαφοράς εσωτερικής-εξωτερικής διαφοράς θερμοκρασίας όταν ο αερισμός είναι ενεργοποιημένος, προς την τιμή του για ολόκληρη την περίοδο υπολογισμού.

$$U_o = \frac{1}{1/U_i + 1/U_e} \quad (9)$$

Όπου, $1/U_e$ [W/m^2K] η εξωτερική θερμική αντίσταση

$$U_i = \frac{1}{R_i + \left(R_c/2\right)} \quad (10)$$

Όπου, R_i [m^2K/W] είναι η θερμική αντίσταση ανάμεσα στο διάκενο του αέρα και το εσωτερικό του κτηρίου όπου είναι τοποθετημένος ο τοίχος Trombe και R_c [m^2K/W] η θερμική αντίσταση του αέρα μέσα στο χώρο του διάκενου, η οποία υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση.

$$R_c = \frac{1}{h_r + \left(h_c/2\right)} \quad (11)$$

Όπου h_r [W/m^2K] είναι ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας με ακτινοβολία μέσα στο διάκενο αέρα και h_c [W/m^2K] ο συντελεστής συναγωγής μέσα στο διάκενο αέρα ο οποίος θα ληφθεί απλοποιητικά ίσος με 10 για κατακόρυφη ροή [3].

$$h_r = \frac{\frac{1}{\varepsilon_{g,i}} + \frac{1}{\varepsilon_w} - 1}{\sigma\left(T_{ee}^2 + T_{ei}^2\right)\left(T_{ee} + T_{ei}\right)} \quad (12)$$

Όπου $\varepsilon_{g,i}$ [-] είναι ο συντελεστής εκπομπής της επιφάνειας του καλύμματος που είναι σε επαφή με το διάκενο αέρα, ε_w [-] είναι ο συντελεστής εκπομπής της επιφάνειας του τοίχου που είναι σε επαφή με το διάκενο, σ η σταθερά Stefan Boltzmann ίση με 5.67×10^{-8}, T_{ee} [K] είναι η θερμοκρασία της επιφάνειας του καλύμματος που είναι σε επαφή με το διάκενο και T_{ei} [K] η θερμοκρασία της επιφάνειας του τοίχου που είναι σε επαφή με το διάκενο. Για λόγους απλοποίησης και μόνο για τον υπολογισμό του συντελεστή μετάδοσης με ακτινοβολία οι θερμοκρασίες αυτές θα θεωρηθούν 15 °C και 45 °C αντίστοιχα.

$$R_i = \frac{1}{h_i} + R_{ei} \quad (13)$$

Όπου h_i [W/m^2K] ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή από την επιφάνεια του τοίχου αποθήκευσης που είναι σε επαφή με το δωμάτιο προς το δωμάτιο, ο οποίος λαμβάνεται ίσος με 10 [3] και R_{ei} [m^2K/W] η θερμική αντίσταση διαμέσου του τοίχου αποθήκευσης η οποία υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση ανάλογα με την κατασκευή του τοίχου

$$R_{ei} = \sum_i \frac{d_i}{\lambda_i} \quad (14)$$

Όπου d_i [m] το πάχος της i στρώσης του τοίχου και λ_i [W/mK] η θερμική αγωγιμότητα της στρώσης αυτής.

$$U_e = \frac{1}{R_e + \left(R_c/2\right)} \quad (15)$$

Όπου R_e [m^2K/W] η θερμική αντίσταση ανάμεσα στο διάκενο αέρα και το εξωτερικό περιβάλλον.

$$R_e = \frac{1}{h_e} + R_{ee} \quad (16)$$

Όπου h_e [W/m^2K] ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας από την εξωτερική επιφάνεια του καλύμματος προς το εξωτερικό περιβάλλον, ο οποίος για απλοποίηση λαμβάνεται ίσος με 25 για εξωτερική κατακόρυφη ροή [13] και R_{ee} [m^2K/W] η θερμική αντίσταση διαμέσου του διάφανου καλύμματος η οποία υπολογίζεται από

$$R_{ee} = \sum_i \frac{d_i}{\lambda_i} + R_\delta \quad (17)$$

Όπου R_δ [m^2K/W] η θερμική αντίσταση του ακίνητου αέρα στο διάκενο ανάμεσα στα υαλοστάσια η οποία μπορεί να ληφθεί από το ISO 6946 [13] ανάλογα με τον τύπο του υαλοστασίου.

$$\kappa = 1 - exp\left(-\frac{Z A_{sw}}{\rho C_p \dot{V}}\right) \quad (18)$$

Όπου Z [W/m^2K] παράμετρος η οποία λαμβάνει υπόψη τη μεταβολή της θερμοκρασίας του αέρα καθ' ύψος μέσα στο διάκενο αέρα.

$$Z = \frac{1}{R_{VR} + \frac{1}{U_i + U_e}} \quad (19)$$

Όπου R_{VR} [m^2K/W] η ισοδύναμη θερμική αντίσταση αστέρα στο διάκενο αέρα η οποία υπολογίζεται από τη σχέση

$$R_{VR} = \frac{h_r}{h_c(2h_r + h_c)} \quad (20)$$

$$\delta = \begin{cases} 0.08ln(\gamma_{al}) + 0.2 & \gamma_{al} > 0.7 \\ 0.3\gamma_{al} + 0.03(0.0003^{\gamma_{al}} - 1) & \gamma_{al} < 0.7 \end{cases} \quad (21)$$

Όπου γ_{al} [-] ο λόγος κέρδη/απώλειες του στρώματος αέρα ο οποίος υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση

$$\gamma_{al} = \frac{Q_{gn,sw}}{Q_{ht,al}} \quad (22)$$

Όπου $Q_{gn,sw}$ [kWh] είναι τα ηλιακή θερμικά κέρδη του διάκενου αέρα κατά τη διάρκεια του εξεταζόμενου μήνα και $Q_{ht,al}$ [kWh] οι αντίστοιχες θερμικές απώλειες.

$$Q_{gn,sw} = I_w F_w g_{gl} A_{sw} \quad (23)$$

Όπου I_w [kWh/m^2] η συνολική μηνιαία ηλιακή ενέργεια προσπίπτουσα στον τοίχο Trombe F_W [-] ο συντελεστής διόρθωσης για υαλοστάσια που δεν προκαλούν σκέδαση g_{gl} [-] ο συντελεστής ηλιακών κερδών.

$$Q_{ht,al} = \left(U_e A_{sw}\left(\theta_{int,set} - \theta_e\right)t\right)\Big/_{1000} \quad (24)$$

$$Q_{ve} = H_{ve}\left(\theta_{int,set} - \theta_e\right)t\Big/_{1000} \quad (25)$$

Όπου, H_{ve} [W/K] ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας λόγω αερισμού μέσω του τοίχου Trombe

$$H_{ve} = \rho C p \dot{V} \quad (26)$$

$$Q_{C,gn} = Q_{int} + Q_{sol} \quad (27)$$

Όπου, Q_{int} [kWh/mo] τα εσωτερικά θερμικά κέρδη, τα οποία θεωρούνται μηδενικά εφόσον μόνο η λειτουργία του τοίχου Trombe εξετάζεται, και Q_{sol} [kWh/mo] τα ηλιακά θερμικά κέρδη που υπολογίζονται από την ακόλουθη σχέση.

$$Q_{sol} = \left[\Phi_{sol} t + \left[\sum_l \left(1 - b_{rt,l}\right) \Phi_{sol,l}\right]t\right]/1000 \quad (28)$$

Όπου, Φ_{sol} [W] η μέση χρονικά ροή θερμότητας λόγω ηλιακής ακτινοβολίας από τον τοίχο Trombe, $b_{rt,l}$ [-] ο συντελεστής προσαρμογής για την περίπτωση ύπαρξης μη κλιματιζόμενων χώρων σε επαφή με τον εξεταζόμενο, $\Phi_{sol,l}$ [W] η ροή θερμότητας λόγω ηλιακής ακτινοβολίας από γειτονικό μη κλιματιζόμενο χώρο, η οποία λαμβάνεται μηδενική εφόσον μόνο η λειτουργία του τοίχου Trombe εξετάζεται και t η συνολική χρονική περίοδος ημέρας κατά τη διάρκεια του εξεταζόμενου μήνα [h].

$$\Phi_{sol} = F_{sh} A_{sol} I_{sol} - F_r \Phi_r \quad (29)$$

Όπου, F_{sh} [-] ο συντελεστής σκίασης από εξωτερικά εμπόδια, A_{sol} [m^2] η ενεργή επιφάνεια του τοίχου Trombe, I_{sol} [W/m^2] η μέση ισχύς ηλιακής ακτινοβολίας προσπίπτουσας στην επιφάνεια τον εξεταζόμενο μήνα ανά m^2 της επιφάνειας του τοίχου Trombe (για δεδομένη κλίση και προσανατολισμό του τοίχου), Fr [-] είναι ο συντελεστής θέασης ανάμεσα στο δομικό στοιχείο και τον ουρανό το οποίο λαμβάνεται ίσο με 0.5 και Φr [W/m2] η ακτινοβολία στο φάσμα του υπέρυθρου που εκπέμπεται από τον τοίχο προς τον ουρανό.

Δεδομένων των ανωτέρω και προκειμένου να εκφραστούν τα ηλιακά κέρδη συναρτήσει της συνολικής μηνιαίας ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει στον τοίχο Trombe, I_w [kWh], τα ηλιακά θερμικά κέρδη μπορούν να υπολογιστούν από την ακόλουθη σχέση.

$$Q_{sol} = F_{sh} A_{sol} I_w - \frac{F_r \Phi_r t}{1000} \quad (30)$$

$$\Phi_r = R_{se} U_c A_{sw} h_{re} \Delta\theta_{er} \quad (31)$$

Όπου R_{se} [m^{2}K/W] είναι η θερμική αντίσταση της εξωτερικής επιφάνειας του υαλοστασίου προς το περιβάλλον, A_{sw} [m^2] το εμβαδό της επιφάνειας του τοίχου Trombe, U_c [W/m^{2}K] η συνολική θερμοπερατότητα του καλύμματος, h_{re} [W/m^{2}K] ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας με ακτινοβολία από την εξωτερική επιφάνεια του καλύμματος προς το περιβάλλον και $\Delta\theta_{er}$ [K] η μέση διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στην εξωτερική επιφάνεια του καλύμματος και την ενεργό θερμοκρασία του ουρανού η οποία μόνο για τον υπολογισμό του Φ_r λαμβάνεται ίση με 10 K [1].

$$R_{se} = \frac{1}{h_e} \quad (32)$$

$$U_c = \frac{1}{R_c + R_{ee} + R_{se}} \qquad (33)$$

Ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας με ακτινοβολία υπολογίζεται από την απλοποιημένη σχέση [1]

$$h_{re} = 5\varepsilon_{ge} \qquad (34)$$

Όπου, ε_{ge} [-] ο συντελεστής εκπομπής της εξωτερικής επιφάνειας του καλύμματος

$$A_{sol} = A_{sw} a F_s F_F F_W g_{gl} \left(U_o (R_e + R_c) + R_i \left(\frac{U_o^2}{U_i U_e} \right) \left(\frac{\rho C_p \dot{V} \kappa}{A_{sw}} \right) \right) \qquad (35)$$

Όπου, α[-] είναι ο συντελεστής απορρόφησης του τοίχου, F_S [-] είναι ο συντελεστής σκίασης και F_F [-] ο συντελεστής μείωσης της διαθέσιμης επιφάνειας του τοίχου λόγω του πλαισίου.

Με αυτόν τον τρόπο και με τις απλοποιήσεις που υιοθετήθηκαν δημιουργήθηκε ένα ρητό σύστημα εξισώσεων οι οποίες μπορούν να λυθούν διαδοχικά σε ένα λογιστικό φύλλο με την προϋπόθεση ότι είναι γνωστή η παροχή αέρα μέσα στο διάκενο. Η βασική ιδέα είναι να λαμβάνεται αυτή η παροχή συναρτήσει βασικών χαρακτηριστικών της γεωμετρίας και των ιδιοτήτων του τοίχου Trombe από ένα μοντέλο ισοζυγίου ενέργειας που ανέπτυξαν οι συγγραφείς [12] το οποίο επιλύει ταυτόχρονα ένα πεπλεγμένο σύστημα εξισώσεων με ωριαίο βήμα για αντιπροσωπευτικές μέρες του εξεταζόμενου μήνα. Η τροποποίηση που έγινε σε αυτό το μοντέλο αφορά τη θερμοκρασία εισόδου του αέρα στο διάκενο η οποία λαμβάνεται ίση με την εξωτερική θερμοκρασία.

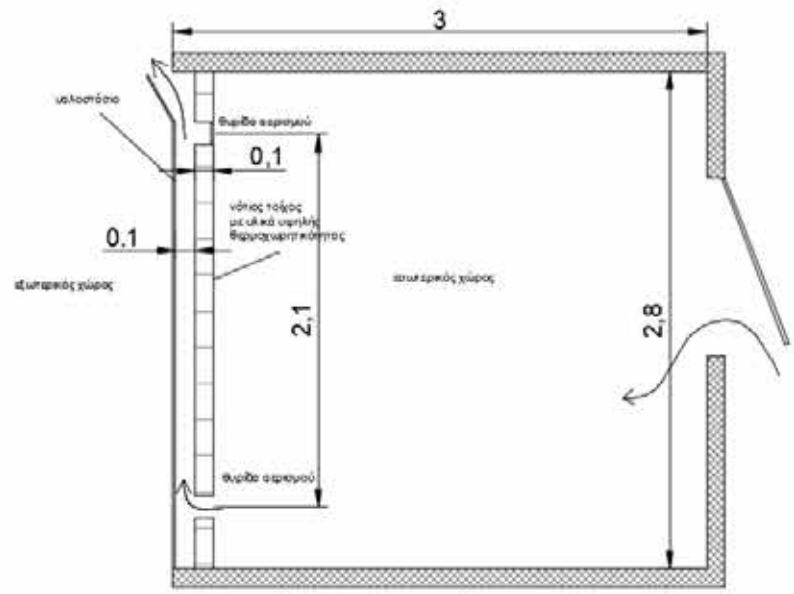
3. ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Το μοντέλο που αναπτύχθηκε χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της απόδοσης ενός τοίχου Trombe ως ηλιακής καμινάδας με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά. Ο τοίχος θεωρείται ότι τοποθετείται στο νότιο τοίχο ενός δωματίου μήκους 3m και πλάτους 2.8 m και ύψους 2.8 m το οποίο είναι κατασκευασμένο από πάνελ πολυουρεθάνης πάχους 9cm. Το ύψος του τοίχου Trombe δηλ. η απόσταση ανάμεσα στα ανοίγματα αερισμού του τοίχου Trombe είναι 2.1 m ενώ το πλάτος του τοίχου είναι 2.6 m. Η απόσταση ανάμεσα στο υαλοστάσιο και τον τοίχο απορρόφησης είναι 10 cm. Το κάλυμμα αποτελείται από υαλοστάσιο 4-15-5 solar glass. Ο τοίχος απορρόφησης έχει πάχος 10 cm και είναι κατασκευασμένος από τούβλα χωρίς κάποια μόνωση. Η θερμοκρασία σχεδιασμού είναι 26 ^{o}C και το δωμάτιο θεωρείται ότι είναι τοποθετημένο στην Κεντρική Ελλάδα και συγκεκριμένα στο Βελεστίνο (χρησιμοποιούνται κλιματικά δεδομένα από την πιο κοντινή περιοχή δηλ. Αγχίαλο). Στον ακόλουθο πίνακα 1 δίνονται οι οπτικές και θερμικές ιδιότητες του καλύμματος και του τοίχου απορρόφησης, ενώ στο σχήμα 1 δίνονται η τομή και η όψη του εξεταζόμενου παθητικού συστήματος σε κατάσταση λειτουργίας ως ηλιακής καμινάδας. Τα ανοίγματα αερισμού είναι 7 οπές άνω και 7 οπές κάτω διαμέτρου 12.4 cm.

Πίνακας 1. Θερμοφυσικές και οπτικές ιδιότητες

Στοιχείο	Ιδιότητες		
Αέρας	Θερμική αγωγιμότητα, k [W/mK]	Ειδική θερμοχωρητικότητα, Cp [J/KgK]	Πυκνότητα, ρ [kg/m^3]
	0.0242	1006	1.225
Τοίχος απορρόφησης - αποθήκευσης	Θερμική αγωγιμότητα, k [W/mK]	Ειδική θερμοχωρητικότητα, Cp [J/KgK]	Πυκνότητα, ρ [kg/m^3]
	0.64	1000	7900
	Απορροφητικότητα, a_w	Συντελεστής εκπομπής, e_w	
	97%	0.97	

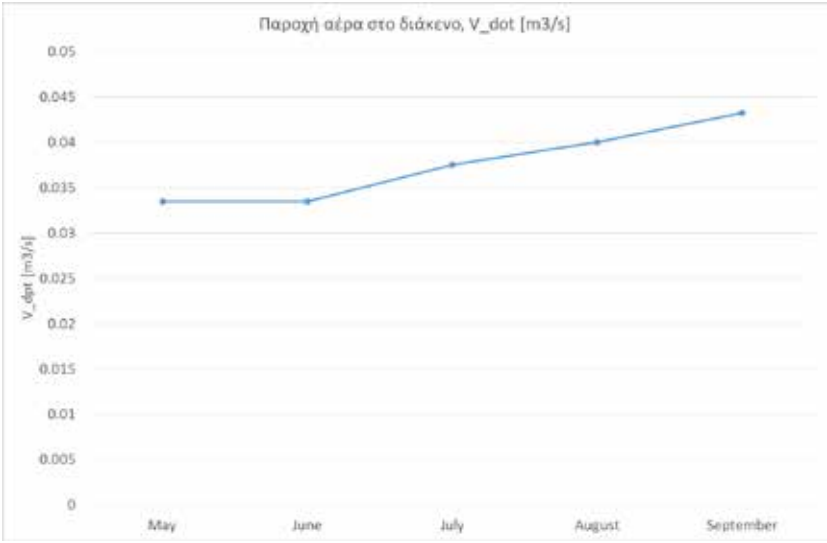
Υαλοστάσιο	Θερμοπερατότητα, Ug [W/m^{2}K]	Συντελεστής ηλιακών κερδών g_{gl}	Συντελεστής εκπομπής εσωτερικής/εξωτερικής επιφάνειας, $\varepsilon_g/\varepsilon_{ge}$
	1.9	0.6	0.1/0.8



Σχήμα 1. Τομή του τοίχου Trombe

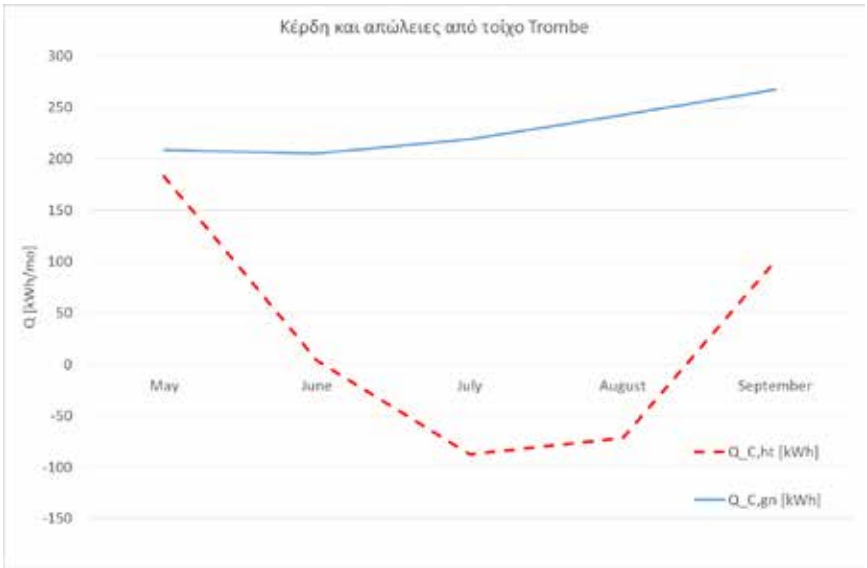
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο Σχήμα 2 δίνεται η μέση ημερήσια παροχή αέρα μέσα στο διάκενο όπως έχει υπολογιστεί ως μέση ημερήσια τιμή για ενδεικτική μέρα του μήνα με το μοντέλο ενεργειακού ισοζυγίου που περιγράφεται στο [12] και θεωρώντας τη θερμοκρασία του δωματίου κάθε φορά ίση με τη θερμοκρασία του εξωτερικού περιβάλλοντος όπως έχει υπολογιστεί για τους εξεταζόμενους θερινούς μήνες για λειτουργία του τοίχου Trombe ως ηλιακή καμινάδα.



Σχήμα 2. Μέση ημερήσια παροχή αέρα στο διάκενο

Στο Σχήμα 3 δίνονται: α) τα θερμικά ηλιακά κέρδη από τον τοίχο Trombe, $Q_{C,gn}$ [kWh/mo] κατά τη διάρκεια του εξεταζόμενου μήνα, τα οποία αντιστοιχούν στα ψυκτικά φορτία διαμέσου του τοίχου και β) οι απώλειες (κελύφους και αερισμού) από τον τοίχο Trombe οι οποίες αντιστοιχούν στη συνεισφορά δροσισμού, $Q_{C,ht}$ [kWh/mo] για τους εξεταζόμενους θερινούς μήνες.

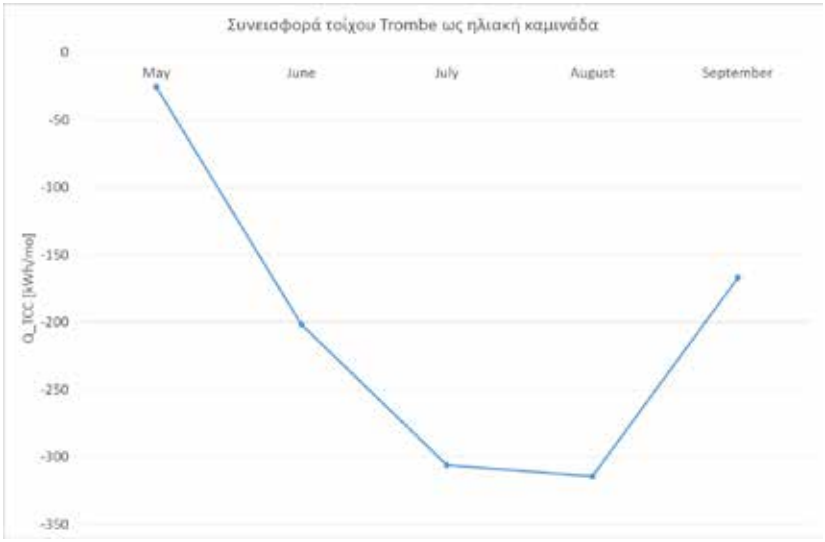


Σχήμα 3. Ψυκτικά φορτία και συνεισφορά δροσισμού από τον Τοίχο Trombe

Από το σχήμα 3 προκύπτει ότι κατά τους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο πέραν των ηλιακών κερδών μέσω του τοίχου Trombe, τα οποία προστίθενται στα ψυκτικά φορτία του εξυπηρετούμενου κτηρίου, και οι 'απώλειες' μέσω του τοίχου Trombe, οι οποίες θα έπρεπε να συνεισφέρουν στο δροσισμό, είναι

αρνητικές. Αυτό συμβαίνει διότι η εξωτερική θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία σχεδιασμού του δωματίου. Συνεπώς κατά τους μήνες αυτούς ο τοίχος Trombe δε μπορεί να εξυπηρετήσει το χώρο ως ηλιακή καμινάδα και θα πρέπει να είναι εκτός λειτουργίας και πλήρως σκιασμένος.

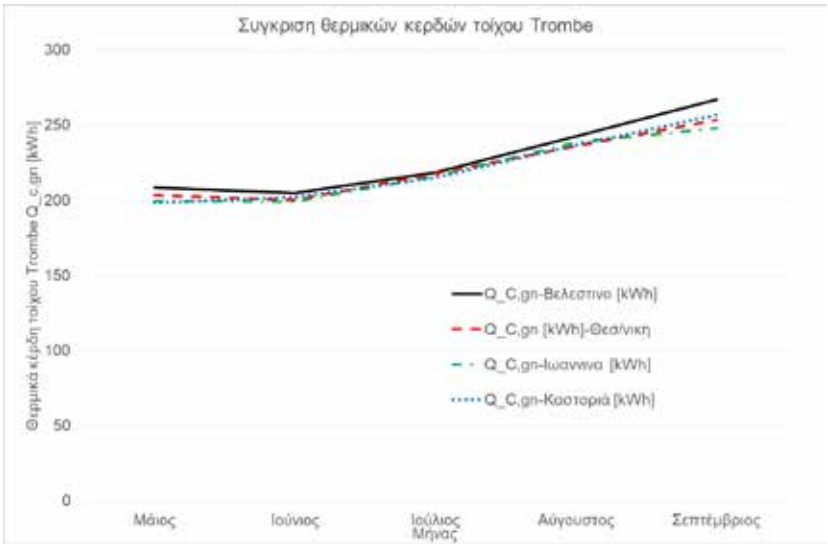
Στο Σχήμα 4 δίνεται η συνολική προσφορά σε κατανάλωση ενέργειας για κάλυψη ψυκτικών φορτίων του τοίχου Trombe κατά τη θερινή του λειτουργία στη διάρκεια ενός μήνα, Q_{TCC} [kWh/mo].



Σχήμα 4. Συνολική προσφορά κάλυψης ψυκτικών φορτίων από τον τοίχο Trombe

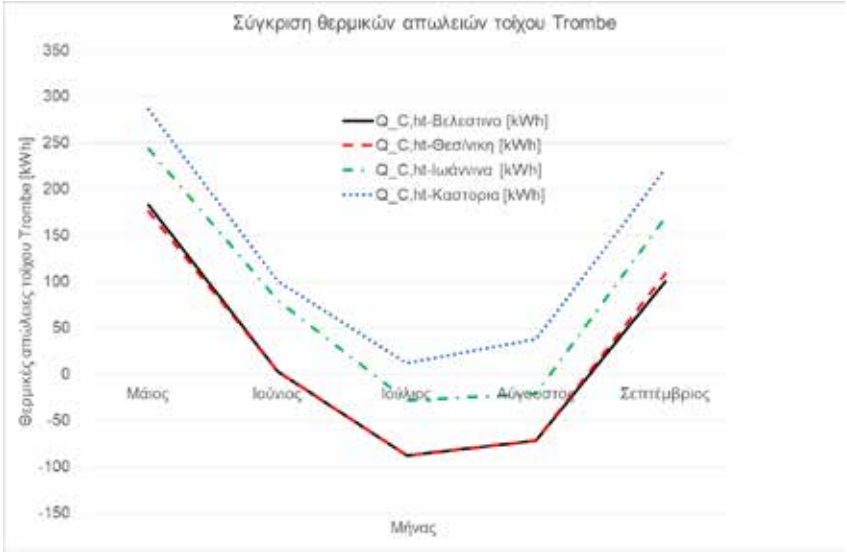
Από το Σχήμα 4 προκύπτει ότι η συνολική συνεισφορά του τοίχου Trombe ως στοιχείο παθητικού δροσισμού δεν είναι θετική σε κανέναν εξεταζόμενο μήνα. Αυτό σημαίνει ότι η αύξηση των ψυκτικών φορτίων που υπάρχει στο δωμάτιο λόγω της λειτουργίας του τοίχου Trombe είναι πάντα μεγαλύτερη από το δροσισμό λόγω αερισμού. Από το Σχήμα 3 ωστόσο προκύπτει ότι συνεισφορά στην κάλυψη ψυκτικών φορτίων υπάρχει και τους μήνες Μάιο, Ιούνιο και Σεπτέμβριο. Αυτό σημαίνει ότι κατά τη διάρκεια αυτών των μηνών κάποιες ώρες της ημέρας ο τοίχος Trombe μπορεί να συνεισφέρει στο δροσισμό του κτηρίου όμως άλλες ώρες, καθώς και συνολικά, υπερτερούν τα ηλιακά κέρδη τα οποία αυξάνουν τα ψυκτικά φορτία καθιστώντας τη λειτουργία στο σύνολο του μήνα αρνητική. Συνεπώς κατά τους μήνες αυτούς ο τοίχος Trombe θα μπορούσε να λειτουργήσει μόνο με κάποιο σύστημα αυτομάτου ελέγχου. Μια άλλη τροποποίηση θα μπορούσε να είναι η προσθήκη μόνωσης στον τοίχο ώστε η θερμοκρασία της επιφάνειας του τοίχου που είναι σε επαφή με το δωμάτιο να παραμένει σχετικά χαμηλή.

Στη συνέχεια το μοντέλο εφαρμόστηκε στον ίδιο τοίχο Trombe σε άλλες τρείς πόλεις (Θεσσαλονίκη, Ιωάννινα και Καστοριά) διατηρώντας όμως την παροχή αέρα στο διάκενο ίση με αυτή που είχε υπολογιστεί για τη λειτουργεία στο Βελεστίνο. Στο σχήμα 5 παρουσιάζεται συγκριτικά τα θερμικά ηλιακά κέρδη από τον τοίχο Trombe, $Q_{C,gn}$ [kWh/mo] κατά τη διάρκεια του εξεταζόμενου μήνα, τα οποία αντιστοιχούν στα ψυκτικά φορτία διαμέσου του τοίχου. Από τη σύγκριση προκύπτουν πολύ μικρές διαφορές με μικρή μείωση της επιβάρυνσης κατά τους μήνες Μάιο και Σεπτέμβριο, ενώ κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών οι συμπεριφορές σχεδόν ταυτίζονται.



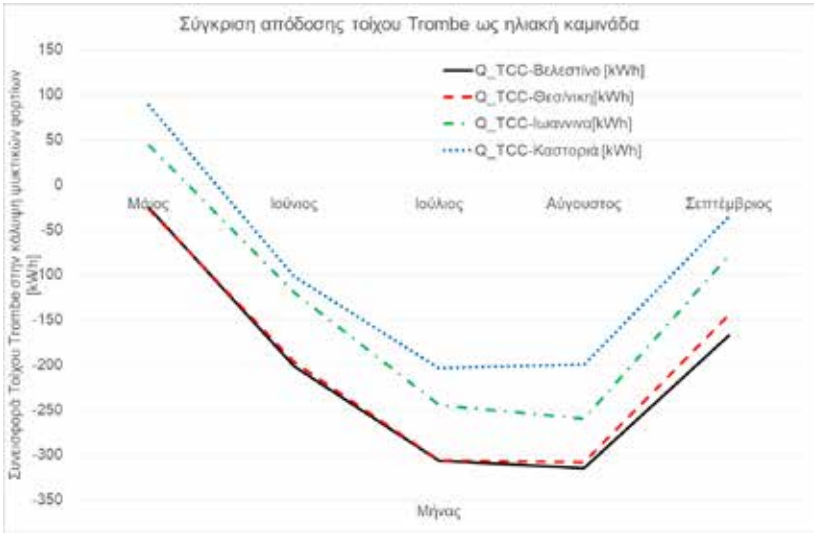
Σχήμα 5. Θερμικά ηλιακά κέρδη από τον τοίχο Trombe σε διαφορετικές πόλεις

Στο Σχήμα 6 παρουσιάζονται συγκριτικά οι απώλειες (κελύφους και αερισμού) από τον τοίχο Trombe οι οποίες αντιστοιχούν στη συνεισφορά δροσισμού, $Q_{C,ht}$ [kWh/mo] για τους εξεταζόμενους θερινούς μήνες. Οι απώλειες φαίνεται να επηρεάζονται περισσότερο και από την ακτινοβολία και από τη θερμοκρασία. Η Θεσ/νικη με θερμοκρασίες και ηλιακή ακτινοβολίας πολύ κοντά στα κλιματικά στοιχεία του Βελεστίνου (Αγχίαλος) σχεδόν ταυτίζονται. Όσο όμως οι θερμοκρασίες μειώνονται η συνεισφορά σε δροσισμό μεγαλώνει (Ιωάννινα), ενώ στην Καστοριά η συνεισφορά παραμένει θετική ακόμα και κατά τους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο.



Σχήμα 6. Θερμικές απώλειες από τον τοίχο Trombe σε διαφορετικές πόλεις

Τέλος στο Σχήμα 7 δίνεται η συνολική προσφορά σε κατανάλωση ενέργειας για κάλυψη ψυκτικών φορτίων του τοίχου Trombe κατά τη θερινή του λειτουργία στη διάρκεια ενός μήνα, Q_{TCC} [kWh/mo]. Στην τελική απόδοση του τοίχου Trombe η Θες/νικη σχεδόν ταυτίζεται με την Αγχίαλο με μικρές διαφορές το Σεπτέμβριο, όμως τα Ιωάννινα και η Καστοριά σαφώς διαφέρουν. Σε αυτές τις πόλεις κατά το Μαίο, και στην Καστοριά και κατά το Σεπτέμβριο η συνολική συνεισφορά του Trombe είναι θετική σε όλο το μήνα χωρίς να υπάρχει απαίτηση κάποιου αυτοματισμού.



Σχήμα 7. Σύγκριση απόδοσης τοίχου Trombe ως ηλιακή καμινάδα σε διαφορετικές πόλεις

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όταν ο εξεταζόμενος τοίχος Trombe λειτουργεί ως ηλιακή καμινάδα, στην εξεταζόμενη θέση της Κεντρικής Ελλάδας, δε μπορεί να συνεισφέρει θετικά στην κάλυψη των ψυκτικών φορτίων σε κανένα από τους εξεταζόμενους μήνες. Αυτό συμβαίνει διότι ακόμα και τους μήνες Μάιο, Ιούνιο και Σεπτέμβριο, ο δροσισμός μέσω αερισμού δεν είναι αρκετός για να υπερβεί τα ψυκτικά φορτία που προσθέτουν στο δωμάτιο οι υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στην επιφάνεια του τοίχου Trombe που είναι σε επαφή με το δωμάτιο. Ωστόσο αυτό δε συμβαίνει σε όλη τη διάρκεια της ημέρας. Κατά τη διάρκεια αυτών των μηνών θα πρέπει να λειτουργήσει με κάποιο σύστημα αυτοματισμού το οποίο θα κλείνει τα ανοίγματα αερισμού και θα σκιάζει αυτόματα τον τοίχο Trombe κατά τα χρονικά διαστήματα κατά τα οποία τα θερμικά ηλιακά κέρδη μέσω αυτού υπερτερούν των απωλειών (κυρίως μέσω αερισμού). Επιπλέον θα μπορούσε να προστεθεί κάποια μόνωση ώστε να διατηρούνται χαμηλές θερμοκρασίες της επιφάνειας του τοίχου του δωματίου. Τέλος κατά τους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο ο τοίχος θα πρέπει να μένει πλήρως σκιασμένος και τα ανοίγματα αερισμού κλειστά δεδομένου ότι η εξωτερική θερμοκρασία είναι υψηλότερη από τη θερμοκρασία σχεδιασμού και έτσι ο αερισμός δε μπορεί να προσφέρει στη μείωση των ψυκτικών φορτίων.

Ωστόσο αν ο ίδιος τοίχος Trombe τοποθετηθεί σε περιοχές με χαμηλότερη ηλιακή ακτινοβολία και κυρίως με χαμηλότερη εξωτερική θερμοκρασία τότε είναι δυνατό να έχει συνολικά θετική προσφορά στο δροσισμό του χώρου ακόμα και χωρίς αυτοματισμούς κατά τους μήνες Μάιο και Σεπτέμβριο (Ιωάννινα και Καστοριά), ενώ στην Καστοριά μπορεί να λειτουργήσει με αυτοματισμούς ακόμα και κατά τους καθαρά καλοκαιρινούς μήνες Ιούνιο – Αύγουστο.

Το παραπάνω συμπέρασμα προέκυψε από ένα ρητό μοντέλο, του οποίου οι εξισώσεις μπορούν να λυθούν διαδοχικά σε ένα λογιστικό φύλλο, με την προϋπόθεση ότι μπορεί να γίνει κάποια εκτίμηση της παροχής αέρα μέσα στο διάκενο. Συνεπώς το μοντέλο που παρουσιάστηκε μπορεί να χρησιμοποιηθεί ακόμα και στα πρώτα στάδια σχεδιασμού του τοίχου Trombe.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία έχει υλοποιηθεί στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος ΕΛΙΔΕΚ - Αριθμητική και πειραματική διερεύνηση της απόδοσης ηλιακών αεροθερμικών συστημάτων για κτήρια μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας - NUMEXSAH, το οποίο χρηματοδοτείται από τη ΓΓΕΤ.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] EN ISO 13790, 2008, Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling.

[2] Ruis-Pardo, A., Alvarez Dominguez, S.A., Fernadez, J.A.S., 2010, “Revision of the Trombe wall calculation method proposed by UNE EN-ISO 13790”, Energy and Buildings, 42, pp.763–773.

[3] Duffin, R.J. and Knowless, G., 1985, “A simple design method for a Trombe wall”, Solar Energy, 34(1), pp. 69-72.

[4] Ong, K.S., 2003, “A mathematical model of a solar chimney”, Renewable Energy, 28(7), pp. 1047-1060.

[5] Balocco, C., 2002, “A simple model to study ventilated facades energy performance”, Energy and Building, 34, pp. 469-475.

[6] Jaber, S. and Ajib, S., 2011, “Optimum design of Trombe wall system in Mediterranean region”, Solar Energy, 85, pp. 1891–1898.

[7] Shen, J., Lassue, S., Zalewski, L., and Huang, D., 2007, “Numerical study on thermal behavior of classical or composite Trombe solar walls”, Energy and Buildings, 39, pp. 962–974.

[8] Stazi, F., Mastrucci, A. and di Perna, C., 2011, “The behaviour of solar walls in residential buildings with different insulation levels: an experimental and numerical study”, Energy and Buildings, 47, pp. 217-229.

[9] Bajc, T., Todorovic, M.N and Svorcan, J., 2015, “CFD analyses for passive house with Trombe wall and impact to energy demand”, Energy and Buildings, 98, pp. 39–44.

[10] Mokheimer, E.M.A., Raghib Shakeel, M.R. and Al-Sadah, J., 2017, “A novel design of solar chimney for cooling load reduction and other applications in buildings”, Energy and Buildings, 153, pp. 219–230.

[11] Serageldin, A.A., Abdelrahman, A.K. and Ookawara, S., 2018, “Parametric study and optimization of a solar chimney passive ventilation system coupled with an earth-to-air heat exchanger”, Sustainable Energy Technologies and Assessments, 30, pp.263–278.

[12] Baxevanou, C., Fidaros, D. and Tsangrassoulis, A., 2019, “An energy balance model for passive solar systems operation, Journal of Physics: Conference Series”, 1343, 12130.

[13] EN ISO 6946, 2007, Building components and building elements - Thermal resistance and thermal transmittance – Calculation method.

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΥΑΛΟΠΙΝΑΚΩΝ ΣΤΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΧΩΡΟΥ ΓΡΑΦΕΙΩΝ

Θ. Μάντζαρης[1*] Α. Τσαγκρασούλης[2], Θ. Καρακασίδης[3,4]

[1*]Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας,
[2]Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Π.Θ,
[3]Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Π.Θ.
[4]Τμήμα Φυσικής, Σχολή Θετικών Επιστημών, Π.Θ.

e-mail: theofanismantzaris@gmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η χρήση υαλοπινάκων στις σύγχρονες κτιριακές δομές εξυπηρετεί διπλό ρόλο, αφού αφενός μεν επιτρέπει την οπτική σύνδεση των χρηστών με το εξωτερικό περιβάλλον, αφετέρου δε δύναται να επηρεάσει σημαντικά το ενεργειακό ισοζύγιο του κτιρίου. Ιδιαίτερης σημασίας είναι η χρήση STPV(Semi Transparent PV) υαλοπινάκων, δηλαδή ημιδιαφανών φωτοβολταϊκών υαλοπινάκων που μπορούν να παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα. Η παρούσα ανάλυση που χωρίσθηκε σε 2 μέρη, πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό “DesignBuilder”, ενώ η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τους φωτοβολταϊκούς υαλοπίνακες με το λογισμικό RETScreen. Αρχικά, διερευνήθηκε η συνεισφορά ενός διπλού υαλοπίνακα φωτοβολταϊκής τεχνολογίας στο ενεργειακό ισοζύγιο ενός χώρου γραφείων στην Αθήνα. Για το σκοπό αυτό, μελετήθηκε το ενεργειακό ισοζύγιο του κτιρίου για διάφορες αναλογίες ανοιγμάτων(W.W.R, Window to Wall Ratio) με διαφορετικές διαπερατότητες υαλοπινάκων και Νότιου προσανατολισμού. Ο σκοπός είναι η αναζήτηση των χαρακτηριστικών του υαλοπίνακα που τελικά θα οδηγεί στη χαμηλότερη πρωτογενή κατανάλωση ενέργειας και στο αποδοτικότερο ετήσιο ποσοστό εξοικονόμησης. Στο δεύτερο στάδιο πραγματοποιήθηκε η ίδια ανάλυση και για τις 4 Κλιματικές Ζώνες του K.Ev.A.K. Σκοπός ήταν να διερευνηθεί περαιτέρω η σχέση ανοίγματος υαλοπίνακα (W.W.R), διαπερατότητας (visible transmittance) και συντελεστή ηλιακών κερδών (g-value) με τις απαιτήσεις σε θέρμανση, ψύξη και φωτισμό του STPV υαλοπίνακα του χώρου γραφείου μελέτης. Η παρούσα ανάλυση κατέληξε αρχικά στο συμπέρασμα ότι ένας φωτοβολταϊκής τεχνολογίας υαλοπίνακας μπορεί να οδηγήσει για Νότιο προσανατολισμό και σχετικώς μεγάλες τιμές ανοιγμάτων, για την Αθήνα, σε εξοικονόμηση στο ενεργειακό ισοζύγιο από 19% έως 31% σε σχέση με ένα σενάριο αναφοράς(χρήση συμβατικού υαλοπίνακα). Από τη Β φάση βρέθηκε ότι αντίστοιχα ποσοστά εξοικονόμησης λαμβάνονται και για τις υπόλοιπες 3 Κλιματικές Ζώνες.

Λέξεις Κλειδιά
Φωτοβολταϊκός υαλοπίνακας, ενεργειακό ισοζύγιο, θερμοπερατότητα(u-vale), θερμικά κέρδη(g-value), διαπερατότητα, W.W.R, εξοικονόμηση ενέργειας.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σήμερα, η διαρκώς αυξανόμενη ενεργειακή κρίση, καθιστά επιτακτική την ανάγκη ενός ορθολογικού ενεργειακού σχεδιασμού των κτιριακών μας δομών. Ο σωστός ενεργειακός σχεδιασμός, στοχεύει αφενός μεν στην ελάττωση της καταναλισκόμενης ενέργειας μέσω της μείωσης των απωλειών και αφετέρου στην αξιοποίηση της ηλιακής προσόδου προς κάλυψη μέρους ή του συνόλου των ενεργειακών απαιτήσεων του. Σε Εθνικό επίπεδο, ο παραπάνω στόχος εκφράζεται αναλυτικά στον Κ.Εν.Α.Κ **[1]**, ενώ και η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει εκδώσει ειδικές Οδηγίες προς συμμόρφωση μεταξύ των κρατών-μελών της, ως προς τους ενεργειακούς στόχους **[2-3]**. Στη παρούσα μελέτη, διερευνάται η συμβολή στο ενεργειακό ισοζύγιο, ημιδιαφανών φωτοβολταϊκών υαλοπινάκων (STPV, Semi Transparent PV), για διάφορα ποσοστά επί της πρόσοψης ανοιγμάτων (W.W.R) και διαπερατοτήτων για τις 4 Κλιματικές Ζώνες βάσει Κ.Εν.Α.Κ. Στο ισοζύγιο προσμετράται και η παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος των φωτοβολταϊκών υαλοπινάκων. Η χρήση STPV υαλοπινάκων αποτελεί εδώ και αρκετά χρόνια αντικείμενο ενδελεχούς μελέτης από ερευνητικές ομάδες παγκοσμίως, κυρίως όσον αφορά την επίδοση τους έναντι των συμβατικών υαλοπινάκων. Οι Miyazaki, Akisawa και Kashiwagi **[4]** μελετώντας ένα χώρο γραφείου στο Τόκυο βρήκαν ότι για ένα άνοιγμα υαλοπίνακα WWR=50% και με μία διαπερατότητα υαλοπίνακα 40% όταν συνδυαστούν με ένα σύστημα ελέγχου του συστήματος τεχνητού φωτισμού μπορούν να οδηγήσουν σε έως και 55% μείωση στην κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος συγκριτικά με έναν συμβατικό μονό υαλοπίνακα χωρίς σύστημα ελέγχου του φωτισμού. Οι Zhang et al.**[5]** μάλιστα, μελετώντας την επίδραση στο ενεργειακό ισοζύγιο ενός κτιρίου στο Χονγκ Κονγκ μεταξύ συμβατικών διπλών ενεργειακών υαλοπινάκων και ημιδιαφανών φωτοβολταϊκών υαλοπινάκων(STPV) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι ένας STPV υαλοπίνακας μπορεί να μειώσει το θερμικό κέρδος και άρα την ανάγκη σε φορτία για ψύξη κατά 38,9% συγκριτικά με τους συμβατικούς διπλούς ενεργειακούς υαλοπίνακες. Η βασικότερη κατηγορία STPV υαλοπινάκων αφορά τους Άμορφου πυριτίου (a-Si) υαλοπίνακες, όπως αυτούς στους οποίους επικεντρώθηκε η παρούσα μελέτη. Οι Zhu et al.**[6]** μελετώντας ένα κτίριο γραφείων σε ψυχρή κλιματική ζώνη της Κίνας, βρήκαν ότι το ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας ήταν το υψηλότερο όταν το άνοιγμα με φωτοβολταϊκό υαλοπίνακα ήταν με Νότιο προσανατολισμό, και το χαμηλότερο όταν ήταν προσανατολισμένο Ανατολικά. Μάλιστα, βρέθηκε ότι η σειρά σπουδαιότητας από τους τρεις παράγοντες επηρεασμού της εξοικονόμησης ενέργειας, ήταν: ο προσανατολισμός, η τιμή του συντελεστή ηλιακών κερδών (g-value/shgc) και τέλος η διαπερατότητα του. Μία έτερη κατηγορία STPV υαλοπίνακα είναι η τεχνολογίας Κρυσταλλικού τύπου (c-Si). Σύμφωνα με την Polysolar **[7]**, τα c-Si έχουν δραματικά μειωμένες επιδόσεις σε κλίματα με υψηλές θερμοκρασίες και ως εκ τούτου η χρήση τους περιορίζεται έναντι των a-Si. Μάλιστα, η διαπερατότητα τους τα καθιστά εφαρμόσιμα μόνο για το κέλυφος του κτιρίου. Οι υαλοπίνακες Τελλουριδικού Καδμίου (Cd-Te) αποτελούν μία ακόμη κατηγορία STPV υαλοπινάκων. Μάλιστα, οι Meng et al **[8]** μελετώντας έναν STPV υαλοπίνακα τεχνολογίας Cd-Te σε σχέση με έναν a-Si και έναν συμβατικό υαλοπίνακα βρήκαν ότι η ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας ήταν η μεγαλύτερη κατά 15,3% και 19,6% αντιστοίχως. Ωστόσο, το υψηλό τους κόστος όσο και η ελλιπής μέχρι τώρα έρευνα από την επιστημονική κοινότητα τους κάνει λιγότερο προσιτούς σε σχέση με τους a-Si. Αξίζει να σημειωθεί πως μία σχετικώς νέα τεχνολογία, αφορά τους διαφανείς STPV υαλοπίνακες $3^{ης}$ γενιάς τους κοινώς ονομαζόμενους Dye-Sensitized Solar Cells(DSSC). Μελετώντας τον τύπο αυτό οι Cornaro et al. **[9]** οδηγήθηκαν στο συμπέρασμα κατόπιν τρίμηνης μελέτης επί του πεδίου ότι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας τον DSSC υπερτερούσε έναντι των a-Si και c-Si όταν βρίσκονται σε κατακόρυφη θέση(90°) και Νότιο προσανατολισμό επιτυγχάνοντας εξοικονόμηση ενέργειας 89,3% έναντι 77,5% και 88,5% αντιστοίχως σε σχέση με ένα συμβατικό υαλοπίνακα. Μάλιστα, βρέθηκε και ότι η βέλτιστη συγκριτικά απόδοση του DSSC έναντι των έτερων ανταγωνιστών του εμφανιζόταν τον Αύγουστο, δείχνοντας την καλύτερη απόδοση του στις υψηλές τιμές ηλιακής ακτινοβολίας και εμφανίζοντας τα μικρότερα ποσοστά ευαισθησίας στις υψηλές θερμοκρασίες. Στη χώρα μας, με το Μεσογειακό Κλίμα και τις υψηλές τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας, η μελέτη και σύγκριση STPV υαλοπινάκων με τους συμβατικούς υαλοπίνακες προς χρήση στις κτιριακές δομές μας κρίνεται επιβεβλημένη. Στις σημαντικότερες αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν, οι Olivieri et al **[10]** υπολόγισαν ότι σε ένα χώρο γραφείων στη

Μαδρίτη με μικρά ανοίγματα προς το Νότο (Window to Wall Ratio, WWR≤22%) η εξοικονόμηση ενέργειας είναι πολύ μικρή σε σχέση με με έναν διπλό συμβατικό υαλοπίνακα και έτσι η χρήση ενός STPV υαλοπίνακα καθίσταται μη πρόσφορη. Ωστόσο, για μεγάλα ανοίγματα βρέθηκαν αρκετά υψηλές τιμές εξοικονόμησης ενέργειας από 18%(WWR=33%) έως 59%(WWR=88%). Στην ίδια μάλιστα μελέτη, εξετάζοντας τη διαπερατότητα μεταξύ των STPV υαλοπινάκων βρήκαν ότι για σχετικά μικρά ανοίγματα(WWR≤33%) δεν εμφάνιζαν μεγάλες διαφορές ως προς την ενεργειακή απόδοση ενώ για μεγαλύτερες τιμές ανοιγμάτων (33%<WWR<66%) ο παράγοντας της διαπερατότητας επηρέαζε περισσότερο, δείχνοντας εν τέλει πως ο STPV με διαπερατότητα 16% είχε 25% μεγαλύτερη ενεργειακή εξοικονόμηση σε σχέση με αυτόν με διαπερατότητα 32%. Βρέθηκε τέλος ότι για ανοίγματα με WWR>66% ο λιγότερο διαπερατός υαλοπίνακας (10%) οδηγούσε σε μικρότερη ενεργειακή κατανάλωση ως και 68% συγκριτικά με τον STPV ίδιας τεχνολογίας αλλά με διαπερατότητα 32%. Οι Cornaro et al. **[11]** μελέτησαν για 3 πόλεις, αντιπροσωπευτικές για 3 κλιματικές ζώνες της Ιταλίας, την ενεργειακή εξοικονόμηση που παρείχαν 4 STPV υαλοπίνακες (2 a-Si & 2 DSSC) σε σχέση με έναν συμβατικό διπλό υαλοπίνακα σε χώρο γραφείου. Η μελέτη χωρίστηκε σε 2 φάσεις με την πρώτη να σχετίζεται με την επιλογή των χαρακτηριστικών ενός κτιρίου ορισμένο σύμφωνα με τον ιταλικό κτιριοδομικό κανονισμό(τιμές θερμοπερατότητας, u-value) χρησιμοποιώντας έναν συμβατικού τύπου υαλοπίνακα και έναν εκ των 4 STPVs για τις 3 πόλεις μελέτης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι σε κάθε περίπτωση την καλύτερη ενεργειακή συμπεριφορά παρουσίαζαν οι δύο(2) DSSC ακολουθούμενοι από τους δύο(2) a-Si και τέλος το συμβατικό διπλό υαλοπίνακα τόσο για Βόρειο όσο και Νότιο προσανατολισμό. Στη συνέχεια κατά τη δεύτερη φάση, ο καλύτερος ενεργειακά υαλοπίνακας DSSC, χρησιμοποιήθηκε τόσο στο κτίριο αναφοράς όσο και σε ένα κτίριο-μοντέλο σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας (NZEB). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι σε κάθε πόλη και προσανατολισμό ο STPV υαλοπίνακας στο NZEB κτίριο εμφάνιζε το καλύτερο ενεργειακό ισοζύγιο με μία εξοικονόμηση ενέργειας εν συγκρίσει με το συμβατικό υαλοπίνακα έως και 32%, 14% και 2.55% σε Ρώμη, Παλέρμο και Τρέντο αντιστοίχως. Δεδομένου λοιπόν του μεγάλου οφέλους που έχουν στο ενεργειακό ισοζύγιο οι STPV υαλοπίνακες, περαιτέρω μελέτες και αναλύσεις πρέπει να πραγματοποιηθούν ώστε σταδιακά με την τεχνολογική εξέλιξη τους, αλλά και το μειωμένο κόστος τους λόγω της αυξανομένης ζήτησης και παραγωγής να μπορέσουν να αποτελέσουν το μέλλον στον κλάδο της ενεργειακής δόμησης. Η παρούσα μελέτη εστίασε στον Ελλαδικό χώρο καταδεικνύοντας τη συνεισφορά στο ενεργειακό ισοζύγιο ενός χώρου γραφείου από τη χρήση STPV υαλοπινάκων και την προκύπτουσα εξοικονόμηση ενέργειας από τη χρήση τους, για τις 4 Κλιματικές Ζώνες του Κ.Ενε.Α.Κ. Η παρούσα ανάλυση εστίασε σε STPV υαλοπίνακες με πολύ μικρότερες τιμές συντελεστή ηλιακών κερδών (g-value) από αυτούς που έχουν ήδη εξετασθεί από άλλους ερευνητές, οδηγώντας σε ενδιαφέροντα αποτελέσματα όσον αφορά στις καταναλώσεις για τη ψύξη του χώρου μελέτης. Επιπρόσθετα, το εύρος των λόγων W.W.R ήταν μεγαλύτερο από τις τιμές που έχουν εξετασθεί στην υπάρχουσα βιβλιογραφία.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1 Γενική διάταξη Μελέτης

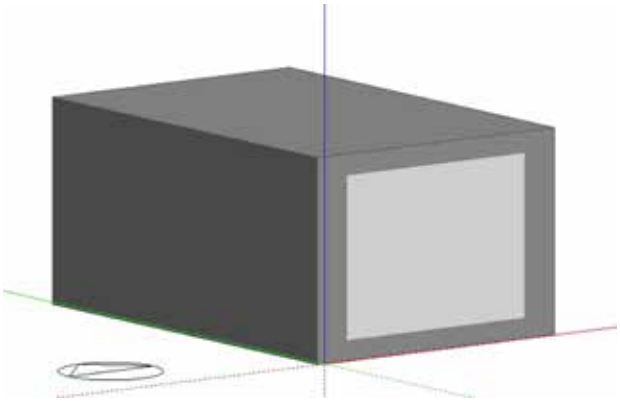
Η παρούσα μελέτη χωρίσθηκε σε δύο βασικές ενότητες, με τη δεύτερη να αποτελεί άμεση συνέχεια της πρώτης.

Αρχικά, στην Α' Φάση πραγματοποιήθηκε μελέτη του ενεργειακού ισοζυγίου για ένα χώρο γραφείου στην Αθήνα, για διάφορα ποσοστά ανοιγμάτων επί της πρόσοψης, με Νότιο προσανατολισμό και χρήση STPV υαλοπινάκων τεχνολογίας thin film διαφορετικής διαπερατότητας κάθε φορά. Η όλη διαδικασία αποσκοπούσε στην εύρεση του υαλοπίνακα αυτού-τα χαρακτηριστικά του οποίου θα αναλυθούν λεπτομερώς στη συνέχεια-ο οποίος θα εμφανίζει τη μικρότερη ενεργειακή κατανάλωση. Έπειτα, στη Β' Φάση η μελέτη διαβαθμίστηκε μελετώντας επιπλέον 3 αντιπροσωπευτικές πόλεις της Ελλάδος μία για κάθε μία από τις 4 Κλιματικές Ζώνες της Ελλάδος. Έτσι, μελετήθηκαν πέρα της Αθήνας(Β' Κλιματική Ζώνη), η Θεσσαλονίκη(Γ' Κλιματική Ζώνη), το Ηράκλειο(Α' Κλιματική Ζώνη) και η Καστοριά(Δ'

Κλιματική Ζώνη). Η μελέτη στη Β' Φάση έλαβε και αυτή τιμές για Νότιο προσανατολισμό και για διάφορα ποσοστά ανοιγμάτων WWR.

2.2 Χαρακτηριστικά Κτιρίου Αναφοράς

Το κτίριο αναφοράς για το οποίο πραγματοποιήθηκε η παρούσα ανάλυση είναι-όπως φαίνεται στην Εικόνα. 1- ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο τυπικό-γραφείο διαστάσεων μήκους, πλάτους και ύψους 4m, 6m και 3m αντίστοιχα. Με συνολικό εμβαδόν $E=24m^2$ (με ωφέλιμο $22,81m^2$) και όγκο $V=72m^3$, το κτίριο-γραφείο μελέτης ορίστηκε βάσει των προτύπων του Κ.Εν.Α.Κ. Συγκεκριμένα, οι τοίχοι του-εκτός της πρόσοψης- ήταν αδιαβατικοί, μη επιτρέποντας την ανταλλαγή θερμότητας με τους γειτονικούς χώρους. Η πρόσοψη, θεωρήθηκε ότι έχει έναν συντελεστή θερμοπερατότητας U-value=0.463 W/m^2*K.



Εικόνα. 1. Τυπικός γραφειακός χώρος για Νότιο προσανατολισμό με ένα τυχαίο άνοιγμα υαλοπίνακα από το λογισμικό DesignBuilder.

Επιπλέον, δε χρησιμοποιήθηκε κανένα είδος σκίασης για το κτιριακό μας μοντέλο. Ο λόγος, είναι η μικρή διαπερατότητα των φωτοβολταϊκών υαλοπινάκων. Οι συνθήκες λειτουργίας του χώρου(κατά την ΤΟΤΕΕ1 του Κ.Εν.Α.Κ [12]) παρουσιάζονται στο παρακάτω Πίνακας 1:

Πίνακας 1. Ορισθείσες Τιμές Κτιρίου Αναφοράς.

Επιθυμητή θερμοκρασία χειμώνα	20°C
Επιθυμητή θερμοκρασία καλοκαιριού	26°C
Εγκατεστημένη ισχύς φωτισμού	15 W/m^2,φθορισμός με σύστημα ρύθμισης της φωτεινής ροής(dimming) με ελάχιστο ποσοστό φωτεινής ροής (min output fraction) ορισμένο στο "0.100" και ελάχιστο ποσοστό ισχύος(min input power fraction) ορισμένο στο "0.150"
Αερισμός	30 m^3/h/άτομο
Διείσδυση Αέρα	0.7ach

2.3 Χαρακτηριστικά Υαλοπίνακα Μελέτης

Για η επιλογή του υαλοπίνακα μελέτης, πραγματοποιήθηκε βάσει συγκεκριμένων κριτηρίων, όπως, να είναι επαρκώς διαφανής, επιτρέποντας τη διέλευση του φυσικού φωτός, θεωρώντας τρεις διαφορετικές διαπερατότητες στο ορατό: υψηλή(high), μέτρια(medium) και χαμηλή διαπερατότητα(low). Οι βασικότερες παράμετροι επιλογής ωστόσο βασίζοντας στις όσο το δυνατόν πιο καλές τιμές για τις θερμοφυσικές του ιδιότητες, όπως:

i) Όσο το δυνατόν πιο μικρή τιμή συντελεστή θερμοπερατότητας (u-value), άρα χαμηλή μεταφορά θερμότητας και συνεπώς καλή μόνωση.
ii) Σχετικώς χαμηλή τιμή συντελεστή θερμικού κέρδους (g-value), κρίνοντας με γνώμονα τη χρήση του στο κλίμα της Ελλάδος.

Φυσικά, τελευταία αλλά και πολύ βασική ιδιότητα, να μας παρέχει ενέργεια λόγω των ενσωματωμένων Φωτοβολταϊκών που αυτός φέρει εκ κατασκευής (thin film-STPV).

Σκοπός ήταν η επιλογή ενός τέτοιου φωτοβολταϊκού υαλοπίνακα ο οποίος να είναι ικανός να παράγει επαρκή ποσότητα ηλεκτρικού ρεύματος, χωρίς ωστόσο να είναι πολύ σκοτεινός, αλλά με επαρκή διαπερατότητα για τη διέλευση του φυσικού φωτός. Σημειώνεται, ότι όσο πιο διαφανείς είναι οι υαλοπίνακες, τόσο το g-value μεγαλώνει, αλλά παράλληλα μικραίνει και η ικανότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Αντίστοιχα, όσο πιο σκούρος είναι ο φωτοβολταϊκός υαλοπίνακας, άρα λειτουργεί σαν σκίαση, τόσο αυξάνεται και η παραγωγή του ηλεκτρικού ρεύματος.

Φυσικά η επιλογή της διαπερατότητας σχετίζεται με το κλίμα της περιοχής με την μικρότερη διαπερατότητα -και συνεπώς μικρό συντελεστή ηλιακών κερδών-να χρησιμοποιείται σε θερμότερες περιοχές.

Στην παρούσα ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν STPV υαλοπινάκων της εταιρείας OnyxSolar **[12].** Οι υαλοπίνακες αυτοί είναι τεχνολογίας άμορφου πυριτίου(a-Si), ενώ για την ανάλυση οι τιμές της διαπερατότητας που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 2. Ο υαλοπίνακες αυτοί πρακτικά αποτελούνται από δύο στρώσεις γυαλιού στην εξωτερική πλευρά με ένα μικρό διάκενο πάχους 3,2 mm στο οποίο τοποθετείται το φωτοβολταϊκό στοιχείο υμενίου (thin-film) του υαλοπίνακα. Ακόμη, μεταξύ των δύο αυτών εξωτερικών στρώσεων γυαλιού και του εσωτερικού υαλοπίνακα, έχουμε 12 mm διάκενο το οποίο είναι πληρωμένο με αέρα). Στον Πίνακας 2 στη συνέχεια, εμφανίζονται οι ιδιότητες των τριών STPV υαλοπινάκων μαζί με έναν διπλό υαλοπίνακα με επίστρωση LoE.

Πίνακας 2.Θερμοφυσικές Ιδιότητες των 3 υαλοπινάκων Μελέτης.

ΘΕΡΜΟΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	LOW	MEDIUM	HIGH	Έγχρωμος Διπλός Υαλοπίνακας LoE
Διαπερατότητα(%)	10	20	30	44
SHGC(g-value)	0,09	0,12	0,17	0.38
U-value(W/m^2K)	1,6	1,6	1,6	1.76

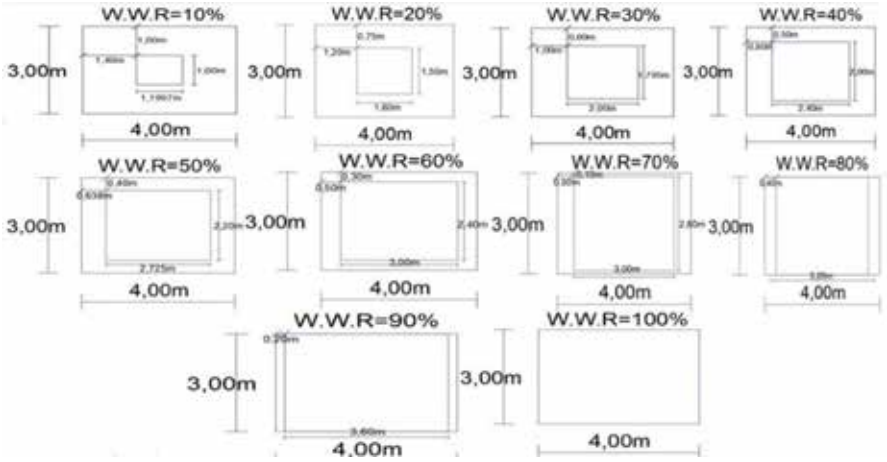
2.4 Προσομοίωση - Παραδοχές

Η προσομοίωση μας πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό DesignBuilder όπου βρέθηκε η απαίτηση του χώρου γραφείου σε καταναλώσεις σε φορτία για θέρμανση, ψύξη και φωτισμό, ενώ η φωτοβολταϊκή παραγωγή από τους STPV υαλοπίνακες υπολογίστηκε με χρήση του λογισμικού RETScreen Expert. Τα Κλιματικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τις 4 πόλεις μελέτης λήφθηκαν από module του λογισμικού EnergyPlus(e+) και αφορούσαν την περιοχή του Ελληνικού για την Αθήνα, της Δυτικής Μακεδονίας για την Καστοριά και τα αεροδρόμια Θεσσαλονίκης και Σούδας(Κρήτη) για τις 2 πόλεις αντίστοιχα. Η προσομοίωση για την εύρεση των θερμικών φορτίων περιέλαβε και τους 3 τύπους διαπερατότητας των υαλοπινάκων μελέτης και αφορούσε ποσοστά ανοιγμάτων(WWR) με τιμές 10≤WWR≤100, όπως φαίνεται στην Εικόνα. 2 παρακάτω. Η παράμετρος που ορίστηκε για την αξιολόγηση της ετήσιας ενεργειακής απόδοσης των υαλοπινάκων είναι ο Δ.Ε.Ι (Δείκτης Ενεργειακού Ισοζυγίου) ο οποίος ορίστηκε ως το αλγεβρικό άθροισμα της παρακάτω εξίσωσης (1)

$$Δ.Ε.Ι = P_Θ+P_Ψ+P_Φ+P_P+P_{ΦΒ}\ [kWh/m^2]\ (1),$$

όπου $P_Θ$, $P_Ψ$, P_P και $P_Φ$ τα φορτία σε θέρμανση, ψύξη, ανάγκες σε ρεύμα ηλεκτρικών συσκευών και φωτισμό αντίστοιχα και αφορούν την τελική κατανάλωση ενέργειας, ενώ ως

$P_{ΦΒ}$ ορίστηκε η παραγόμενη φωτοβολταϊκή ισχύς και η οποία έφερε αρνητικό πρόσημο στο αλγεβρικό άθροισμα του ισοζυγίου.



Εικόνα. 2. Ανοίγματα στην πρόσοψη του χώρου-γραφείου μελέτης.

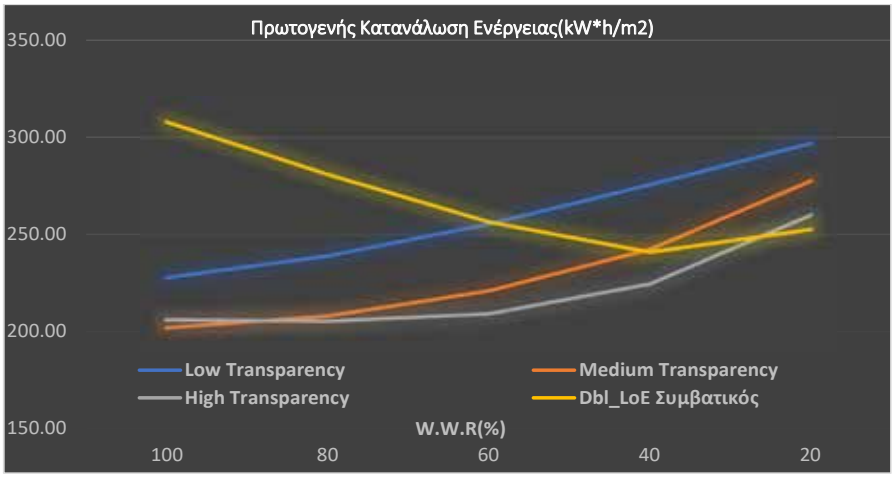
Η προσομοίωση έγινε προκειμένου να εξάγουμε τα αποτελέσματα για τις ανάγκες του υπό μελέτη χώρου γραφείου σε ετήσια βάση. Κάθε υαλοπίνακας μελετήθηκε για τα διάφορα ανοίγματα του, σε Νότιο Προσανατολισμό και για τις 4 χαρακτηριστικές πόλεις-αντιπροσωπευτικές των 4 Κλιματικών Ζωνών της χώρας με τα αποτελέσματα να παρουσιάζονται στην επόμενη ενότητα. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης από το λογισμικό, μετατράπηκαν σε πρωτογενή κατανάλωση, ώστε να γίνει ομογενοποίηση των τιμών και τα αποτελέσματα να μπορούν να μελετηθούν σε συλλογική βάση. Έτσι, δεδομένου ότι όπως αναφέρθηκε η θέρμανση πραγματοποιήθηκε σε όλες τις αναλύσεις με φυσικό αέριο για το χώρο γραφείου μας, ενώ η ψύξη και φωτισμός απαιτούν ηλεκτρική ενέργεια, πήραμε από τον Πίνακα 1.2 του ΤΟΤΕΕ 1, **[13]** τους συντελεστές μετατροπής σε Πρωτογενή Ενέργεια, 1,05 για το φυσικό αέριο και 2,90 για την ηλεκτρική ενέργεια. Φυσικά, το DesignBuilder μας δίνει τις τιμές της τελικής κατανάλωσης ενέργειας αφού έχει ήδη συμπεριλάβει τις αποδόσεις των συστημάτων για θέρμανση, ψύξη και φωτισμό.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

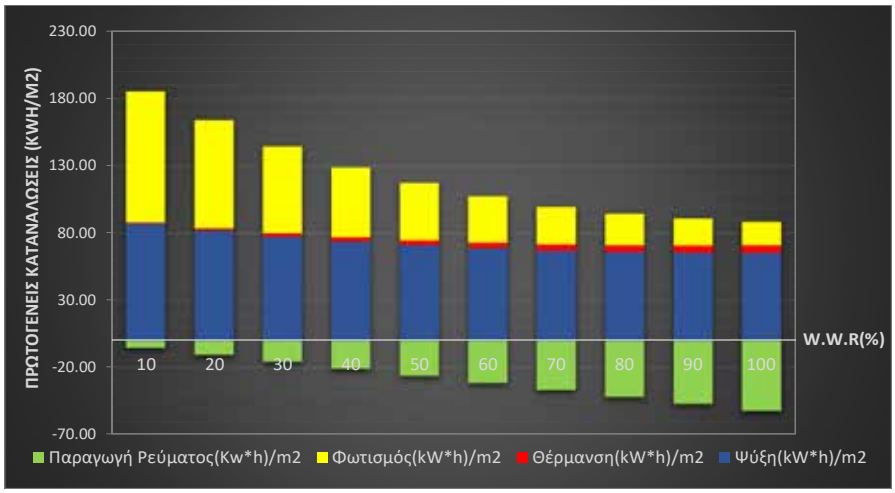
Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης για την Α' φάση για την Αθήνα, ελήφθησαν οι τελικές καταναλώσεις για θέρμανση, ψύξη, φωτισμό, ηλεκτρικές συσκευές, οι οποίες μετατράπηκαν με τη χρήση των συντελεστών Κ.Ev.A.K σε Πρωτογενή Κατανάλωση Ενέργειας, ενώ διαιρέθηκαν οι προκύπτουσες τιμές και με τα ωφέλιμα m^2 του χώρου γραφείου. Τα τελικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Γράφημα 1.

Με μία πρώτη ανάγνωση του Γράφημα 1 παρατηρούμε ότι ανεξαρτήτως της διαπερατότητας στο ορατό, η τάση που έχουν και οι τρεις(3) STPV υαλοπίνακες είναι η μείωση της πρωτογενούς κατανάλωσης ενέργειας αυξανομένου του WWR. Μάλιστα, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι την ελάχιστη απαίτηση εμφανίζει ο υψηλής διαπερατότητας (high transparency) υαλοπίνακας περίπου στη τιμή WWR=80%, ενώ ο χαμηλής (low transparency) εμφανίζεται να έχει τις υψηλότερες απαιτήσεις κατανάλωσης για κάθε ποσοστό ανοίγματος WWR συγκριτικά με τους άλλους δύο. Από το Γράφημα 2 προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα: Με την αύξηση του W.W.R παρατηρείται μείωση της κατανάλωσης για τεχνητό φωτισμό, δεδομένου ότι αυξανομένων των ανοιγμάτων αυξάνεται και η φωτεινή ροή, ενώ αυξάνει και η παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος, αφού η επιφάνεια των STPV υαλοπινάκων μεγαλώνει. Όσον αφορά τη θέρμανση και τη ψύξη τα αποτελέσματα παρουσιάζουν ενδιαφέρον. Αρχικώς, παρατηρείται

μία μικρή αύξηση στις καταναλώσεις για θέρμανση, που είναι χαρακτηριστικό των STPV υαλοπινάκων, λόγω της μικρότερης συγκριτικά με τους συμβατικούς υαλοπίνακες διαπερατότητας, για τους οποίους οι απαιτήσεις ελαττώνονται όσο αυξάνει το W.W.R. Τέλος, όσον αφορά τις καταναλώσεις για ψύξη παρατηρήθηκε, αυξανομένου του W.W.R , μία μείωση, που είναι ένα μη αναμενόμενο ως αποτέλεσμα τόσο ως προς έναν συμβατικό υαλοπίνακα όσο και συγκριτικά με αντίστοιχες Αναλύσεις της Διεθνούς Βιβλιογραφίας. Η σχέση W.W.R με την πρωτογενή κατανάλωση ενέργειας για το συμβατικό υαλοπίνακα παρουσιάζεται στο Γράφημα 3.



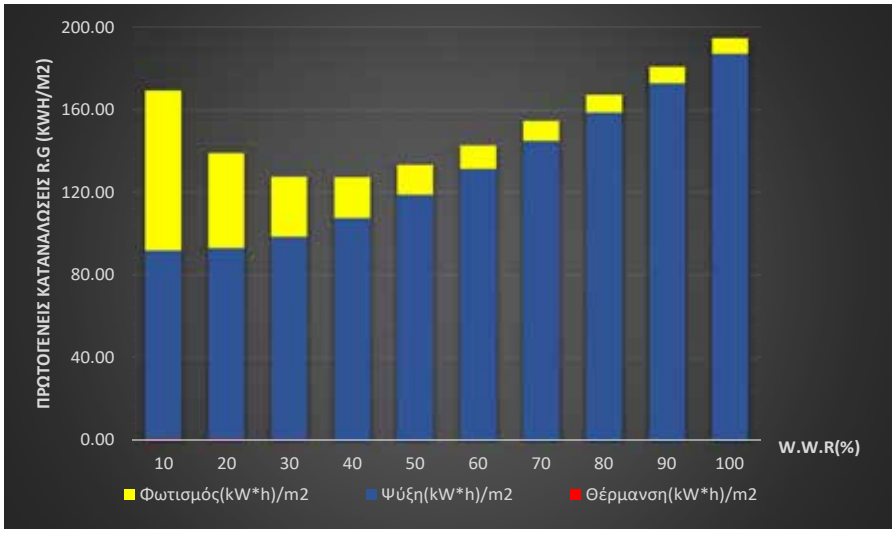
Γράφημα 1. Ολική Πρωτογενής Κατανάλωση Ενέργειας για τις διάφορες διαπερατότητες του STPV και διπλού συμβατικού υαλοπίνακα.



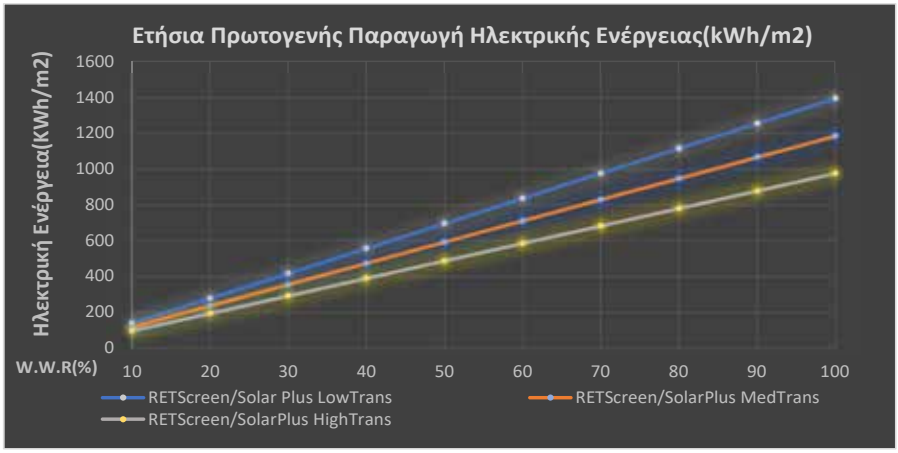
Γράφημα 2. Πρωτογενείς Καταναλώσεις για Θέρμανση, Ψύξη, Φωτισμό και Παραγωγή ρεύματος ανά m^2 ωφέλιμης επιφανείας για τον Μέσης Διαπερατότητας STPV Υαλοπίνακα, Νότιου Προσανατολισμού για διάφορα W.W.R στην Αθήνα.

Η παραγόμενη ενέργεια (ηλεκτρικό ρεύμα) από τους STPV υαλοπίνακες υπολογίσθηκε με τη χρήση του λογισμικού RETScreen Expert για κάθε ποσοστό ανοίγματος W.W.R και

διαπερατότητα στο ορατό. Σύμφωνα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά των STPV υαλοπινάκων η αποδιδόμενη μέγιστη ισχύς τους είναι 40Wp/m^2, 34Wp/m^2 και 28Wp/m^2 για τον υψηλής, μέσης και χαμηλής διαπερατότητας αντίστοιχα, ενώ η συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (με μετατροπή σε πρωτογενή ενέργεια) σε σχέση με το WWR παρουσιάζεται στο Γράφημα 4.



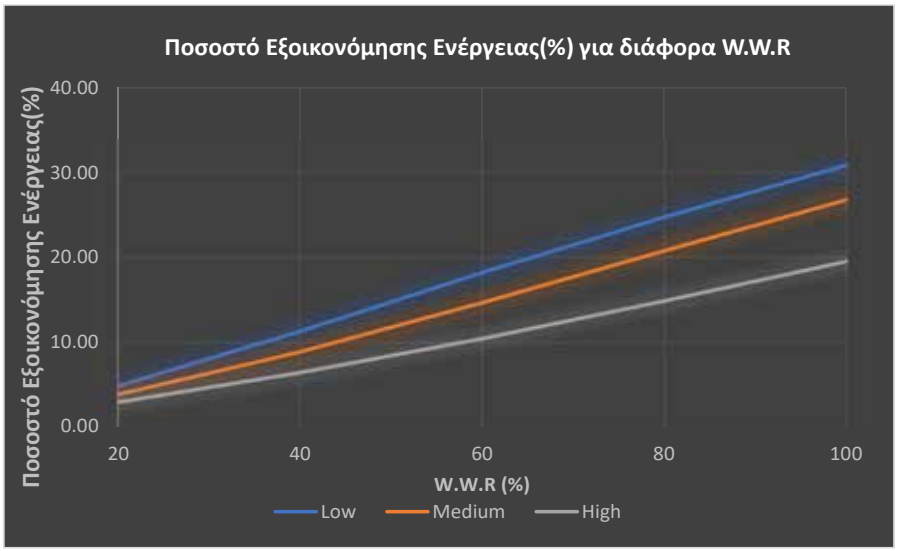
Γράφημα 3. Πρωτογενείς Καταναλώσεις για θέρμανση, Ψύξη και Φωτισμό ανά m2 ωφέλιμης επιφανείας ενός Συμβατικού Διπλού LoE Υαλοπίνακα (R.G) για διάφορα ανοίγματα W.W.R για Νότιο Προσανατολισμό στην Αθήνα.



Γράφημα 4. Πρωτογενής Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από τους χαμηλής, μέσης και υψηλής διαπερατότητας STPV υαλοπίνακες για Νότιο Προσανατολισμό, στην Αθήνα.

Μάλιστα, για μία καλύτερη και πιο πρακτική εικόνα της τάξης μεγέθους των αριθμών κατανάλωσης και παραγωγής ρεύματος από τους STP υαλοπίνακες βρέθηκε το ποσοστό εξοικονόμησης των STPV υαλοπινάκων ως ο λόγος της ετήσιας ενεργειακής παραγωγής τους προς την ολική πρωτογενή κατανάλωση ενέργειας. Τα παραγόμενα αποτελέσματα της

ποσοστιαίας εξοικονόμησης ενέργειας παρουσιάζονται σε μορφή γραφήματος, για Νότιο προσανατολισμό για την Αθήνα (Β' Κλιματική Ζώνη) στο Γράφημα 5 απ' όπου προκύπτει ότι όσο πιο διαπερατός στο ορατό ο STPV υαλοπίνακας, τόσο μικρότερη η εξοικονόμηση ενέργειας (όπως μικρότερη είναι και η παραγωγή ρεύματος από αυτό). Η εξοικονόμηση ενέργειας έχει υπολογιστεί σε κάθε W.W.R σε σχέση με ένα σενάριο αναφοράς (Ίδιος χώρος με διπλό υαλοπίνακα διαπερατότητας T_{vis}=44% και ίδιο W.W.R).



Γράφημα 5. Ποσοστιαία (%) Εξοικονόμηση Ενέργειας για Low/Medium/High Transparency Υαλοπίνακες για την Αθήνα.

Επιπλέον, από την ανάγνωση του Γράφημα 5 συμπεραίνεται ότι για W.W.R=100% ο υψηλής διαπερατότητας υαλοπίνακας οδηγεί σε εξοικονόμηση 19.55%, ο μέσης διαπερατότητας σε 26.78%, ενώ ο χαμηλής διαπερατότητας σε 30.87 %. Αυτό είναι λογικό, αφού όσο λιγότερο διαπερατός ο υαλοπίνακας, τόσο μεγαλύτερη η παραγωγή ρεύματος και η μείωση των ηλιακών κερδών. Σε ένα μέσο ποσοστιαίο άνοιγμα WWR=60% της ανάλυσης, οδηγεί για τους υψηλής, μέσης και χαμηλής διαπερατότητας ποσοστά εξοικονόμησης 10.46%, 14.69% και 18.24% αντιστοίχως.

Αντιστοίχως, όπως έχει ήδη αναφερθεί, στη Β' Φάση πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις, για Θεσσαλονίκη, Ηράκλειο και Καστοριά με την υπολογιζόμενη εξοικονόμηση να είναι ίδιας τάξης μεγέθους.

Συγκεκριμένα, για τη Θεσσαλονίκη(Γ' Κλιματική Ζώνη) για Νότιο προσανατολισμό, η χρήση του a-Si υαλοπίνακα STPV οδηγεί για WWR=100% σε ετήσια ποσοστά εξοικονόμησης 19.45%, 26.63% και 31.28% για υψηλή, μέση και χαμηλή διαπερατότητα, ενώ για ένα μέσο άνοιγμα WWR=60% οδηγεί αντιστοίχως σε 10.49%, 14.76% και 18.36%.

Σε ό,τι αφορά το Ηράκλειο Κρήτης (Α' Κλιματική Ζώνη), για Νότιο προσανατολισμό, η χρήση του a-Si υαλοπίνακα STPV οδηγεί για WWR=100% σε ετήσια ποσοστά εξοικονόμησης 22.76%, 30.89% και 34.93% για υψηλή, μέση και χαμηλή διαπερατότητα, ενώ για ένα μέσο άνοιγμα WWR=60% οδηγεί αντιστοίχως σε 11.98%, 16.89 % και 20.72%.

Τέλος, για τη Καστοριά (Δ' Κλιματική Ζώνη), πάλι για Νότιο προσανατολισμό, η χρήση του a-Si υαλοπίνακα STPV οδηγεί για WWR=100% σε ετήσια ποσοστά εξοικονόμησης 20.06%, 28.07% και 34.47% για υψηλή, μέση και χαμηλή διαπερατότητα, ενώ για ένα μέσο άνοιγμα WWR=60% οδηγεί αντιστοίχως σε 11.18%, 15.63 % και 19.76%.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα συμπεράσματα από την προαναφερθείσα ανάλυση είναι τα εξής:

1. Από το Γράφημα 5 παρατηρείται ότι αυξανομένου του W.W.R, τα ποσοστά εξοικονόμησης ενέργειας αυξάνονται, λόγω της μεγαλύτερης παραγωγής ρεύματος και της πολύ μεγάλης μείωσης των καταναλώσεων για φωτισμό κατά 82%. Τα αποτελέσματα αυτά σε συνδυασμό με το μικρό g-value των STPV υαλοπινάκων της ανάλυσης μας οδηγούν σε αύξηση στην κατανάλωση για θέρμανση κατά 86% και μία μικρή μείωση της κατανάλωσης για ψύξη κατά 25%. Το φαινομενικά μη αναμενόμενο αποτέλεσμα στην κατανάλωση για ψύξη (Γράφημα 2) έχει διαπιστωθεί και σε αντίστοιχες εργασίες στο Μεσογειακό κλίμα, όπως αυτές των Olivieri et al **[10]** στην Ισπανία και των Cornaro et al. **[11]** στην Ιταλία. Συγκεκριμένα, στα αποτελέσματα τους, αυξανομένου του W.W.R οι καταναλώσεις για θέρμανση αυξάνονται-όπως συνέβη και στην παρούσα εργασία, οι καταναλώσεις όμως για ψύξη μειώνονται. Κατόπιν προσομοίωσης των STPV υαλοπινάκων και χώρου μελέτης μας στα Κλιματικά δεδομένα της Μαδρίτη, Ρώμης, Λονδίνου και δύο πόλεων της Κίνας (Lhasa και Chengdu) η προαναφερθείσα μη αναμενόμενη τάση για μείωση της κατανάλωσης για ψύξη επαληθεύτηκε, αποδεικνύοντας η κρίσιμη παράμετρος για αυτή τη συμπεριφορά είναι ο πολύ μικρός συντελεστής ηλιακών κερδών g-value. Συνεπώς, αυτού του είδους οι υαλοπίνακες μπορεί να αποτελέσουν μία ικανοποιητική λύση για τη χώρα, ιδίως στις κλιματικές ζώνες Α και Β ειδικά όταν για αισθητικούς λόγους η μορφολογία του κτιρίου επιβάλλει τα μεγάλα ανοίγματα.

2. Μεγαλύτερος λόγος W.W.R οδηγεί σε μεγαλύτερα ποσοστά εξοικονόμησης ενέργειας, εύρημα το οποίο είναι συμβατό με την υπάρχουσα Βιβλιογραφία για παρόμοιες κλιματικές συνθήκες (Μεσόγειος). Για ένα σχετικώς μεγάλο W.W.R (80%) ο χαμηλής διαπερατότητας STPV υαλοπίνακας εμφανίζει 14,93% μειωμένη πρωτογενή κατανάλωση ενέργειας συγκριτικά με το συμβατικό υαλοπίνακα. Το γεγονός αυτό, είναι ενθαρρυντικό δεδομένης και της δυνατότητας παραγωγής ρεύματος από τον STPVs.

3. Όσον αφορά τους τρεις STPVs υαλοπίνακες της ανάλυσης, δε μπορεί άμεσα να κριθεί ένας εκ των τριών ως η βέλτιστη λύση. Αυτό έγγυται στο γεγονός ότι για τον χαμηλής διαπερατότητας STPV (10%), η παραγωγή ρεύματος είναι η υψηλότερη, ενώ και το ποσοστό εξοικονόμησης εμφανίζεται το καλύτερο για κάθε ποσοστό ανοιγμάτων (W.W.R) της ανάλυσης, παρά τις υψηλότερες Πρωτογενείς Καταναλώσεις. Το σκούρο χρώμα του μπορεί να αποτελέσει ανασταλτικό παράγοντα λόγω θέασης. Στον αντίποδα, ο υψηλής διαπερατότητας STPV (30%) προσφέρει καλύτερη θέαση, αλλά λόγω της σημαντικά ασθενέστερης δυνατότητας παραγωγής ρεύματος οδηγεί στη μικρότερη εξοικονόμηση ενέργειας, παρά τις χαμηλότερες εν γένει πρωτογενείς του καταναλώσεις.
4. Φαίνεται ότι η χρήση των STPV υαλοπινάκων μπορεί να είναι μία καλή λύση στις περιπτώσεις μεγάλων ανοιγμάτων WWR λόγω της σκίασης την οποία προσφέρουν ιδίως σε προσόψεις Νότιου προσανατολισμού.

Το κόστος των STPV υαλοπινάκων θα αποτελέσει μία καθοριστική παράμετρο μελλοντικής ανάλυσης για την περαιτέρω υιοθέτηση τους, με το σκεπτικό ότι δύναται να συνεισφέρουν στο ενεργειακό ισοζύγιο του κτιρίου μέσω και της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ενώ μπορεί να αντικαταστήσουν κάποιο σύστημα σκίασης, φυσικά μαζί με την υιοθέτηση των απαιτήσεων για θέα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΕΣ

1. European Union., 2003, “Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council of December 16th, 2002 on the Energy Performance of Buildings,” European Union: Brussels, Belgium.

2. European Union., 2010, “Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of May 19th, 2010 on the Energy Performance of Buildings (Recast),” European Union: Brussels, Belgium.

3. Κανονισμός Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων, 2017, (Κ.Εν.Α.Κ).

4. Miyazaki, T., Akisawa, A., and Kashiwagi, T., 2005, “Energy savings of office buildings by the use of semi-transparent solar cells for windows”. Renewable Energy,” 30:281-304.

5. Zhang, W., Lu L, Peng, J., and Song, A., 2016 “Comparison of the overall energy performance of semi-transparent photovoltaic windows and common energy-efficient windows in Hong Kong,” Energy and Buildings.,128:511-518.

6. Zhu, L., Wang, P., Huo, Y., Tian, W., and Sun, Y., 2018, “Relationships between design parameters of see-through thin film photovoltaic façade and energy performance of office building in China cold zone,” Energy Procedia.,152:401-406.

7. Polysolar, 2018 “Guide to BIPV, Building integrated Photovoltaics,” www.polysolar.co.uk.

8. Meng, W., Jinqing, P., Hongxing, Y., and Yimo, L., 2018, “Performance evaluation of semi-transparent CdTe thin film PV window applying on commercial buildings in Hong Kong”, Energy Procedia.,152:1091-1096.

9. Cornaro, C., et al. 2015, “Comparative analysis of the outdoor performance of a dye solar cell mini-panel for building integrated photovoltaics applications,” Prog.Photovolt: Res. Appl.,23:215-225.

10. Olivieri, L., Caamano-Martin, E., Moralejo-Vazquez, F.J., Martin-Chivelet, N., Olivieri, F., and Neila-Gonzalez, F.J., 2014, “Energy saving potential of semi-transparent photovoltaic elements for building integration,” Energy., 76:572-583.

11. Cornaro, C., Basciano, G., Puggioni, V.A., and Pierro, M., 2017, “Energy Saving Assessment of Semi-Transparent Photovoltaic Modules Integrated into NZEB,” Research Gate.

12. OnyxSolar, https://www.onyxsolar.com/product-services/technical-specifications

13. ΤΕΧΝΙΚΟ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟ ΕΛΛΑΔΟΣ. 2017, «ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΕΘΝΙΚΕΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΚΤΗΡΙΩΝ ΚΑΙ ΤΗΝ ΕΚΔΟΣΗ ΤΟΥ ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΤΙΚΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ,» Τ.Ο.Τ.Ε.Ε .,2070-1/2017.

ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΕΜΒΑΣΕΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΚΑΙ ΑΙΣΘΗΤΙΚΗΣ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗΣ ΣΤΗΝ ΚΛΙΜΑΚΑ ΤΗΣ ΠΟΛΗΣ

Δήμητρα Τσιριγώτη[1]*, Δημήτριος Ζεγγίνης[1], Δημήτριος Μπίκας[1]

[1] Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, ΑΠΘ
Εργαστήριο Οικοδομικής και Φυσικής των Κτιρίων
*e-mail: dtsirigo@civil.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η σύγχρονη ελληνική πόλη, έχοντας δομηθεί στο μεγαλύτερο ποσοστό της κατά τις δεκαετίες 1950-1980, χαρακτηρίζεται από την χαμηλή ποιότητα των κτιριακών κατασκευών, γεγονός που συνεπάγεται τόσο την ιδιαίτερα αυξημένη κατανάλωση ενέργειας για τη θέρμανση και την ψύξη των κτιρίων λόγω της έλλειψης θερμομονωτικής προστασίας στα κτιριακά κελύφη, όσο και την υποβαθμισμένη αισθητική ποιότητα του δομημένου περιβάλλοντος που σχετίζεται άμεσα με τον τρόπο με τον οποίο οικοδομήθηκαν οι ελληνικές πόλεις κατά τις προηγούμενες δεκαετίες.

Οι διεθνείς συμφωνίες για την κλιματική αλλαγή αλλά και οι Ευρωπαϊκές οδηγίες για την κατανάλωση ενέργειας στα κτίρια έχουν οδηγήσει πρόσφατα σε μία σειρά από μέτρα και κίνητρα για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης στην κλίμακα του κτιρίου ή της κτιριακής μονάδας αλλά και σε μία σειρά από δράσεις για τη βελτίωση του ενεργειακού αποτυπώματος των πόλεων. Στην αστική κλίμακα, η αποσπασματική εφαρμογή μέτρων ενεργειακής αναβάθμισης μπορεί να οδηγήσει μόνο σε μεμονωμένη βελτίωση της ποιότητας ζωής των κατοίκων, με συνέπεια οι πόροι που διατίθενται να συμβάλουν περιορισμένα στη συνολική αναβάθμιση της σύγχρονης πόλης.

Βασική υπόθεση εργασίας της έρευνας είναι ότι η αστική γεωμετρία επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την ενεργειακή συμπεριφορά του κτιριακού κελύφους. Επομένως οι επεμβάσεις ενεργειακής αναβάθμισης στην κλίμακα της πόλης θα πρέπει να σχεδιάζονται λαμβάνοντας υπόψη τις παραμέτρους που διαμορφώνουν τη γεωμετρία του δομημένου περιβάλλοντος. Ταυτόχρονα η δυνατότητα εφαρμογής στρατηγικών ενεργειακής αναβάθμισης σε αστική κλίμακα αποτελεί ένα εργαλείο το οποίο μπορεί να αυξήσει την οικονομία κλίμακας στις παρεμβάσεις αυτές καθιστώντας πιο συμφέρουσα την εφαρμογή τους από οικονομικής απόψεως. Η δυνατότητα χρηματοδότησης, που ήδη έχει θεσμοθετηθεί μέσω εθνικών και ευρωπαϊκών προγραμμάτων για την εξοικονόμηση ενέργειας στα κτίρια, αποτελεί μία σημαντική ευκαιρία για την ευρύτερη αναβάθμιση του αστικού ιστού της ελληνικής πόλης η οποία δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί με αποσπασματικές παρεμβάσεις, κυρίως λόγω του γεγονότος ότι η αισθητική της πόλης μπορεί να προκύψει μόνο από τη συνολική αρχιτεκτονική ποιότητα του δομημένου χώρου και όχι από το άθροισμα αποσπασματικών παρεμβάσεων.

Η παρούσα έρευνα μελετά επεμβάσεις αναβάθμισης των κτιριακών κελυφών στην κλίμακα του οικοδομικού τετραγώνου αξιολογώντας την ενεργειακή τους αποδοτικότητα και τη δυνατότητά τους να συμβάλλουν στη βελτίωση της αισθητικής ποιότητας της πόλης. Η αξιολόγηση της ενεργειακής αποδοτικότητας γίνεται μέσω προσομοιώσεων. Η αξιολόγηση των εξεταζόμενων επεμβάσεων σε διαφορετικές τυπολογίες οικοδομικών τετραγώνων καταλήγει σε μια σειρά ποσοτικοποιημένων αποτελεσμάτων για την ενεργειακή και αισθητική αναβάθμιση της ελληνικής πόλης τα οποία θα είναι χρήσιμα για την αναθεώρηση των ελληνικών κανονισμών για τη δόμηση και την ενεργειακή αποδοτικότητα και θα προωθήσουν τις στρατηγικές προς τη μηδενική ενεργειακή κατανάλωση του κτιριακού τομέα και της κλιματικής ουδετερότητας στην αστική κλίμακα.

Λέξεις Κλειδιά: ενεργειακή αναβάθμιση, αισθητική αναβάθμιση, αστική μορφολογία, παθητικά ηλιακά συστήματα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η βιώσιμη πόλη έχει αποτελέσει αντικείμενο έρευνας τις τελευταίες δεκαετίες και η βιώσιμη αστική μορφή έχει μελετηθεί με πολλές διαφορετικές προσεγγίσεις. Τα ζητήματα της ηλιακής πρόσβασης και η αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων της ηλιακής ακτινοβολίας, ιδίως κατά τη διάρκεια των περιόδων θέρμανσης έχουν εξεταστεί εκτενώς για διάφορες αστικές μορφές [1],[2].

Ταυτόχρονα, το θεσμικό πλαίσιο σε πολλές χώρες βρίσκεται ήδη σε διαδικασία αναθεώρησης των κανονισμών ενεργειακής απόδοσης σύμφωνα με τη σύσταση της Ευρωπαϊκής Επιτροπής 2016/1318 και την αναθεωρημένη οδηγία για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων 2018/844 σχετικά με τις κατευθυντήριες γραμμές για την προώθηση κτιρίων και βέλτιστων πρακτικών σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας, προκειμένου να διασφαλιστεί ότι όλα τα νέα κτίρια θα είναι κτίρια σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας.

Στις περισσότερες εφαρμοσμένες περιπτώσεις η ζήτηση θέρμανσης μειώνεται δραστικά με την υιοθέτηση του προτύπου του παθητικού κτιρίου [3] (υψηλό επίπεδο θερμομόνωσης, παράθυρα υψηλής ενεργειακής απόδοσης, υψηλή αεροστεγανότητα του περιβλήματος και μηχανικός αερισμός με ανάκτηση θερμότητας). Η υπερθέρμανση αποφεύγεται με αποτελεσματικές διατάξεις σκίασης (σταθερές ή κινητές) και μέτρα παθητικού δροσισμού (θερμική μάζα, υψηλότερη ταχύτητα αερισμού κατά τη διάρκεια των νυκτερινών ωρών κλπ).

Στην ίδια κατεύθυνση η πρόσφατη έρευνα για τη βιωσιμότητα των πόλεων επικεντρώνεται στα υφιστάμενα κτίρια και στην διερεύνηση τρόπων ελαχιστοποίησης της ενεργειακής κατανάλωσης από τη λειτουργία τους. Η προσπάθειες στρέφονται προς τη διαμόρφωση ενός οδικού χάρτη που θα καθορίζει, μέσα από μια σειρά εργαλείων, τον τρόπο με τον οποίο οι πόλεις μπορούν να μετατρέψουν το όραμα για μία βιώσιμη ανάπτυξη σε μετρήσιμη πρόοδο. Το πρόγραμμα Zero Cities καθορίζει μια απόλυτη κλίμακα για τη μέτρηση της χρήσης ενέργειας σε υφιστάμενα κτίρια σε σχέση με το στόχο για την επίτευξη μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας [4].

Ταυτόχρονα, η δημιουργία ενός οδικού χάρτη για την κλιματική ουδετερότητα των πόλεων έχει προταθεί και από άλλες ευρωπαϊκές δράσεις [5], ενώ αναπτύσσονται στρατηγικές για το σχεδιασμό, την κατασκευή και τη διαχείριση έργων μεγάλης κλίμακας για την αναβάθμιση αστικών περιοχών με στόχο την προώθηση πόλεων σχεδόν μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης [6].

Η παρούσα έρευνα ακολουθεί τις παραπάνω κατευθύνσεις και στρατηγικές και στοχεύει στο να συμπληρώσει και να τροφοδοτήσει το μελλοντικό σχεδιασμό για την αναβάθμιση της σύγχρονης ελληνικής πόλης προς ένα πιο βιώσιμο μέλλον, προτείνοντας λύσεις για την ταυτόχρονη ενεργειακή και αισθητική αναβάθμιση του αστικού οικοδομικού τετραγώνου.

Η μελέτη εξετάζει τη δυνατότητα ενεργειακής αναβάθμισης του αστικού οικοδομικού τετραγώνου με στόχο την ταυτόχρονη αναβάθμιση της αισθητικής ποιότητας της πόλης. Συγκεκριμένα εξετάζεται η μείωση της ανταλλαγής θερμότητας του κελύφους των κτιρίων με το περιβάλλον και η αξιοποίηση των ηλιακών θερμικών κερδών στην κλίμακα της πόλης. Μελετάται η επίδραση της θερμομονωτικής προστασίας ανάλογα με τη μορφή και τη γεωμετρία του αστικού οικοδομικού τετραγώνου και εξετάζονται εναλλακτικά σενάρια προσθήκης προσαρτημένων ηλιακών χώρων μέσω του μετασχηματισμού των εξωστών σε ηλιακούς χώρους στην κλίμακα του αστικού οικοδομικού τετραγώνου. Στο πλαίσιο των επεμβάσεων λαμβάνονται υπόψη λύσεις σκίασης για την ελαχιστοποίηση της υπερθέρμανσης κατά τη θερινή περίοδο οι οποίες συνδυάζονται επίσης με επεμβάσεις που συμβάλλουν στην αισθητική αναβάθμιση.

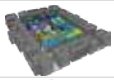
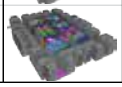
2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η μελέτη εστιάζει στην ανάλυση τριών τυπικών οικοδομικών τετραγώνων τα οποία έχουν επιλεγεί ως αντιπροσωπευτικά από μία βάση δεδομένων που έχει προκύψει με βάση την τυπολογική ανάλυση του αστικού οικοδομικού τετραγώνου για την πόλη της Θεσσαλονίκης [7]. Τα οικοδομικά τετράγωνα (Ο.Τ.) που μελετώνται χαρακτηρίζονται από διαφορετική μορφή και διαφορετική γεωμετρία προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα για τον τρόπο με τον οποίο οι παράμετροι αυτές μπορούν να επηρεάσουν την ενεργειακή συμπεριφορά του αστικού οικοδομικού τετραγώνου και να διερευνηθεί ο τρόπος με τον οποίο πρέπει να λαμβάνονται υπόψη σε περιπτώσεις αναβάθμισης.

Με βάση τα παραπάνω, το Ο.Τ.1 χαρακτηρίζεται από ασυνεχή μορφή, δηλαδή τα κτίρια είναι πανταχόθεν ελεύθερα, ενώ το Ο.Τ.2 και το Ο.Τ.3 είναι συνεχούς μορφής, δηλαδή όλα τα κτίρια εφάπτονται στα όμορά τους δημιουργώντας κλειστό ακάλυπτο στο κέντρο του οικοδομικού τετραγώνου. Τα μελετώμενα οικοδομικά τετράγωνα έχουν διαφορετικό μέσο ύψος και διαφορετική πυκνότητα δόμησης. Η αναλυτική περιγραφή των παραμέτρων των τριών οικοδομικών τετραγώνων παρουσιάζεται στον πίνακα 1. Οι παράμετροι που παρουσιάζονται αφορούν στο συνολικό εμβαδόν του κάθε Ο.Τ., στο ύψος και τον αριθμό των ορόφων στο συντελεστή κάλυψης (Σ.Κ.) και το συντελεστή δόμησης (Σ.Δ.) καθώς και στο λόγο επιφάνειας προς όγκο (S/V) και ύψους κτιρίων προς πλάτος δρόμου (H/W).

Δεδομένου ότι η ηλιακή πρόσβαση στην κλίμακα της πόλης επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από το πλάτος του δρόμου και την αστική γεωμετρία, η ανάλυση εξετάζει την επίδραση του πλάτους του δρόμου στην ενεργειακή συμπεριφορά του αστικού οικοδομικού τετραγώνου τόσο στην υφιστάμενη κατάσταση όσο και στις επεμβάσεις που μελετώνται. Εξετάζεται η ενεργειακή συμπεριφορά των τριών οικοδομικών τετραγώνων λαμβάνοντας υπόψη τρία τυπικά πλάτη δρόμων (10, 15 και 20 m). Η διαφοροποίηση που προκύπτει στην πρόσβαση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας με βάση αυτά τα τρία πλάτη δρόμων αξιολογείται σε πρώτο επίπεδο για το βέλτιστο σχεδιασμό των παθητικών ηλιακών χώρων και σε δεύτερο επίπεδο προκειμένου να διαπιστωθεί τόσο η αποτελεσματικότητα της επέμβασης όσο και η συνολική ενεργειακή συμπεριφορά με βάση τη μορφή του οικοδομικού τετραγώνου πριν και μετά τις επεμβάσεις.

Πίνακας 1: Περιγραφή και γεωμετρικές παράμετροι των τριών οικοδομικών τετραγώνων

Ο.Τ.	ΕΜΒΑΔΟΝ Ο.Τ. (m^2)	ΜΟΡΦΗ ΚΑΤΟΨΗΣ Ο.Τ.	ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ	ΜΕΣΟ ΥΨΟΣ (m)	ΑΡ. ΟΡΟΦΩΝ	Σ.Κ.	Σ.Δ.	ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΚΕΛΥΦΟΥΣ (S/V)	ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΤΟΜΗΣ ΜΕ ΠΛΑΤΟΣ ΔΡΟΜΟΥ 10 m (H/W)	ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΤΟΜΗΣ ΜΕ ΠΛΑΤΟΣ ΔΡΟΜΟΥ 15 m (H/W)	ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΤΟΜΗΣ ΜΕ ΠΛΑΤΟΣ ΔΡΟΜΟΥ 20 m (H/W)
1	3.608			13,00	4	0,36	1,44	0,52	1,30	0,87	0,65
2	5.400			16,00	5	0,69	3,46	0,37	1,60	1,07	0,80
3	6.864			22,00	7	0,69	4,83	0,32	2,20	1,47	1,10

Στη συνέχεια γίνεται η αξιολόγηση της ενεργειακής συμπεριφοράς των υπό μελέτη οικοδομικών τετραγώνων μέσω μίας σειράς κατάλληλων προσομοιώσεων με το λογισμικό Enegry plus 9.1.2. Η αξιολόγηση της ενεργειακής συμπεριφοράς γίνεται μέσω του υπολογισμού των απαιτούμενων φορτίων για τη θέρμανση και την ψύξη των κτιρίων σε ετήσια βάση στην κλίμακα του οικοδομικού τετραγώνου. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών αφορούν στην αθροιστική απαίτηση φορτίων θέρμανσης και ψύξης όλων των κτιρίων του κάθε οικοδομικού τετραγώνου που μελετήθηκε. Συγκεκριμένα, πριν το σχεδιασμό των επεμβάσεων αναβάθμισης, το Ο.Τ.1 αποτελείται από 10 κτίρια και 60 θερμικές ζώνες εκ των οποίων 40 μη θερμαινόμενες, το Ο.Τ.2 από 17 κτίρια με συνολικά 160 θερμικές ζώνες εκ των οποίων 126 θερμαινόμενες και το Ο.Τ.3 από 16 κτίρια με 243 θερμικές ζώνες εκ των οποίων 214 θερμαινόμενες. Σε κάθε Ο.Τ. τα κτίρια χωρίστηκαν σε θερμικές ζώνες ανά όροφο. Ο διαχωρισμός των θερμικών ζωνών σε κάθε Ο.Τ. φαίνεται στην τέταρτη στήλη του πίνακα 1, όπου παρουσιάζονται με διαφορετικό χρώμα όλες οι ξεχωριστές θερμικές ζώνες, ενώ με γκρι χρώμα παρουσιάζονται τα κτίρια που σχεδιάστηκαν μόνο για το σκοπό του σκιασμού στην περίμετρο του κάθε Ο.Τ. και δεν αποτελούν θερμικές ζώνες. Ως θερμοκρασία άνεσης θεωρήθηκε σε όλες τις θερμικές ζώνες, 22 ^{o}C για την περίοδο θέρμανσης και 26 ^{o}C για την περίοδο ψύξης. Το κλιμακοστάσιο και η είσοδος του κάθε κτιρίου σχεδιάστηκαν ως ξεχωριστές μη θερμαινόμενες ζώνες. Η ζώνη του κλιμακοστασίου θεωρήθηκε ότι επικοινωνεί μόνιμα με τη ζώνη της εισόδου στην κοινή επιφάνεια επαφής των ζωνών.

Όσον αφορά στη λειτουργία των κτιρίων, σε όλες τις θερμικές ζώνες των ορόφων θεωρήθηκε κατά παραδοχή ότι αυτές στεγάζουν χρήση κατοικίας και επομένως λήφθηκε υπόψη 24ωρη λειτουργία. Στις θερμικές ζώνες του ισογείου θεωρήθηκε ότι η λειτουργία αφορά σε κατάστημα και επομένως θεωρήθηκε ότι η περίοδος λειτουργίας τους είναι μικρότερη από ότι των ορόφων και συγκεκριμένα, τις καθημερινές κατά τις ώρες 9:00 - 21:00 και τα Σαββατοκύριακα 9:00 - 15:00.

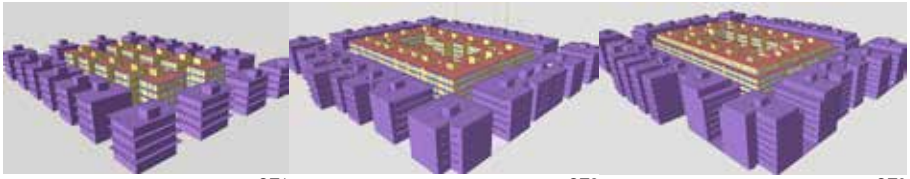
Τα κλιματικά δεδομένα που λήφθηκαν υπόψη αφορούν στην Γ' κλιματική ζώνη σύμφωνα με τον Κ.Εν.Α.Κ. και συγκριμένα στην πόλη της Θεσσαλονίκης. Το κλιματικό αρχείο που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση αποτελείται από ετήσιες ωριαίες τιμές και λήφθηκε από τη βάση δεδομένων του λογισμικού Energy plus [8].

Επίσης, κατά παραδοχή μελετήθηκε ένας προσανατολισμός των οικοδομικών τετραγώνων θεωρώντας το βορά παράλληλο με τον μικρό άξονα της κάτοψης του κάθε οικοδομικού τετραγώνου.

Μελετώνται τα εξής σενάρια:

- Σενάριο 1: υφιστάμενη κατάσταση κτιρίων.

Θεωρήθηκε ότι στην υφιστάμενη κατάσταση τα κτίρια έχουν οικοδομηθεί πριν την εφαρμογή του κανονισμού θερμομόνωσης των κτιρίων και ως εκ τούτου στερούνται θερμομονωτικής προστασίας τόσο στα οριζόντια όσο και στα κατακόρυφα δομικά στοιχεία. Για την αεροστεγανότητα λήφθηκε υπόψη μία μέση τιμή για όλες τις θερμαινόμενες ζώνες ίση με 2 ach. Στην εικόνα 1 παρουσιάζονται τα μοντέλα των τριών Ο.Τ. που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση.



Εικόνα 1: Τρισδιάστατη απεικόνιση των μοντέλων των τριών ΟΤ που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση. Με μοβ χρώμα απεικονίζονται τα κτίρια που δεν αποτελούν θερμικές ζώνες και σχεδιάστηκαν μόνο για την εξασφάλιση των συνθηκών σκίασης.

- Σενάριο 2: προσθήκη εξωτερικής θερμομόνωσης.

Σε αυτό το σενάριο τόσο η προσθήκη θερμομονωτικής προστασίας στα αδιαφανή δομικά στοιχεία όσο και η αναβάθμιση των κουφωμάτων ακολουθεί τις ελάχιστες απαιτήσεις του Κ.Εν.Α.Κ. [9]. Όσον αφορά στην αεροστεγανότητα στα σενάρια αναβάθμισης (σενάριο 2 και σενάριο 3), λήφθηκε υπόψη μία μέση τιμή για όλες τις θερμαινόμενες ζώνες ίση με 1 ach/h.

- Σενάριο 3: προσθήκη προσαρτημένων ηλιακών χώρων (θερμοκηπίων) στους εξώστες των κτιρίων και προσθήκη διατάξεων σκίασης.

Σε αυτό το σενάριο τα κελύφη των κτιρίων θεωρήθηκαν αναβαθμισμένα με βάση τις προδιαγραφές του σεναρίου 2. Επομένως, η συμβολή των παθητικών ηλιακών συστημάτων αξιολογείται λαμβάνοντας υπόψη ότι έχει προηγηθεί η θερμομόνωση του κελύφους και η αντικατάσταση των κουφωμάτων. Οι τιμές του συντελεστή θερμοπερατότητας που λήφθηκαν υπόψη στα τρία σενάρια παρουσιάζονται στον πίνακα 2.

Σε όλα τα σενάρια θεωρήθηκε δυνατότητα αερισμού ίση με 1,75 ach για τις ζώνες των ισογείων (καταστήματα) και 1,25 ach και τις ζώνες των ορόφων (κατοικίες), κατά τη διάρκεια του ωραρίου λειτουργίας τους. Επιπλέον, θεωρήθηκε νυχτερινός αερισμός κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου ίσος με 8 ach.

Για το σενάριο 3 σχεδιάστηκαν οι επεμβάσεις που αφορούν στην προσθήκη ηλιακών χώρων και σκίασης. Η βασική αρχή τοποθέτησης των ηλιακών χώρων είναι η τοποθέτησή τους στους εξώστες εκείνων των ορόφων που έχουν ηλιακή πρόσβαση σε όλη τη διάρκεια του έτους. Επομένως, πριν το σχεδιασμό τους έγινε μελέτη της ηλιακής ακτινοβολίας κατά την 21η Δεκεμβρίου προκειμένου να διαπιστωθεί ποιοι όροφοι έχουν άμεση ηλιακή πρόσβαση κατά το χειμερινό ηλιοστάσιο.

Από την ηλιακή μελέτη διαπιστώθηκε ότι για το Ο.Τ.1 για πλάτος δρόμου 10 m είναι αποδοτικό να τοποθετηθούν θερμοκήπια στους εξώστες του τελευταίου ορόφου, ενώ για πλάτος 15 m υπάρχει ηλιακή πρόσβαση και στον τρίτο όροφο και για πλάτος 20 m υπάρχει ηλιακή πρόσβαση και στον δεύτερο όροφο (Εικόνα 2). Άρα και σε αυτούς τους ορόφους αντίστοιχα είναι αποδοτική η τοποθέτηση θερμοκηπίων. Αντίστοιχα, για το Ο.Τ.2 με βάση τη διαθεσιμότητα της ηλιακής ακτινοβολίας τοποθετήθηκαν θερμοκήπια στους εξώστες του τελευταίου ορόφου, των δύο τελευταίων ορόφων και των τριών τελευταίων ορόφων για πλάτος δρόμου 10, 15 και 20 m αντίστοιχα (Εικόνα 3).

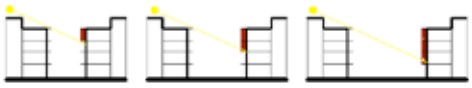
Πίνακας 2: Συντελεστές θερμοπερατότητας των δομικών στοιχείων των Ο.Τ. για τα τρία σενάρια.

Δομικό στοιχείο	Περιγραφή	Σενάριο 1	Σενάριο 2 και σενάριο 3
		U-value (W / m^2K)	*U-value* (W / m^2K)
Τοιχοποιίες	Στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα	3.25	0.45
	Εξωτερική τοιχοποιία πλήρωσης	1.72	0.45
Πλάκες	Πλάκα μεταξύ ορόφων	2.74	2.74
	Πλάκα δώματος	2.11	0.40
	Πλάκα επί εδάφους	2.65	0.75
Ανοίγματα	Παράθυρα	5.81	2.80
	Πόρτες	5.81	2.80

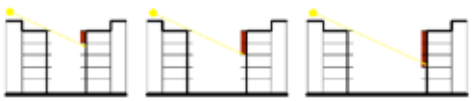
Στο Ο.Τ. 3 για πλάτος δρόμου 10 m όπου στον τελευταίο όροφο υπάρχει υποχώρηση στο ρετιρέ τοποθετήθηκαν θερμοκήπια στους δύο τελευταίους ορόφους με βάση την ηλιακή μελέτη (δηλαδή στο ρετιρέ και στον υποκείμενο αυτού όροφο). Θα πρέπει να αναφερθεί ότι, λόγω της υποχώρησης του τελευταίου ορόφου, σ΄ αυτό το Ο.Τ. τα θερμοκήπια σχεδιάστηκαν με κεκλιμένη την άνω επιφάνειά τους προκειμένου να προσαρμοστούν στη γεωμετρία του κτιρίου. Για τα πλάτη δρόμων 15 και 20 m, δεδομένου ότι δεν υπάρχει υποχώρηση του τελευταίου ορόφου τοποθετήθηκαν θερμοκήπια για τα μεν 15 m στους δύο τελευταίους ορόφους για τα δε 20 m και στους τρεις τελευταίους (Εικόνα 4).

Επίσης, επιλέχθηκε να τοποθετηθούν ηλιακοί χώροι και στην ανατολική και δυτική όψη και των τριών οικοδομικών τετραγώνων ομοίως με τη νότια όψη τόσο για να διατηρηθεί ο ενιαίος χαρακτήρας των όψεων όσο και για να διερευνηθεί η δυνατότητα συνεισφοράς τους ακόμα και σε αυτούς τους προσανατολισμούς όπου τα ηλιακά κέρδη είναι μειωμένα σε σχέση με τον νότιο προσανατολισμό που υπάρχει η βέλτιστη απόδοση. Ηλιακοί χώροι στα οικοδομικά τετράγωνα 1 και 2 τοποθετήθηκαν και στη νότια όψη προς την πλευρά του ακαλύπτου.

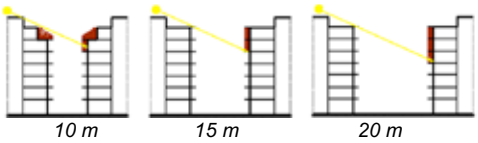
Όσον αφορά στη βορεινή όψη των οικοδομικών τετραγώνων, τοποθετήθηκαν θερμοκήπια μόνο στην περίπτωση του Ο.Τ.3 καθώς, κρίθηκε σκόπιμο να διατηρηθεί ενιαία η γεωμετρία της απόληξης των κτιρίων τόσο για αισθητικούς λόγους όσο και για λειτουργικούς, καθώς τα δώματα των ρετιρέ είναι περισσότερο εκτεθειμένα στις καιρικές συνθήκες και επομένως η δυνατότητα να προφυλάσσονται μέσω των υαλοστασίων κατά τους χειμερινούς μήνες μπορεί να τα καταστήσει περισσότερο λειτουργικά δημιουργώντας ταυτόχρονα ζώνες ανάσχεσης της θερμότητας.



Εικόνα 2: Μελέτη της ηλιακής πρόσβασης για πλάτος δρόμου 10, 15 και 20 m στο Ο.Τ.1 και προσθήκη ηλιακών χώρων στους αντίστοιχους ορόφους.



Εικόνα 3: Μελέτη της ηλιακής πρόσβασης για πλάτος δρόμου 10, 15 και 20 m στο Ο.Τ.2 και προσθήκη ηλιακών χώρων στους αντίστοιχους ορόφους.



Εικόνα 4: Μελέτη της ηλιακής πρόσβασης για πλάτος δρόμου 10, 15 και 20 m στο Ο.Τ.3 και προσθήκη ηλιακών χώρων στους αντίστοιχους ορόφους.

Η σκίαση σχεδιάστηκε στο πλαίσιο όχι μόνο της ηλιοπροστασίας αλλά και της δυνατότητας αναβάθμισης της αισθητικής των κτιρίων. Επομένως, σχεδιάστηκαν ηλιοπροστατευτικές διατάξεις με οριζόντιες περσίδες σε όλους τους εξώστες, καθώς και κατακόρυφα περσιδωτά πάνελ σε όλο το ύψος των κτιρίων είτε στους «τυφλές» πλαϊνές όψεις στο Ο.Τ.1, είτε ανάμεσα στους εξώστες στα Ο.Τ.2 και 3 προκειμένου πέρα από τη σκίαση να δοθεί και η δυνατότητα τοποθέτησης εγκαταστάσεων που τοποθετούνται στις όψεις των κτιρίων, όπως κλιματιστικά, λέβητες φυσικού αερίου κλπ.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο σχεδιασμός των θερμοκηπίων στους εξώστες στοχεύει στην αξιολόγηση της αποδοτικότητάς τους κατά την περίοδο θέρμανσης. Προκειμένου όμως να βελτιώνεται η αποδοτικότητα των κτιρίων σε όλη τη διάρκεια του έτους θα πρέπει να διασφαλίζεται ότι αυτά δε συμβάλουν στην αύξηση των ψυκτικών φορτίων κατά τη θερινή περίοδο. Για αυτό το λόγο θεωρήθηκε ότι όλοι οι ηλιακοί χώροι που σχεδιάζονται έχουν τη δυνατότητα να απενεργοποιούνται κατά τη θερινή περίοδο με συρόμενα υαλοστάσια.

Τέλος, μετά τον υπολογισμό των απαιτήσεων για θέρμανση και για ψύξη γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων και αξιολόγηση της αναβάθμισης των οικοδομικών τετραγώνων με βάση ενεργειακά, μορφολογικά γεωμετρικά και αισθητικά κριτήρια.

Εικόνα 5:Τρισδιάστατη απεικόνιση του Ο.Τ.1 με τις επεμβάσεις του σεναρίου 3.

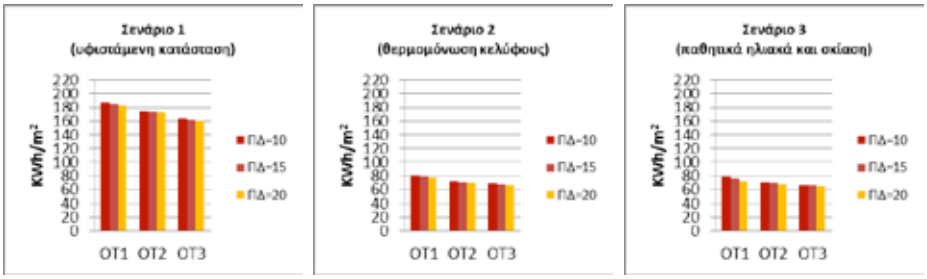
Εικόνα 6:Τρισδιάστατη απεικόνιση του Ο.Τ.2 με τις επεμβάσεις του σεναρίου 3.

Εικόνα 7: Τρισδιάστατη απεικόνιση του Ο.Τ.3 με τις επεμβάσεις του σεναρίου 3 στην περίπτωση πλάτους δρόμου 10 m όπου υπάρχει υποχώρηση του τελευταίου ορόφου.

Εικόνα 8:Τρισδιάστατη απεικόνιση του Ο.Τ.3 με τις επεμβάσεις του σεναρίου 3 στην περίπτωση πλάτους δρόμου 15 ή 20 m όπου δεν υπάρχει υποχώρηση του τελευταίου ορόφου.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

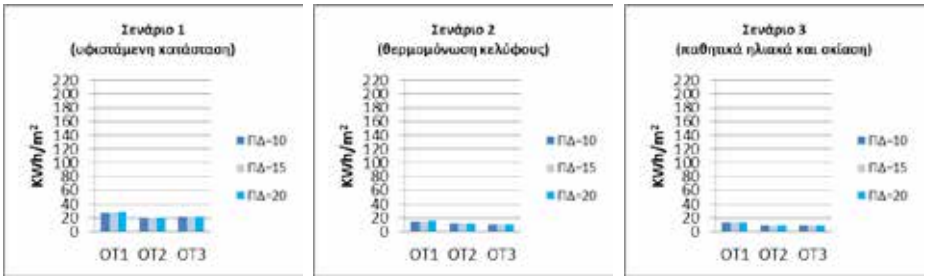
Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τα απαιτούμενα φορτία θέρμανσης, ψύξης καθώς και τα συνολικά φορτία για τα τρία σενάρια και για τα τρία μελετώμενα πλάτη δρόμου, παρουσιάζονται στις εικόνες 9, 10 και 11. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται αφορούν στο σύνολο των απαιτούμενων φορτίων για όλους τους θερμαινόμενους χώρους όλων των κτιρίων του κάθε Ο.Τ. Όπως φαίνεται από τα ιστογράμματα το Ο.Τ.1 (ασυνεχούς μορφής) εμφανίζει τις υψηλότερες τιμές τόσο σε φορτία θέρμανσης όσο και σε φορτία ψύξης και στα τρία σενάρια. Ομοίως, παρατηρείται ότι ανάμεσα στα οικοδομικά τετράφωνα 2 και 3, τα οποία έχουν συνεχή μορφή, το Ο.Τ.2 εμφανίζει δυσμενέστερη συμπεριφορά σε σχέση με το Ο.Τ.3 και για στα τρία διαφορετικά πλάτη δρόμου. Η δυσμενέστερη αυτή συμπεριφορά μπορεί να ερμηνευτεί με βάση το γεγονός ότι το Ο.Τ.1 έχει ασυνεχή μορφή και ως εκ τούτου μεγαλύτερη επιφάνεια εκτεθειμένου κελύφους και άρα η μορφή του οικοδομικού τετραγώνου είναι μία παράμετρος που συμβάλει σε σημαντικό βαθμό στη διαμόρφωση του ενεργειακού προφίλ του οικοδομικού τετραγώνου και δεν μπορεί να εξαλειφθεί ούτε με την προσθήκη θερμομόνωσης ούτε με την προσθήκη παθητικών ηλιακών συστημάτων. Το συμπέρασμα αυτό ενισχύεται και από το γεγονός ότι σε όλες τις περιπτώσεις ευνοϊκότερη ενεργειακή συμπεριφορά εμφανίζει το Ο.Τ.3 το οποίο, εκτός από τη συνεχή μορφή του έχει και μεγαλύτερο ύψος κτιρίων αλλά και μεγαλύτερη δομημένη επιφάνεια. Η πιο συμπαγής δηλαδή μορφή του ευνοεί την ενεργειακή του συμπεριφορά ως προς τη θέρμανση και την ψύξη.



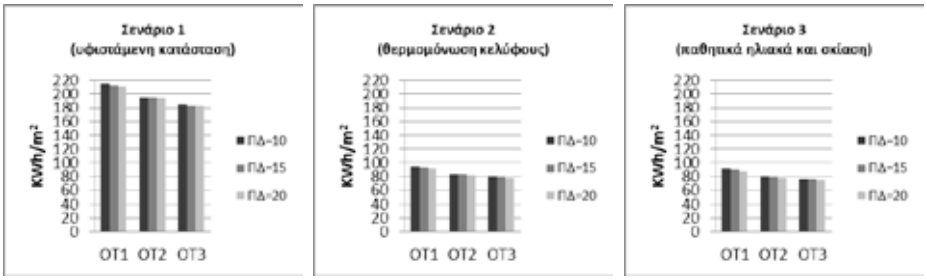
Εικόνα 9: Απαιτούμενα φορτία θέρμανσης για τις τρεις τυπολογίες οικοδομικών τετραγώνων και για τα τρία εξεταζόμενα πλάτη δρόμων στο σενάριο 1 (υφιστάμενη κατάσταση) και στα σενάρια αναβάθμισης 2 (θερμομόνωση κελύφους) και 3 (παθητικά ηλιακά συστήματα και σκίαση).

Για το Ο.Τ.1 διαπιστώνεται ότι η προσθήκη θερμομόνωσης στα κελύφη των κτιρίων μπορεί να βελτιώσει, για πλάτη δρόμων 10, 15 και 20 m, κατά 56,79%, 57,23% και 57,55% αντίστοιχα την απαίτηση σε φορτία θέρμανσης και κατά 48,27%, 47,57%, 46,91% αντίστοιχα τα φορτία ψύξης. Η συνολική απαίτηση σε φορτία βελτιώνεται αντίστοιχα για τα τρία πλάτη δρόμων κατά 55,71%, 55,95% και 56,10%.

Όσον αφορά στην προσθήκη παθητικών ηλιακών συστημάτων (θερμοκηπίων) και σκίασης διαπιστώθηκε ότι βελτιώνει περαιτέρω την απαίτηση σε συνολικά φορτία κατά 3,06%, 3,92% και 6,39% για τα αντίστοιχα πλάτη δρόμων που αναφέρθηκαν παραπάνω.



Εικόνα 10: Απαιτούμενα φορτία ψύξης για τις τρεις τυπολογίες οικοδομικών τετραγώνων και για τα τρία εξεταζόμενα πλάτη δρόμων στο σενάριο 1 (υφιστάμενη κατάσταση) και στα σενάρια αναβάθμισης 2 (θερμομόνωση κελύφους) και 3 (παθητικά ηλιακά συστήματα και σκίαση).



Εικόνα 11: Συνολικά απαιτούμενα φορτία (θέρμανσης και ψύξης) για τις τρεις τυπολογίες οικοδομικών τετραγώνων και για τα τρία εξεταζόμενα πλάτη δρόμων στο σενάριο 1 (υφιστάμενη κατάσταση) και στα σενάρια αναβάθμισης 2 (θερμομόνωση κελύφους) και 3 (παθητικά ηλιακά συστήματα και σκίαση).

Για το Ο.Τ.2 διαπιστώνεται ότι η προσθήκη θερμομόνωσης στα κελύφη των κτιρίων μπορεί να βελτιώσει κατά 58,62%, 58,95% και 59,36%, για πλάτη δρόμων 10, 15 και 20 m αντίστοιχα, την απαίτηση σε φορτία θέρμανσης και κατά 44,03%, 42,88%, 41,85% αντίστοιχα τα φορτία ψύξης. Η συνολική απαίτηση σε φορτία βελτιώνεται αντίστοιχα για τα τρία πλάτη δρόμων κατά 57,08%, 57,23% και 57,45%.

Η προσθήκη παθητικών ηλιακών συστημάτων (θερμοκηπίων) και σκίασης βελτιώνει περαιτέρω την απαίτηση σε συνολικά φορτία κατά 3,99%, 5,16% και 3,21% για τα αντίστοιχα πλάτη δρόμων που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Για το Ο.Τ.3 διαπιστώνεται ότι η προσθήκη θερμομόνωσης στα κελύφη των κτιρίων μπορεί να βελτιώσει κατά 58,21%, 58,28% και 58,42%, για πλάτη δρόμων 10, 15 και 20 m αντίστοιχα, την απαίτηση σε φορτία θέρμανσης και κατά 49,46%, 48,82%, 48,57% αντίστοιχα τα φορτία ψύξης. Η συνολική απαίτηση σε φορτία βελτιώνεται αντίστοιχα για τα τρία πλάτη δρόμων κατά 57,20%, 57,16% και 57,23%.

Η προσθήκη παθητικών ηλιακών συστημάτων (θερμοκηπίων) και σκίασης βελτιώνει περαιτέρω την απαίτηση σε συνολικά φορτία κατά 4,35%, 3,19% και 3,82% για τα αντίστοιχα πλάτη δρόμων που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Από τα παραπάνω, διαπιστώνεται ότι τα οικοδομικά τετράγωνα 2 και 3 (συνεχούς μορφής) βελτιώνουν την ενεργειακή τους συμπεριφορά σε μεγαλύτερο ποσοστό από ότι το Ο.Τ.1 (ασυνεχούς μορφής) κατά την προσθήκη θερμομονωτικής προστασίας. Όμως, θα πρέπει να αναφερθεί ότι με δεδομένο ότι το Ο.Τ.1 εμφανίζει αρχικά μεγαλύτερη απαίτηση σε φορτία θέρμανσης και ψύξης λόγω της ασυνεχούς του μορφής (μεγαλύτερη εκτεθειμένη επιφάνεια κελύφους) εξακολουθεί ακόμα και μετά την προσθήκη θερμομονωτικής προστασίας να εμφανίζει δυσμενέστερο ενεργειακό προφίλ από τα συνεχή οικοδομικά τετράγωνα (Ο.Τ.2 και Ο.Τ.3).

Επίσης, διαπιστώνεται ότι το πλάτος του δρόμου αποτελεί σημαντική παράμετρο για τη διαμόρφωση της ενεργειακής συμπεριφοράς του οικοδομικού τετραγώνου αλλά και για την αποδοτικότητα των παθητικών ηλιακών συστημάτων.

Συγκεκριμένα, για το Ο.Τ.1 η αύξηση του πλάτους του δρόμου από 10 σε 15 m διαπιστώθηκε ότι στο σενάριο 1 βελτιώνει την ενεργειακή συμπεριφορά του οικοδομικού τετραγώνου κατά 0,9% και η αύξηση από 15 σε 20 m κατά 0,5%. Στο σενάριο 2 η διαφορά αυτή είναι ακόμα πιο σημαντική (1,4% και 0,9% αντίστοιχα) και στο σενάριο 3 το ποσοστό βελτίωσης είναι ακόμα μεγαλύτερο (2,3% και 3,4% αντίστοιχα).

Για το Ο.Τ.2 η αύξηση του πλάτους του δρόμου από 10 σε 15 m διαπιστώθηκε ότι στο σενάριο 1 βελτιώνει την ενεργειακή συμπεριφορά του οικοδομικού τετραγώνου κατά 0,3% και η αύξηση από 15 σε 20 m κατά 0,4%. Στο σενάριο 2 η διαφορά αυτή είναι ακόμα πιο σημαντική (0,6% και 0,9% αντίστοιχα) και στο σενάριο 3 το ποσοστό βελτίωσης είναι ακόμα μεγαλύτερο (1,8% και 1,9% αντίστοιχα).

Για το Ο.Τ.3 η αύξηση του πλάτους του δρόμου από 10 σε 15 m διαπιστώθηκε ότι στο σενάριο 1 βελτιώνει την ενεργειακή συμπεριφορά του οικοδομικού τετραγώνου κατά 1,3% και η αύξηση από 15 σε 20 m κατά 0,4%. Στο σενάριο 2 κατά 1,2% και 0,6% αντίστοιχα) και στο σενάριο 3 το ποσοστό βελτίωσης είναι 0,03% και 1,2% αντίστοιχα.

Επομένως, διαπιστώνεται ότι για το Ο.Τ.1 και το Ο.Τ.2 η επίδραση του πλάτους του δρόμου στην ενεργειακή συμπεριφορά του αστικού οικοδομικού τετραγώνου είναι πιο μεγάλη όταν τα κτιριακά κελύφη είναι αναβαθμισμένα (σενάριο 2 και σενάριο 3). Για το Ο.Τ.3 διαπιστώνεται ότι το πλάτος του δρόμου στην περίπτωση των αναβαθμισμένων κελυφών δεν επηρεάζει σημαντικά την ενεργειακή συμπεριφορά του οικοδομικού τετραγώνου, ιδιαίτερα κατά την μεταβολή του πλάτους από 10 σε 15 m, γεγονός που μπορεί να ερμηνευτεί λαμβάνοντας υπόψη ότι η υποχρέωση από την πολεοδομική νομοθεσία της υποχώρησης του τελευταίου ορόφου και η δημιουργία ρετιρέ ή η ένταξη σε ιδεατό στερεό ουσιαστικά προστατεύει από την μείωση των θερμικών ηλιακών κερδών στα μικρότερα πλάτη δρόμων. Επίσης, για πλάτος δρόμου 10 m η δυνατότητα τοποθέτησης ηλιακών χώρων στην υποχώρηση του τελευταίου ορόφου συμβάλει σημαντικά στην βελτίωση της ενεργειακής συμπεριφοράς του οικοδομικού τετραγώνου καθώς, από τη μία οι ηλιακοί χώροι μπορούν να έχουν μεγαλύτερο εμβαδό από ότι οι ηλιακοί χώροι που τοποθετούνται στους εξώστες (και άρα μπορούν να είναι περισσότερο αποδοτικοί και από την άλλη η κεκλιμένη επιστέγασή τους με διαφανές υαλοστάσιο συμβάλει στην καλύτερη αξιοποίηση της διαθέσιμης ηλιακής ακτινοβολίας.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα μελέτη έχει ως στόχο να συμβάλει στη διαμόρφωση στρατηγικών για την ενιαία αντιμετώπιση του ζητήματος της ενεργειακής αναβάθμισης. Η αποσπασματική αντιμετώπιση του ζητήματος ανά κτίριο ή ανά κτιριακή μονάδα έχει ως συνέπεια τη διαιώνιση της χαμηλής αισθητικής ποιότητας του δομημένου περιβάλλοντος. Η προσέγγιση του ζητήματος της ενεργειακής αναβάθμισης στην κλίμακα του οικοδομικού τετραγώνου μπορεί να συμβάλει σημαντικά όχι μόνο σε περισσότερο αποδοτικές επεμβάσεις όσον αφορά στην κατανάλωση ενέργειας αλλά και στη βελτίωση της αισθητικής ποιότητας της πόλης. Από την έρευνα διαπιστώθηκε ότι η μορφή και η γεωμετρία του αστικού οικοδομικού τετραγώνου, καθώς και τα πλάτη των δρόμων που το περιβάλλουν αποτελούν καθοριστικές παραμέτρους για την αποδοτικότητα των επεμβάσεων ενεργειακής αναβάθμισης. Η ανάλυση τριών διαφορετικών τυπολογιών οικοδομικών τετραγώνων οδήγησε στο συμπέρασμα ότι τα πιο συμπαγή οικοδομικά τετράγωνα εμφανίζουν βελτιωμένη ενεργειακή συμπεριφορά και, ακόμα και στις περιπτώσεις ενεργειακής αναβάθμισης, η συμπαγής δομή συμβάλει στη διαμόρφωση βελτιωμένου ενεργειακού προφίλ. Η ενεργειακή αναβάθμιση μέσω παθητικών συστημάτων μπορεί να συμβάλει σημαντικά στην αξιοποίηση των θερμικών ηλιακών κερδών και στην ταυτόχρονη συνολική αναβάθμιση της πόλης.

ΧΡΗΜΑΤΟΔΟΤΗΣΗ

Το έργο συγχρηματοδοτείται από την Ελλάδα και την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού, Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση στο πλαίσιο του έργου «Επεμβάσεις Αειφορίας για την Ενεργειακή και Αισθητική αναβάθμιση της πόλης» (MIS 5047805).

This research is co-financed by Greece and the European Union (European Social Fund- ESF) through the Operational Programme «Human Resources Development, Education and Lifelong Learning 2014-2020» in the context of the project “Sustainable interventions for the energy and aesthetic improvement of the city” (MIS 5047805).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Randall, T., ed., 2005, Sustainable urban design: an environmental approach, Spon Press, London.

[2] Salat, S., 2009, “Energy loads, CO_2 emissions and building stocks: morphologies, typologies, energy systems and behaviour,” Build. Res. Inf. 37 pp. 598–609.

[3] Passive House Institute, 2018, Ανάκτηση από https://passiv.de/en/02_informations/02_passive-house-requirements/02_passive-house-requirements.htm

[4] ZERO CITIES PROJECT, 2018, Ανάκτηση από http://architecture2030.org/wpcontent/uploads/2016/04/ZeroCitiesProject.pdf

[5] CLUE, 2018, Ανάκτηση από http://www.clue-project.eu/

[6] Residential Renovation towards nearly zero energy CITIES, (2018), Ανάκτηση από http://r2cities.eu/

[7] Τσιριγώτη, Δ. (2016), Διερεύνηση της επίδρασης της αστικής μορφολογίας στην ενεργειακή συμπεριφορά του κτιριακού κελύφους με αξιολόγηση των γεωμετρικών παραμέτρων του αστικού οικοδομικού τετραγώνου. (Διδακτορική διατριβή). Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

[8] US Department of Energy website: Energy Plus, Energy Simulation Software http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data3.cfm/region=6_europe_wmo_region_6/country=GRC/cname=Greece, Original Source Data (c) 2001 American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), Inc., Atlanta, GA, USA. www.ashrae.org

[9] Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1, 2017, Αναλυτικές εθνικές προδιαγραφές παραμέτρων για τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης κτηρίων και την έκδοση του πιστοποιητικού ενεργειακής απόδοσης. Υπουργείο Περιβάλλοντος Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής, Ειδική Γραμματεία Επιθεώρησης Περιβάλλοντος και Ενέργειας, Ειδική Υπηρεσία Επιθεωρητών Ενέργειας, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας.

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΘΕΡΜΟΦΥΣΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ & ΑΕΡΙΖΟΜΕΝΩΝ ΟΨΕΩΝ

Μαρία Συμεωνίδου [1*], Παναγιώτα Αντωνιάδου [1], Έλλη Κυριάκη [1], Ευφροσύνη Γιαμά [1], Άγις Μ. Παπαδόπουλος [1]

[1] Εργαστήριο Κατασκευής Συσκευών Διεργασιών, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη,
e-mail: mmsymeonid@auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ανάγκη βελτίωσης των εσωκλιματικών συνθηκών, χωρίς όμως την ενεργειακή επιβάρυνση των κατασκευών, είναι πλέον αδήριτη. Όπως περιγράφεται από το ισχύον εθνικό και ευρωπαϊκό νομοθετικό πλαίσιο, τα επίπεδα κατανάλωσης των κτιριακών κατασκευών, αντιστοιχώντας στο 39% της τελικής κατανάλωσης ενέργειας, πρέπει να μειωθούν. Στο πλαίσιο αυτό, πλήθος μέτρων και πολιτικών οφείλουν να εφαρμοστούν εστιάζοντας στη βελτίωση τόσο του ενεργειακού προφίλ των κατασκευών όσο και στις επικρατούσες συνθήκες εσωτερικού περιβάλλοντος. Ιδιαίτερα, το κέλυφος έχει κεντρικό ρόλο στη διαμόρφωση του ενεργειακού ισοζυγίου του κτιρίου, καθώς το σύνολο των επιμέρους μελετών σχετίζονται άμεσα με τα θερμοφυσικά χαρακτηριστικά του. Υπό αυτήν την έννοια, καθίσταται αδύνατη η εκπόνησή οποιαδήποτε μελέτης δίχως να έχει προηγηθεί η σε βάθος κατανόηση της λειτουργίας του κελύφους, η οποία δεν μπορεί να επιτευχθεί με μερικά μόνο μεγέθη, αλλά πρέπει να περιλαμβάνει στοιχεία θερμοφυσικών ιδιοτήτων για τα επιμέρους υλικά, τη διαστρωμάτωσή τους, λεπτομέρειες για τη γεωμετρία σε συνάρτηση και με τον προσανατολισμό, το χρώμα, αλλά και την επίδραση από εξωγενείς παράγοντες, όπως η σκίαση ή η έκθεση σε ανέμους κλπ.

Η χρήση συστημάτων όπου το εξωτερικό στοιχείο (πλάκες μαρμάρου ή πέτρας, κεραμικά πλακίδια, υαλοπετάσματα, μεταλλικά, ξύλινα ή άλλα τεχνητά πάνελ) είναι στερεωμένο σε σκελετό ή σε μεμονωμένα στηρίγματα και δεν έρχεται σε επαφή με την εξωτερική θερμομόνωση του δομικού στοιχείου, αποτελεί μια κατασκευαστική προσέγγιση που επιλέγεται συχνά ιδιαίτερα σε περιπτώσεις κτιρίων γραφείων. Συγκεκριμένα, η τεχνική αυτή προσέγγιση χαρακτηρίζεται ως η πλέον αποτελεσματική για τις περιπτώσεις εφαρμογής εξωτερικών επενδύσεων στο κτίριο. Συγκεκριμένα, η ύπαρξη διακένου μεταξύ του υλικού επικάλυψης και της εξωτερικής επιφάνειας του κτιριακού κελύφους παρουσιάζει πολλαπλά πλεονεκτήματα έναντι της συμβατικής εφαρμογής με συγκόλληση ή κάρφωμα της επένδυσης επάνω στο σκελετό. Τα πλεονεκτήματα αυτά είναι: ο έλεγχος υγρασίας, η προστασία του θερμομονωτικού υλικού της κατασκευής, ο έλεγχος της εσωτερικής θερμοκρασίας καθώς και η ηχομόνωση.

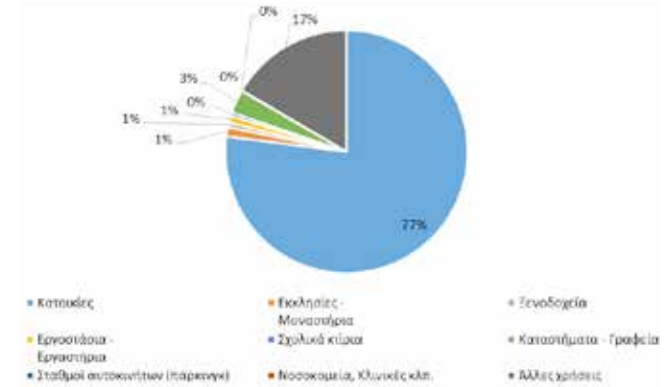
Λαμβάνοντας υπόψη το σύνολο των ανωτέρω στοιχείων είναι αναγκαία η περαιτέρω διερεύνηση και αξιολόγηση της λειτουργίας συμβατικών και αεριζόμενων όψεων. Στο πλαίσιο αυτό, διεξήχθη η συγκεκριμένη έρευνας έχοντας ως στόχο αρχικά, την καταγραφή του state of the art της λειτουργίας των αεριζόμενων όψεων σε κτίρια του τριτογενούς τομέα καθώς και την αξιολόγηση και τον προσδιορισμό των θερμοφυσικών ιδιοτήτων συμβατικών και αεριζόμενων όψεων.

Λέξεις Κλειδιά: εσωκλιματικές συνθήκες, μεσογειακό κλίμα, αεριζόμενες όψεις, θερμοφυσικά χαρακτηριστικά

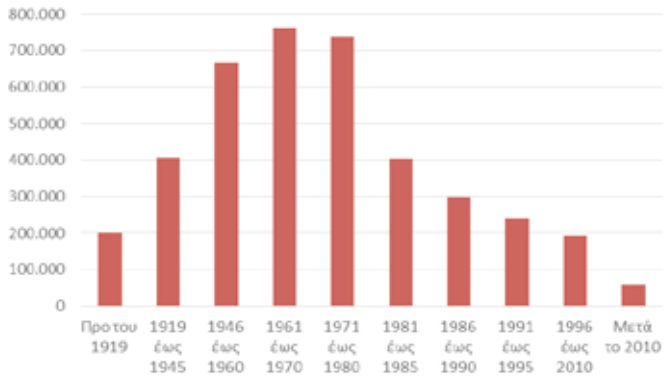
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η λειτουργία των κτιρίων έχει οικονομικές, περιβαλλοντικές και κοινωνικές παραμέτρους. Βασικό κριτήριο για την κατηγοριοποίηση και ανάλυση της συμπεριφοράς των κτιρίων έχει το είδος της λειτουργίας τους. Λαμβάνοντας υπόψη το στοιχείο αυτό, καθώς και την εθνική νομοθεσία, προκύπτει πως το κτιριακό δυναμικό αποτελείται από τα κτίρια κατοικιών και τα κτίρια του τριτογενούς τομέα, που στη διεθνή βιβλιογραφία συναντώνται με τον όρο 'non-residential buildings'. Στην πρώτη κατηγορία κατατάσσεται το σύνολο των κατοικιών, που διακρίνονται σε μονοκατοικίες και πολυκατοικίες, ενώ στη δεύτερη ανήκουν κτίρια γραφείων, νοσοκομεία και μονάδες παροχής υπηρεσιών υγείας, κτίρια εκπαίδευσης, ξενοδοχεία και χώροι εστίασης, κτίρια που στεγάζουν αθλητικές εγκαταστάσεις και εμπορικά κτίρια (εγκαταστάσεις υπηρεσιών χονδρικού και λιανικού εμπορίου) [1], [2].

Λαμβάνοντας υπόψη τα στοιχεία της απογραφής του 2011, το προφίλ του κτιριακού αποθέματος στην Ελλάδα παρουσιάζεται στα γραφήματα 1 και 2 [3]. Από το σύνολο των στοιχείων αυτών, προκύπτει πως το κτιριακό απόθεμα της Ελλάδας είναι σχετικά γερασμένο με την πλειοψηφία των κτιρίων να έχουν κατασκευαστεί προ του 1980 και να μην ακολουθούν τις απαιτήσεις θερμομόνωσης που προέβλεπε ο πρώτος Κανονισμός Θερμομόνωσης Κτιρίων (ΚΘΚ). Απόρροια της συνθήκης αυτής είναι η καταγραφή σημαντικών απωλειών θερμότητας. Με βάση τη λειτουργία των κτιρίων, παρατηρείται πως κυρίαρχη θέση στην ελληνική επικράτεια, ως προς το πλήθος, κατέχουν τα κτίρια κατοικιών, με τα ξενοδοχεία και τα κτίρια γραφείων να ακολουθούν.

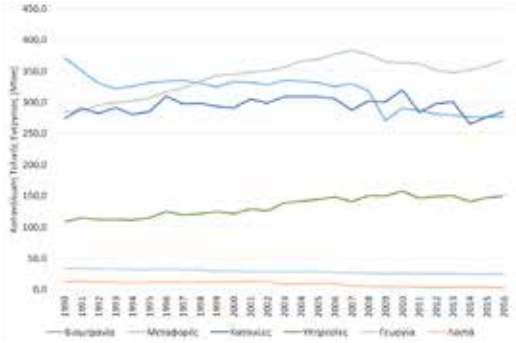


Εικόνα 1: Ποσοστό πλήθους κτιρίων ανά κατηγορία χρήσης σύμφωνα με την απογραφή του 2011 [3]

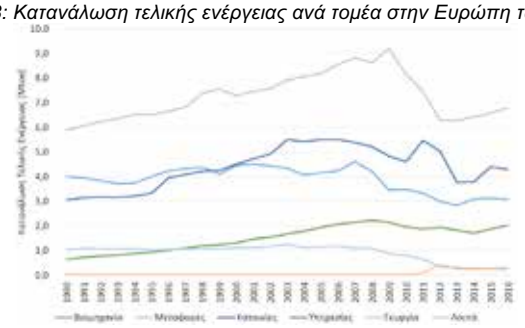


Εικόνα 2: Πλήθος κτιρίων ανά έτος κατασκευής σύμφωνα με την απογραφή του 2011 [3]

Ιδιαίτερα, σε ό,τι αφορά την κατανάλωση ενέργειας σε εθνικό επίπεδο, καταγράφεται ιδιαίτερα υψηλή συμμετοχή στην κατανάλωση τελικής ενέργειας, με ποσοστά τα οποία αγγίζουν για το 2016, το 40%. Στα κτίρια κατοικιών αντιστοιχούν οι 26 ποσοστιαίες μονάδες, ενώ στα κτίρια του τριτογενούς τομέα οι 14. Είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρον να επισημανθεί, ότι τα ποσοστά αυτά είναι αντίστοιχα με αυτά της Ευρώπης των 28 μελών [4]. Λαμβάνοντας υπόψη τη μεταβολή της κατανάλωσης τελικής ενέργειας από το 1990 μέχρι και το 2016 παρατηρείται πτωτική τάση για το σύνολο των τομέων πλην των μεταφορών και των υπηρεσιών, για την Ευρώπη των 28 μελών (Εικόνα 3) αλλά και για την Ελλάδα (Εικόνα 4). Ιδιαίτερα, για το σύνολο των χωρών μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης καταγράφεται σταθερή μείωση των επιπέδων κατανάλωσης τελικής ενέργειας στις κατοικίες, τη βιομηχανία, τη γεωργία και τους άλλος κλάδους, ενώ στον τομέα των μεταφορών και υπηρεσιών σημειώνεται αύξηση στα επίπεδα κατανάλωσης τελικής ενέργειας. Ιδιαίτερα, στην περίπτωση της Ελλάδας, το προφίλ κατανάλωσης τελικής ενέργειας διαφέρει, ως προς την ιστορική του εξέλιξη, με το σύνολο των τομέων να σημειώνουν αύξηση της κατανάλωσης τους μέχρι το 2008-2009 και έντονη πτώση από τότε και μέχρι το 2014, ενώ στη συνέχεια αρχίζει να σημειώνεται και πάλι μια σταδιακή άνοδος των επιπέδων κατανάλωσης. Κύρια αιτία της έντονης πτώσης που σημειώθηκε εκείνη την περίοδο αποτελεί η έντονη οικονομική ύφεση.



Εικόνα 3: Κατανάλωση τελικής ενέργειας ανά τομέα στην Ευρώπη των 28 [4]



Εικόνα 4: Κατανάλωση τελικής ενέργειας ανά τομέα στην Ελλάδα [4]

Παρατηρώντας το ενεργειακό προφίλ του κτιριακού τομέα διαπιστώνεται η ανάγκη βελτίωσης της απόδοσης του κτιριακού αποθέματος τόσο στο σύνολό του, όσο και στις επιμέρους κατηγορίες του. Η ανάγκη αυτή, σε συνδυασμό με τις επιταγές για βιώσιμη και αειφόρο ανάπτυξη, θα καθορίσει το μέλλον του κατασκευαστικού τομέα. Στο πλαίσιο αυτό, εφαρμόζονται μέτρα που σχετίζονται με τη μείωση της εμπεριεχόμενης ενέργειας στο κτίριο, την ανακύκλωση δομικών υλικών, την περιβαλλοντική αποτίμηση και την ευεξία των χρηστών. Εκτός, όμως, από την εφαρμογή μέτρων για την αειφορία έχουν θεσπιστεί και μοντέλα αξιολόγησης προς την κατεύθυνση αυτή, με χαρακτηριστικό παράδειγμα τα ενεργειακά πιστοποιητικά και τα συστήματα περιβαλλοντικής αξιολόγησης (όπως τα LEED και BREEAM), τα οποία έχουν ως στόχο την αξιολόγηση των υφιστάμενων συνθηκών και τον προσδιορισμό δράσεων για τη βελτίωσή τους. Έχοντας ως στόχο τη μείωση του ενεργειακού και περιβαλλοντικού αποτυπώματος, πλήθος ευρωπαϊκών και εθνικών κανονισμών έχουν θεσπιστεί προς αυτήν την κατεύθυνση.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Βασικός στόχος της συγκεκριμένης μελέτης είναι ο προσδιορισμός των θερμοφυσικών ιδιοτήτων διαφόρων όψεων που μπορούν να βρουν εφαρμογή στα κτίρια. Για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων αυτών αρχικά θα παρουσιαστούν οι μετρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων των συμβατικών λύσεων στις όψεις. Στη συνέχεια, θα πραγματοποιηθεί σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτών με τις εκτιμήσεις των βελτιωμένων επιδόσεων που αναμένονται από την εφαρμογή των αεριζόμενων όψεων και αποτελεί επόμενο στάδιο της έρευνας. Κρίνεται, λοιπόν, απαραίτητο να αναλυθεί αρχικά η βιβλιογραφική επισκόπηση των βασικών χαρακτηριστικών των αεριζόμενων όψεων και στη συνέχεια να αποτυπωθούν να αποτελέσματα που προέκυψαν από τις μετρήσεις των συμβατικών όψεων.

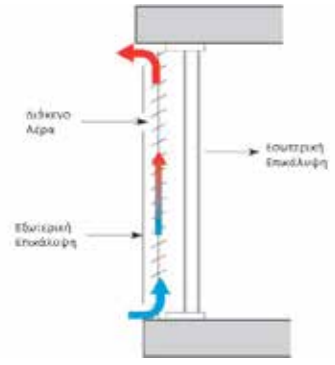
2.1. Βιβλιογραφική επισκόπηση αεριζόμενων όψεων

Τα παθητικά συστήματα που εφαρμόζονται στα κτίρια είναι ένας βασικός πυλώνας βελτίωσης της ενεργειακής τους απόδοσης. Ένα παθητικό κτίριο είναι αυτό στο οποίο οι εσωτερικές συνθήκες προσαρμόζονται βελτιώνοντας κυρίως τη δομή, τον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό, τα δομικά στοιχεία του κτιρίου και όχι τη συμβατική θέρμανση και ψύξη [5]. Μεταξύ των παθητικών λύσεων, η ενσωμάτωση των αεριζόμενων όψεων στην κτιριακή κατασκευή είναι μία τεχνολογία που, εφόσον είναι σωστά μελετημένη, συμβάλει αποδεδειγμένα στην καλύτερη ενεργειακή απόδοση των κτιρίων, αλλά και στη βελτίωση της θερμικής άνεσης εντός αυτών. Οι αεριζόμενες όψεις αποτελούν όψεις που κατασκευάζονται από διαδοχικές στρώσεις επικάλυψης, με ένα διάκενο αέρα να εντοπίζεται πριν το καθαυτό κέλυφος[6]. Το κίνητρο που οδήγησε στη χρήση των αεριζόμενων όψεων είναι η ανάγκη συνδυασμού των ενεργειακών αναγκών του κτιρίου με τις καινοτομίες σχεδιασμού της εξωτερικής επιφάνειάς του [7]. Πιο συγκεκριμένα, το διάκενο είναι αυτό το οποίο επιτρέπει την κυκλοφορία του αέρα δημιουργώντας μία περαιτέρω θερμική ενίσχυση του κελύφους και τελικά βέλτιστη της ενεργειακής απόδοσης της κατασκευής. Ο αέρας εντός του διακένου, θερμαίνεται κυρίως από την ηλιακή ακτινοβολία και διοχετεύεται στο εξωτερικό περιβάλλον από την κορυφή του διακένου. Στις φυσικά αεριζόμενες όψεις, ο αέρας διοχετεύεται συνήθως μέσω ανοιγμάτων τα οποία σχεδιάζονται στην κατώτερη παρειά της όψης, ώστε στη συνέχεια ο αέρας να θερμανθεί στο διάκενο και ως ελαφρύτερος να εξέλθει από το υψηλότερο σημείο [8]. Στην Εικόνα 5 παρουσιάζεται μία περιγραφή των αεριζόμενων όψεων, οι οποίες αποτελούνται από τα εξής βασικά μέρη:

- ***Εξωτερική επικάλυψη***: Συνήθως αποτελείται από υαλοπίνακα ο οποίος μπορεί να καλύπτει είτε μερικώς είτε και πλήρως την όψη του κτιρίου [9]. Δύναται να χρησιμοποιηθούν και άλλα υλικά με σκοπό την προστασία αλλά και την αισθητική του κτιρίου.

- ***Διάκενο Αέρα***: Μεταξύ των δύο επικαλύψεων, παρουσιάζεται το διάκενο αέρα το οποίο στοχεύει στον αερισμό των όψεων, είτε φυσικά, είτε μηχανικά υποβοηθούμενου. Το μέγεθος του διακένου κυμαίνεται συνήθως από 10cm μέχρι 2m [10], ώστε να επιτυγχάνεται τόσο η ενεργειακή βελτιστοποίηση όσο και η ευκολία συντήρησης των αεριζόμενων όψεων.

- ***Εσωτερική επικάλυψη***: Αποτελεί μονωμένη διατομή η οποία δεν είναι απαραίτητο να αποτελείται μόνο από υαλοπίνακα.



Εικόνα 5: Βασική Δομή Αεριζόμενης Όψης, Κυρίως Μέρη [6]

Εξωτερική Επικάλυψη

Όπως γίνεται κατανοητό σε περιπτώσεις αεριζόμενης όψης με εξωτερική τελική στρώση υαλοπίνακα, η εξωτερική επικάλυψη και οι διαφορετικές ιδιότητες αυτής ως προς τη μετάδοση θερμότητας, τη διαπερατότητα φωτός και την απορροφητικότητα της θερμότητας μπορούν να οδηγήσουν σε μείωση της πρόσληψης θερμότητας μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας [11]. Γι' αυτό τον λόγο, απαιτείται η επιλογή του κατάλληλου συνδυασμού αεριζόμενης όψης και κελύφους. Η χρήση του γυαλιού φαίνεται να είναι η πιο κοινή λύση κατά την κατασκευή της εξωτερικής επικάλυψης της αεριζόμενης όψης. Η γυάλινη επιφάνεια αποτελεί τόσο σχεδιαστική επιλογή λόγω της διαπερατότητας της όσο και κατασκευαστική λόγω της απόδοσής της ειδικά κατά τη χειμερινή περίοδο, καθώς αυξάνει τη χρονική διάρκεια αξιοποίησης του φυσικού φωτισμού οδηγώντας στη μείωση του κόστους και την αύξηση της φυσικής θέρμανσης [12]. Το γυαλί που χρησιμοποιείται στην εξωτερική επιφάνεια είναι συνήθως ανθεκτικό, σκληρό γυαλί υψηλής ποιότητας ώστε να αποφεύγεται η φθορά του [13]. Τα υαλοπετάσματα ή αλλιώς τα πλαίσια υαλοπινάκων είναι η πιο συνηθισμένη επιλογή που χαρακτηρίζεται από αυξημένη αντοχή και υψηλή αντίσταση στον άνεμο [6]. Άλλες επιλογές που συναντώνται συχνά είναι τα διάτρητα μεταλλικά φύλλα και τα σύνθετα πάνελ αλουμινίου [14]. Η επιλογή των τελευταίων υλικών μπορεί να πραγματοποιηθεί με κριτήρια την ευκολότερη διαμόρφωσή τους, που ισχύει για τη μεταλλική επιφάνεια σε σχέση με τη γυάλινη, την ποικιλία χρωμάτων και σχεδιαστικών επιλογών, την ενίσχυση της επιφάνειας με υλικά αντοχής ώστε να αυξηθεί η διάρκεια ζωής τους, την αντοχή σε φθορές και βανδαλισμούς και την ευκολία καθαρισμού τους. Η πέτρα και το ξύλο αποτελούν δύο επιπλέον λύσεις, οι οποίες επιλέγονται κυρίως για διακοσμητικούς λόγους και όχι λόγω των θερμοφυσικών επιδόσεων που μπορούν να επιφέρουν. [6].

Διάκενο Αέρα

Το διάκενο αέρα είναι η κύρια διαφοροποίηση των αεριζόμενων όψεων σε σχέση με τις συμβατικές. Ο κατάλληλος σχεδιασμός του διακένου, αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες που οδηγούν στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και στην αναβάθμιση του κτιρίου. Αντιθέτως, ένας λανθασμένος σχεδιασμός διακένου, ενέχει κινδύνους σχετικά με την έλλειψη άνεσης εντός του κτιρίου και την αύξηση, αντί της επιδιωκόμενης μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας [15]. Το μέγεθος του πάχους προκύπτει έπειτα από τη μελέτη ποικίλων παραγόντων που σχετίζονται με το διάκενο των αεριζόμενων όψεων, όπως είναι η ευκολία συντήρησης και καθαρισμού της όψης, ο επαρκής χώρος για συσκευές σκίασης και η ευκολότερη πρόσβαση στο διάκενο. Το πάχος του διακένου έχει άμεσες συνέπειες στην ποσότητα της ηλιακής θερμότητας που μεταφέρεται μέσω του διακένου στο εσωτερικό του κτιρίου, στη θερμοκρασία της αεριζόμενης όψης, αλλά και στον επιτυγχανόμενο αερισμό [16]. Η έρευνα των αεριζόμενων όψεων έχει εστιάσει στο μέγεθος του διακένου και πιο συγκεκριμένα στο πάχος του, το οποίο κυμαίνεται μεταξύ 10cm και 2m [10].

Αποτελέσματα ερευνών [15], [16] απέδειξαν πως ένα σχετικά μικρότερο διάκενο μπορεί να συμβάλλει σε εντονότερη κίνηση του αέρα, οδηγώντας σε εντονότερο φαινόμενο ελκυσμού, σε σχέση με ένα φαρδύτερου πάχους διάκενο. Αντιθέτως, σε μεγαλύτερα πάχη (μεγαλύτερα του ενός μέτρου) παρατηρείται εξασθένιση του φαινομένου του ελκυσμού και κατά συνέπεια η θερμοκρασία εντός του κτιρίου αυξάνεται. Συμπεραίνεται λοιπόν, πως ανάλογα με την τοποθεσία του κτιρίου και τις επικρατούσες κλιματικές συνθήκες, ο σχεδιασμός των αεριζόμενων όψεων διαφοροποιείται ως προς το πάχος του διακένου, ώστε να επιτευχθεί το βέλτιστο ενεργειακό αποτέλεσμα. Ωστόσο, ένα πάχος διακένου μεταξύ 0,7m και 1,2m φαίνεται να είναι η βέλτιστη επιλογή, ώστε να μπορεί να προσαρμοστεί τόσο στην απαίτηση εξαγωγής του αέρα όσο και στη μετάδοση θερμότητας εντός του κτιρίου. Τόσο για το πάχος όσο και για το ύψος του διακένου συσχετίζοντας την απόσταση από την κατώτερη προς την ανώτερη είσοδο και έξοδο του αέρα, προκύπτουν περιορισμοί, αποσκοπώντας στη βέλτιστη ενεργειακή απόδοση και στον ιδανικό ρυθμό αερισμού. Μεγαλύτερο ύψος διακένου συνεπάγεται εντονότερη κίνηση της ροής αέρα εξαιτίας της αύξησης της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δύο μερών και συνεπώς μεγαλύτερη εναλλαγή του αέρα μεταξύ των εσωτερικών μερών του κτιρίου, ιδιαίτερα των υψηλότερων. Συνεπώς, το ύψος του διακένου θα πρέπει να εκτείνεται σε μέγεθος τουλάχιστον μεγαλύτερο από δύο κτιριακούς ορόφους, ώστε η διαφορά της πίεσης που επιτυγχάνεται να είναι επαρκής για τον απαιτούμενο φυσικό αερισμό του.

Εσωτερική Επικάλυψη

Η θερμική συμπεριφορά και απόδοση της αεριζόμενης όψης εξαρτάται τόσο από την εξωτερική όσο και από την εσωτερική επικάλυψη καθώς και από τον τύπο των στρώσεων που την απαρτίζουν. Γι' αυτόν τον λόγο, η επιλογή της εσωτερικής στρώσης θα πρέπει να γίνεται με κριτήριο την υψηλή θερμική της μάζα [6]. Δύο από τα επικρατέστερα υλικά που χρησιμοποιούνται στην εσωτερική επιφάνεια φαίνεται να είναι το γυαλί και το σκυρόδεμα [16]. Το γυαλί, ωστόσο, είναι το υλικό που συνιστάται για την εσωτερική επιφάνεια λόγω των υψηλότερων θερμοκρασιών που μπορούν να αναπτυχθούν σε αυτό. Επομένως, η εσωτερική επιφάνεια δε διαφέρει κατά πολύ από τη συμβατική καθώς πρόκειται για ένα αδιαφανές ή διαφανές δομικό στοιχείο, σταθερό ή με ανοίγματα. Όπως διατυπώθηκε, το γυαλί είναι το επικρατέστερα υλικό που επιλέγεται στις αεριζόμενες όψεις τόσο για την κατασκευή της εξωτερικής όσο και της εσωτερικής επιφάνειας. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί, [16] η πιο κοινή πρακτική κατά τον σχεδιασμό των επικαλύψεων είναι η επιλογή μονού υαλοπίνακα για την εξωτερική επιφάνεια και διπλού για την εσωτερική. Στις φυσικά αεριζόμενες όψεις η επιλογή αυτή είναι η πιο αποτελεσματική καθώς επιτυγχάνεται καλύτερη ροή αέρα μέσω της αύξησης της θερμοκρασίας εντός του διακένου. Ο διπλός υαλοπίνακας στην εσωτερική επιφάνεια συμβάλει στον καλύτερο έλεγχο της ανακλώμενης ακτινοβολίας, ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή μετάδοση θερμότητας της όψης [6]. Η προαναφερόμενη προσέγγιση φαίνεται να επιβεβαιώνεται και μέσω διαφόρων μοντέλων βελτιστοποίησης για την επιλογή των κατάλληλων υλικών των επιφανειών. Παρ' όλα αυτά, δεν είναι λίγες οι περιπτώσεις όπου σε υφιστάμενα κτίρια προσαρτώνται όψεις με στόχο τη βελτίωση της ενεργειακής τους απόδοσης.

2.2. Υπολογισμός και Εργαστηριακοί Έλεγχοι – Μετρήσεις Θερμοφυσικών Ιδιοτήτων

Στην συνέχεια, παρουσιάζεται το σύνολο των εργαστηριακών μετρήσεων που διενεργήθηκαν, ώστε να προσδιοριστούν οι θερμοφυσικές ιδιότητες συμβατικών συστημάτων εξωτερικής θερμομόνωσης, ενώ σε επόμενο στάδιο της μελέτης θα πραγματοποιηθεί και ολοκληρωμένη περιβαλλοντική αξιολόγησή τους.

Κατά τον προσδιορισμό των θερμοφυσικών ιδιοτήτων, πραγματοποιήθηκε μια σε βάθος ανάλυση των προς εφαρμογή υλικών, αποτυπώνοντας τις ιδιότητες και τα πλεονεκτήματα τους. Το σύνολο των παραμέτρων που προσδιορίστηκαν, αποτυπώνουν μια αρχική εικόνα απόδοσης των υφιστάμενων προς εφαρμογή λύσεων καθώς περιγράφουν τις ιδιαιτερότητες τους, αποτελώντας τη βάση για τη βελτίωση της ενεργειακής και περιβαλλοντικής εικόνας των κατασκευών. Ένας επιπρόσθετος στόχος της εν εξελίξει μελέτης, είναι η περιβαλλοντική αξιολόγηση των υλικών αλλά και η μελέτη δυνατότητας μείωσης της θερμοκρασίας του μικροκλίματος και της σημειακής ρύπανσης με τη χρήση νέων λύσεων ευφυών όψεων στα κτίρια. Με αυτό τον τρόπο θα μελετηθεί και η επίδραση των νεών αεριζόμενων όψεων στο φαινόμενο της θερμικής αστικής νησίδας. Κρίνεται λοιπόν απαραίτητο να πραγματοποιηθεί μια αρχική αξιολόγηση σε εργαστηριακό επίπεδο των συμβατικών όψεων για τα κτίρια και ακολούθως σύγκριση αυτών με τα αντίστοιχα των νέων αεριζόμενων ευφυών λύσεων.

Στο πλαίσιο της μελέτης, πραγματοποιήθηκε καταγραφή των θερμοφυσικών δεικτών των υπό ανάλυση διατομών καθώς και θερμογράφησή τους για την καταγραφή της λειτουργίας τους. Επίσης, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις καταγραφής επιφανειακών θερμοκρασιών και επιπέδων θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας αέρα του χώρου. Συγκεκριμένα, με τη χρήση των HOBO UX120 διενεργήθηκε καταγραφή των επιφανειακών θερμοκρασιών της εκάστοτε διατομής με τους αισθητήρες να τοποθετούνται στη διεπιφάνεια θερμομονωτικού υλικού - αέρα (εξωτερική επιφάνεια) και οπτοπλινθοδομής - αέρα (εσωτερική επιφάνεια), ενώ τα επίπεδα θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας αέρα προσδιορίστηκαν στις δύο πλευρές της εκάστοτε διατομής με την χρήση των HOBO UX100-003.

Οι αναλύσεις αυτές πραγματοποιήθηκαν σε έναν κύκλο μετρήσεων διάρκειας μίας εβδομάδας για κάθε μία από τις έξι (6) συμβατικές διατομές στοιχείων οπτοπλινθοδομής με εξωτερική θερμομόνωση (τα θερμομονωτικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν είναι η εξηλασμένη πολυστερίνη-XPS, η διογκωμένη πολυστερίνη-EPS και ο πετροβάμβακα-MW) οι οποίες αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο της εν εξελίξει μελέτης όπως αποτυπώνεται στον παρακάτω πίνακα. Μεταξύ των χρονικών διαστημάτων αυτών αξιοποιήθηκε η χρήση λαμπτήρα θερμικής ακτινοβολίας (για 24 και 16 ώρες, διακοπτόμενα) ώστε να πραγματοποιηθεί η προσομοίωση της θερμοφυσικής κατάστασης των μονωμένων συμβατικών όψεων σε υψηλές θερμοκρασιακές συνθήκες. Τα χρονικά διαστήματα αυτά αποτυπώνονται στον παρακάτω πίνακα όπου με √ παρουσιάζεται η έναρξη χρήσης του λαμπτήρα θερμικής ακτινοβολίας, ενώ με X η λήξη χρήσης αυτής.

Πίνακας 1: Πρόγραμμα Μετρήσεων

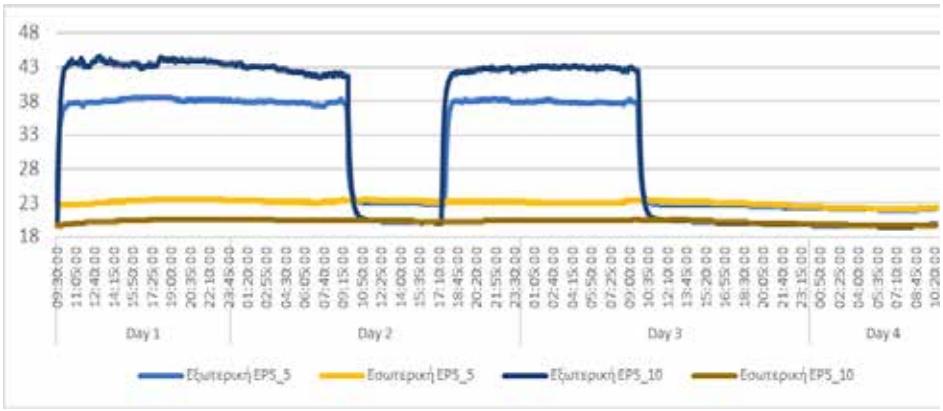
			Μετρήσεις								
Όψη	Υλικά	Πάχος [cm]	Κωδικός Διατομής	Περίοδος Μετρήσεων							
				Έναρξη-1η Ημέρα		2η Ημέρα		3η Ημέρα		Λήξη	
				Ώρα	Εν.	Ώρα	Εν.	Ώρα	Εν.	Ώρα	Εν.
Θερμοπρόσοψη	Εξηλασμένη Πολυστερίνη	10	XPS-10	09.30	√	09.35	X	09.30	X	09.30	X
						17.35	√				
		5	XPS-5	09.30	√	09.35	X	09.40	X	12.15	X
						17.35	√				
	Διογκωμένη Πολυστερίνη	10	EPS-10	09.30	√	09.35	X		X		X
							√				
		5	EPS-5	09.30	√	09.30	X	09.40	X	10.35	X
						17.40	√				
	Πετροβάμβακας	10	MW-10	09.30	√	09.30	X	09.25	X	09.40	X
						17.20	√				
		5	MW-5	09.30	√	09.30	X	10.05	X	10.55	X
						17.25	√				

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

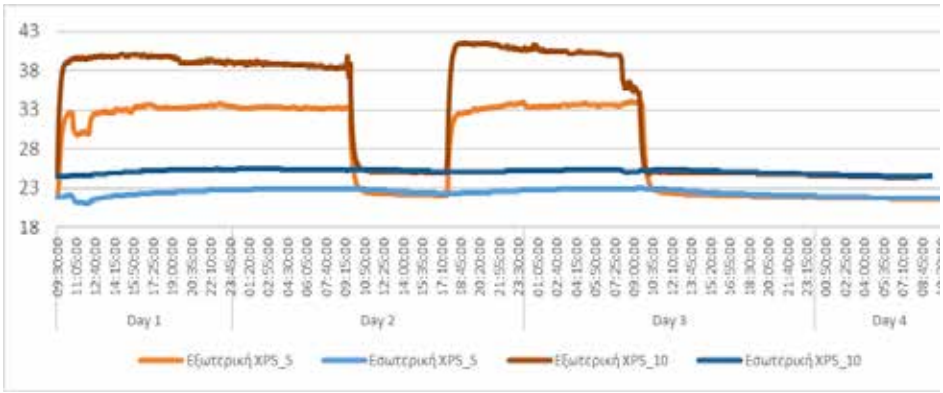
Τα αποτελέσματα των εργαστηριακών μετρήσεων που διενεργήθηκαν αποτυπώνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν. Αναλυτικά, παρουσιάζεται η λειτουργία των 6 διατομών σύμφωνα με το ανωτέρω πρόγραμμα (Πίνακας 1).

Αναλυτικότερα, κατά τη λειτουργία του θερμικού λαμπτήρα ισχύος 1200Watt, αναπτύσσονται στο σύνολο των υπό μελέτη διατομών ιδιαίτερα υψηλές θερμοκρασίες οι οποίες δεν ξεπερνούν τους 70°C, θερμοκρασία κρίσιμη για τη φθορά των αφρώδη υλικών. Σε ότι αφορά τις διατομές διογκωμένης πολυστερίνης με γραφίτη, EPS-5 και EPS-10, σύμφωνα και με τα αποτελέσματα της Εικόνας 6 καταγράφονται επίπεδα επιφανειακής θερμοκρασίας στην εξωτερική επιφάνεια της τάξης των 38°C και 43°C, αντίστοιχα.

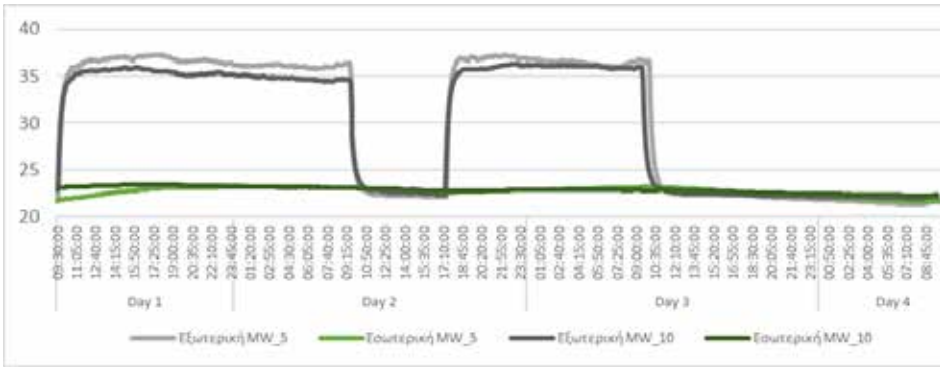
Παρόμοια, υψηλά επίπεδα σημειώνονται και στην περίπτωση των διατομών XPS-5 και XPS-10 με τα επίπεδα επιφανειακής θερμοκρασίας να κυμαίνονται από 33°C μέχρι 34°C και από 39°C μέχρι 42°C, αντίστοιχα (Εικόνα 7). Τέλος, σε ότι αφορά τις διατομές με θερμομονωτικό υλικό τον πετροβάμβακα, MW-5 και MW-10, όπως προκύπτει και από την Εικόνα 8, οι τιμές που σημειώνονται κατά τη χρήση του θερμικού λαμπτήρα, είναι παρόμοιες και κυμαίνονται μεταξύ 35°C και 37°C.



Εικόνα 6: Επιφανειακή θερμοκρασία στην εξωτερική και εσωτερική πλευρά των διατομών EPS-5 και EPS-10.



Εικόνα 7: Επιφανειακή θερμοκρασία στην εξωτερική και εσωτερική πλευρά των διατομών XPS-5 και XPS-10.



Εικόνα 8: Επιφανειακή θερμοκρασία στην εξωτερική και εσωτερική πλευρά των διατομών MW-5 και MW-10.

Σύγκριση μεταξύ των δύο πλευρών της μετρούμενης επιφάνειας:

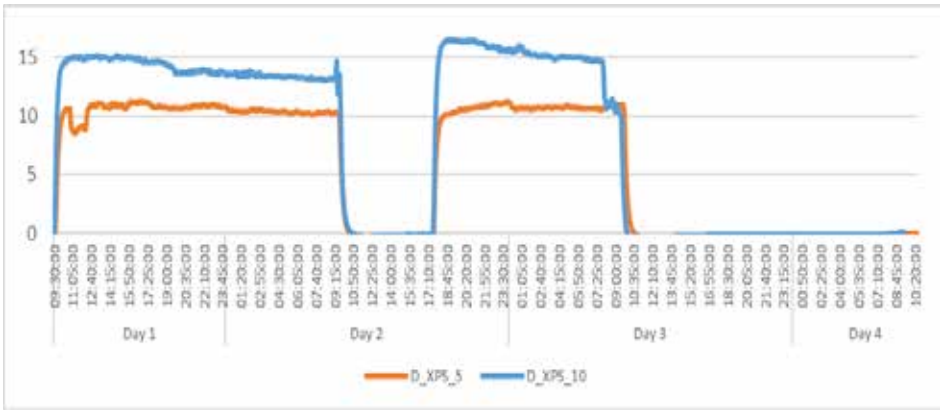
Αρχικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα διατομής με εφαρμογή διογκωμένης πολυστερίνης με γραφίτη πάχους 5cm και 10cm (Εικόνα 9). Από την ανάλυση προκύπτει πως καταγράφεται όπως αναμένονταν, διαφορά επιφανειακής θερμοκρασίας μεγαλύτερη στη διατομή με πάχος θερμομονωτικού υλικού στα 10cm. Συγκεκριμένα, κατά τη λειτουργία του θερμικού λαμπτήρα, σημειώνεται διαφορά επιφανειακής θερμοκρασίας μεταξύ της πρόσθιας και πίσω περιοχής της τάξης των 15°C στην περίπτωση της διατομής EPS-5, ενώ στην περίπτωση της EPS-10 η διαφορά κυμαίνεται στους 21°C με 24°C.

Επιπλέον, αξιολογήθηκαν οι αντίστοιχες διατομές με χρήση εξηλασμένης πολυστερίνης (Εικόνα 10). Στην περίπτωση αυτή και κατά τη διάρκεια λειτουργίας του θερμικού λαμπτήρα, προέκυψαν πάλι μεγαλύτερες διαφορές επιφανειακής θερμοκρασίας στην περίπτωση της διατομή με το μεγαλύτερο πάχος. Αναλυτικότερα, καταγράφηκε διαφορά επιφανειακής θερμοκρασίας στους 11°C στην περίπτωση της διατομής XPS-5, ενώ η αντίστοιχη διαφορά στην XPS-10 κυμαίνονταν στους 13°C με 16°C.

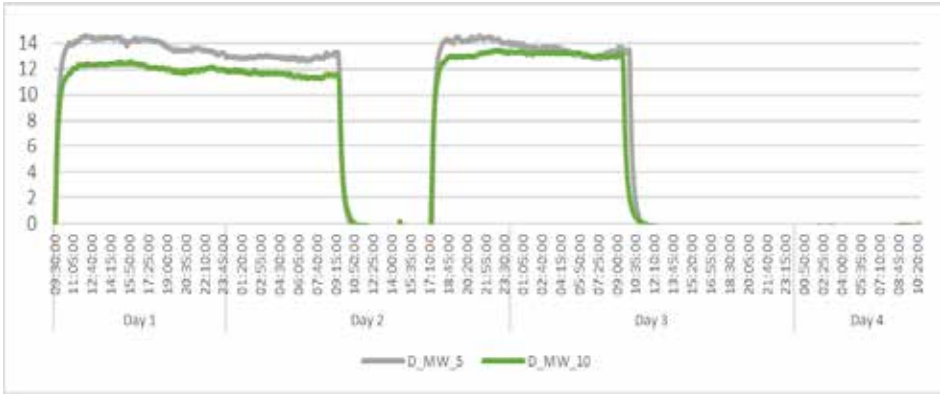
Τέλος, εστιάζοντας στην περίπτωση της διατομής με θερμομονωτικό υλικό τον πετροβάμβακα και την περίοδο έκθεσής τους στον λαμπτήρα θερμικής ακτινοβολίας (Εικόνα 11), παρατηρείται μεγαλύτερη διαφορά επιφανειακής θερμοκρασίας στην περίπτωση της διατομής MW-5. Η διαφορά αυτή οφείλεται στην διαφορά των επιπέδων θερμοκρασίας του χώρου διεξαγωγής των μετρήσεων. Λαμβάνοντας υπόψη και την παράμετρο αυτή, προκύπτουν τα αποτελέσματα που αποτυπώνονται στην Εικόνα 12. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ανάλυσης, για την διατομή MW-5 καταγράφονται διαφορές επιφανειακής θερμοκρασίας που κυμαίνονται στους 10°C με 12°C, ενώ στην περίπτωση της MW-10 η διαφορά αυτή αγγίζει τους 13°C.

Αντίθετα κατά τις περιόδους μη χρήση του θερμικού λαμπτήρα, οι επιφανειακές θερμοκρασίες στο σύνολο των υπό μελέτη διατομών, δεν σημειώνουν κάποια σημαντική διαφορά.

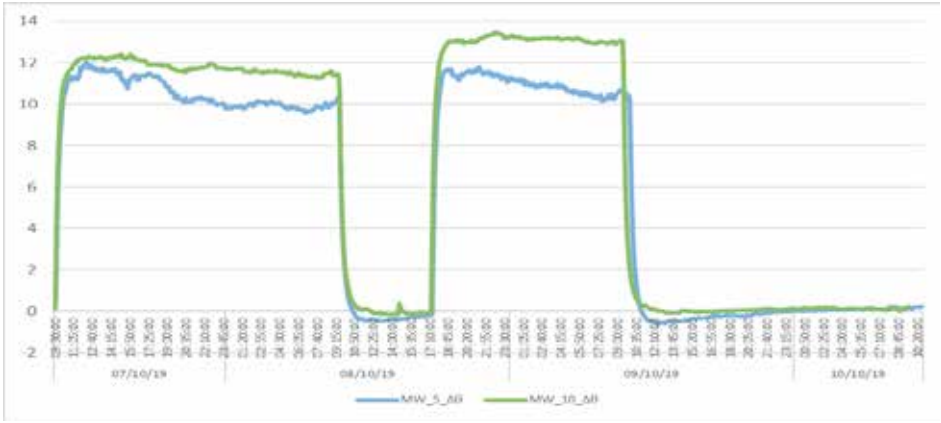
Εικόνα 9: Διαφορά επιφανειακής θερμοκρασίας διατομών EPS-5 και EPS-10



Εικόνα 10: Διαφορά επιφανειακής θερμοκρασίας διατομών XPS-5 και XPS-10



Εικόνα 11: Διαφορά επιφανειακής θερμοκρασίας διατομών MW-5 και MW-10



Εικόνα 12: Διαφορά επιφανειακής θερμοκρασίας λαμβάνοντας υπόψη τις επικρατούσες συνθήκες εσωτερικού περιβάλλοντος διατομών MW-5 και MW-10

Εκτίμηση αποτελεσμάτων συμπεριφοράς αεριζόμενων όψεων:

Μία από τις βασικότερες παραμέτρους που επηρεάζεται άμεσα από τη χρήση των αεριζόμενων όψεων είναι η εξοικονόμηση στην κατανάλωση ενέργειας. Η εξοικονόμηση αφορά στη μείωση της ενεργειακής απαίτησης κατά τις περιόδους θέρμανσης και ψύξης. Η συμβολή στον έλεγχο των θερμικών απωλειών κατά την περίοδο του χειμώνα και η ενίσχυση του δροσισμού μέσω του αερισμού κατά την καλοκαιρινή περίοδο αποτελούν τις βασικές παραμέτρους μείωσης της αρχικής απαίτησης ενέργειας. Κατά τις περιόδους που απαιτείται ενέργεια, ώστε να καλυφθεί η θερμική ζήτηση, το ποσό της αρχικής ενέργειας μειώνεται, καθώς η απορρόφηση θερμότητας μέσω της αεριζόμενης όψης αυξάνει τη θερμοκρασία εντός του κτιρίου [17]. Αντίστοιχα, κατά την περίοδο ψύξης, η συμβολή της αεριζόμενης όψης είναι σημαντική, καθώς ο αερισμός μέσω του διακένου συμβάλλει στη μείωση της θερμοκρασίας εντός αυτού και συνεπώς η απορρόφηση της θερμότητας του κτιρίου μειώνεται με φυσικό επακόλουθο τη διατήρηση της επιθυμητής θερμοκρασίας.

Πιο συγκεκριμένα, αρκετές έρευνες έχουν ασχοληθεί με τη μετάδοση θερμότητας που λαμβάνει χώρα κατά τη χρήση των αεριζόμενων όψεων, ώστε τελικά να αναλυθούν οι διαφορές στις οποίες συντελούν σε σχέση με τις συμβατικές όψεις κτιρίων. Χαρακτηριστικά αναφέρεται πως μπορεί να επιτευχθεί 26% μείωση της απαίτησης ενέργειας για τον κλιματισμό [18] μέσω της χρήσης αεριζόμενης όψης. Τέλος, όπως ήδη έχει αναλυθεί, η επίδραση του διακένου αέρα μπορεί να επιφέρει σημαντικές επιδράσεις στην εξοικονόμηση ενέργειας της αεριζόμενης όψης. Το διάκενο λειτουργεί ως μία επιπλέον μόνωση μέσω του στρώματος αέρα και των θερμοκρασιών που αναπτύσσονται εντός αυτού, ενώ παράλληλα είναι ικανό να αυξήσει την αποτελεσματικότητα συγκριτικά με τις περιπτώσεις των συμβατικών υλικών που παρατηρήθηκε μη επαρκής αποτελεσματικότητα λόγω των συνθηκών του εξωτερικού περιβάλλοντος.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η συγκεκριμένη μελέτη στοχεύει στην καταγραφή των βιβλιογραφικών δεδομένων ως προς τις εφαρμογές και τις διαδικασίες σχεδιασμού των όψεων (συμβατικών και αεριζόμενων) που συναντώνται κυρίως στον κτιριακό τομέα.

Με βάση τις εργαστηριακές μετρήσεις που πραγματοποιηθήκαν, στοχεύοντας στην ολοκληρωμένη αξιολόγηση των θερμοφυσικών ιδιοτήτων των συμβατικών υλικών (εξηλασμένη πολυστερίνη, διογκωμένη πολυστερίνη, πετροβάμβακας), κατέστη δυνατή η ανάλυση της απόδοσης των συμβατικών λύσεων. Από τις προαναφερόμενες μετρήσεις παρατηρήθηκε πως το σύνολο των υπό ανάλυση διατομών ανταποκρίνονται στις υψηλές θερμοκρασίες που προκαλούνται από τη θερμική ακτινοβολία καταγράφοντας διαφορές θερμοκρασίας υψηλότερες των 10°C. Ιδιαίτερα σημαντικές διαφορές εντοπίζονται και στην περίπτωση χρήσης της διογκωμένης και εξηλασμένης θερμομόνωσης πάχους 10cm.

Στη βάση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων, η συγκεκριμένη μελέτη καταλήγει στην ανάγκη περαιτέρω διερεύνησης των εναλλακτικών διαμορφώσεων των όψεων, ώστε να βελτιωθεί η ενεργειακή απόδοση των κτιρίων, και όχι μόνο. Γι' αυτόν τον λόγο, η έρευνα είναι σε εξέλιξη ως προς τις δυνατότητες της τεχνολογίας των αεριζόμενων όψεων κτιρίων, και της βελτίωσης που αυτές μπορούν να προσφέρουν συγκριτικά με τις συμβατικές λύσεις.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς θα ήθελαν να εκφράσουν την ευγνωμοσύνη τους προς την Ευρωπαϊκή Ένωση και τα ελληνικά εθνικά ταμεία μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος καθώς η εργασία υλοποιήθηκε στο πλαίσιο του έργου «Ευφυείς Όψεις για Κτίρια Σχεδόν Μηδενικής Ενέργειας - IF-ZEB» της Δράσης ΕΡΕΥΝΩ – ΔΗΜΙΟΥΡΓΩ - ΚΑΙΝΟΤΟΜΩ συγχρηματοδοτήθηκε από το Ευρωπαϊκό Ταμείο Περιφερειακής Ανάπτυξης (ΕΤΠΑ) της Ευρωπαϊκής Ένωσης και εθνικούς πόρους μέσω του Ε.Π. Ανταγωνιστικότητα, Επιχειρηματικότητα & Καινοτομία (ΕΠΑνΕΚ) (κωδικός έργου:Τ1ΕΔΚ-02045)

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Νόμος 4122 Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, "Νόμος 4122 (2013) 'Ενεργειακή Απόδοση Κτιρίων – Εναρμόνιση με την Οδηγία 2010/31/ΕΕ του διατάξεις', Επίσημη," 2013.

[2] "Οδηγία 2010/31/ΕΕ (2010) 'Οδηγία 2010/31/ΕΕ Του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου Και Του Συμβουλίου Για Την Ενεργειακή Απόδοση Των Κτιρίων.', Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης, σσ 13–35.," 2010.

[3] "ΕΛΣΤΑΤ (2011) Απογραφή κτιρίων 2011. Κτίρια κατά χρήση, αριθμό ορόφων και περίοδο κατασκευής κατά Περιφερειακή ενότητα και Δήμο. Διαθέσιμο στο: http://www.statistics.gr/ (Ημερομηνία πρόσβασης: 4 Μάιος 2017).," 2011.

[4] European Commission, "Directive (EU) 2018/844," *Off. J. Eur. Union*, vol. 2018, no. October 2012, pp. 75–91, 2018.

[5] F. Nicol, M. Humphreys, and S. Roaf, *Adaptive thermal comfort: Principles and practice*. 2012.

[6] A. GhaffarianHoseini, A. GhaffarianHoseini, U. Berardi, J. Tookey, D. H. W. Li, and S. Kariminia, "Exploring the advantages and challenges of double-skin facades (DSFs)," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.01.130.

[7] H. S. Quesada G, Rousse D, Dutil Y, Badache M, "A comprehensive review of solar facades. Transparent and translucent solar facades.," *Renew. Sustain. Energy Rev.;162643–51*, 2012.

[8] C. S. Park and G. Augenbroe, "Local vs. integrated control strategies for double-skin systems," *Autom. Constr.*, 2013, doi: 10.1016/j.autcon.2012.11.030.

[9] Π. Ν., "Δομική Φυσική και Αρχές Περιβαλλοντολογικού Σχεδιασμού Κτιρίου," Μετσόβειο Πολυτεχνείο, 2015.

[10] S. Barbosa and K. Ip, "Perspectives of double skin façades for naturally ventilated buildings: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014, doi: 10.1016/j.rser.2014.07.192.

[11] A. Guardo, M. Coussirat, E. Egusquiza, P. Alavedra, and R. Castilla, "A CFD approach to evaluate the influence of construction and operation parameters on the performance of Active Transparent Façades in Mediterranean climates," *Energy Build.*, 2009, doi: 10.1016/j.enbuild.2008.11.019.

[12] Z. A. Halil and B. O. Mesut, "Thermal comfort of multiple-skin facades in warm-climate offices," *Sci. Res. Essays*, 2016, doi: 10.5897/sre11.319.

[13] A. L. S. Chan, T. T. Chow, K. F. Fong, and Z. Lin, "Investigation on energy performance of double skin façade in Hong Kong," *Energy Build.*, 2009, doi: 10.1016/j.enbuild.2009.05.012.

[14] Κ. Β, "Διπλοκέλυφες κατασκευές και προσόψεις," 2015.

[15] C. A. Rundle, M. F. Lightstone, P. Oosthuizen, P. Karava, and E. Mouriki, "Validation of computational fluid dynamics simulations for atria geometries," *Build. Environ.*, 2011, doi: 10.1016/j.buildenv.2010.12.019.

[16] H. Radhi, S. Sharples, and F. Fikiry, "Will multi-facade systems reduce cooling energy in fully glazed buildings? A scoping study of UAE buildings," *Energy Build.*, 2013, doi: 10.1016/j.enbuild.2012.08.030.

[17] W. Choi, J. Joe, Y. Kwak, and J. H. Huh, "Operation and control strategies for multi-storey double skin facades during the heating season," *Energy Build.*, 2012, doi: 10.1016/j.enbuild.2012.02.047.

[18] J. Peng, L. Lu, and H. Yang, "An experimental study of the thermal performance of a novel photovoltaic double-skin facade in Hong Kong," *Sol. Energy*, 2013, doi: 10.1016/j.solener.2013.08.031.

ΥΒΡΙΔΙΚΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ/ΘΕΡΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΗΛΙΟΘΕΡΜΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΕ ΚΤΙΡΙΟ ΜΗΔΕΝΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΚΤΙΡΙΟ ΚΑΤΟΙΚΙΑΣ

Έλλη Κυριάκη[1*], Ευφροσύνη Γιαμά[1], Αργυρώ Αντωνίου[1], Άγις Μ. Παπαδόπουλος[1]

[1] Εργαστήριο Κατασκευής Συσκευών Διεργασιών, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, ΑΠΘ
e-mail: kelli@auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η Ευρώπη αντιμετωπίζει προκλήσεις στον ενεργειακό και χρηματοπιστωτικό τομέα. Οι ασταθείς οικονομικές συνθήκες αποτελούν πηγή έντονων διαταραχών και τροχοπέδη στη συνεχιζόμενη ανάπτυξη των ευρωπαϊκών χωρών. Η συνεχής αύξηση της ζήτησης ενέργειας, παρά την πρόοδο που σημειώθηκε τα τελευταία χρόνια, οδήγησε στη σταδιακή εξάντληση των ορυκτών καυσίμων και στην αντίστοιχη περιβαλλοντική υποβάθμιση. Ως αποτέλεσμα, η εφαρμογή μέτρων ενεργειακής απόδοσης, καθώς και η ενσωμάτωση συστημάτων Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), αποτελούν πρόκληση για την πορεία προς τα Κτίρια σχεδόν Μηδενικής Κατανάλωσης Ενέργειας (ΚΣΜΚΕ). Επιπλέον, ακόμη και όταν εφαρμόζονται όλα τα εργαλεία ενεργειακά αποδοτικού σχεδιασμού κτιρίων, όπως για παράδειγμα ηχοπροστασία, θερμομόνωση αλλά και χρήση ενεργειακά αποδοτικών συστημάτων θέρμανσης και κλιματισμού, υπάρχει πάντα επιπρόσθετη σημαντική ζήτηση για ζεστό νερό χρήσης (ΖΝΧ), θέρμανση και ψύξη των χώρων, καθώς και ηλεκτρική ενέργεια για φωτισμό και συσκευές, η οποία πρέπει να καλυφθεί. Αυτό μπορεί να γίνει ιδανικά μέσω της χρήσης Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας με τα ηλιακά θερμικά συστήματα και τα φωτοβολταϊκά να είναι πρωταρχικοί υποψήφιοι, καθώς τα πρώτα πληρούν το εύρος των απαιτήσεων θερμοκρασίας ενώ και τα δύο διαθέτουν αποδεδειγμένη απόδοση, αξιοπιστία και ανθεκτικότητα. Σε κτίρια με φιλόδοξους ενεργειακούς στόχους ή περιορισμένη διαθέσιμη επιφάνεια για την εγκατάσταση των συλλεκτών, οι ηλιακές θερμικές και φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις θα μπορούσαν τελικά να ανταγωνίζονται μεταξύ τους. Μια τεχνολογία ικανή να ικανοποιεί ταυτόχρονα την ηλεκτρική και θερμική παραγωγή παρέχεται από τις υβριδικές μονάδες φωτοβολταϊκού/θερμικού στοιχείου, οι οποίες χαρακτηρίζονται από υψηλότερο ρυθμό μετατροπής της απορροφούμενης ηλιακής ακτινοβολίας σε θερμική και ηλεκτρική σε σχέση με τις συμβατικές μονάδες.

Στην παρούσα μελέτη πραγματοποιήθηκε εκτενής βιβλιογραφική επισκόπηση σχετικά με τις υπάρχουσες τεχνολογίες Φωτοβολταϊκού/Θερμικού στοιχείου, την ενεργειακή, περιβαλλοντική και οικονομική τους απόδοση. Στην συνέχεια, μελετήθηκε ένα ηλιοθερμικό σύστημα συνδυασμένης λειτουργίας με εγκατεστημένο φωτοβολταϊκό/θερμικό στοιχείο σε ένα κτίριο σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας και πιο συγκεκριμένα μια μονοκατοικία, για την κάλυψη των αναγκών θέρμανσης και παραγωγής ζεστού νερού χρήσης. Το σύστημα μελετήθηκε ως προς την ενεργειακή και περιβαλλοντική του απόδοση. Τέλος, τα αποτελέσματα όσον αφορά την θερμική απόδοση, συγκρίθηκαν με αυτά ενός ηλιοθερμικού συστήματος συνδυασμένης λειτουργίας στο οποίο έχει εγκατασταθεί απλός επίπεδος ηλιακός συλλέκτης.

Λέξεις Κλειδιά: Κτίρια σχεδόν Μηδενικής Κατανάλωσης Ενέργειας (ΚΣΜΚΕ), Υβριδικός φωτοβολταϊκός/θερμικός συλλέκτης, Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, ενεργειακή απόδοση, περιβαλλοντική απόδοση

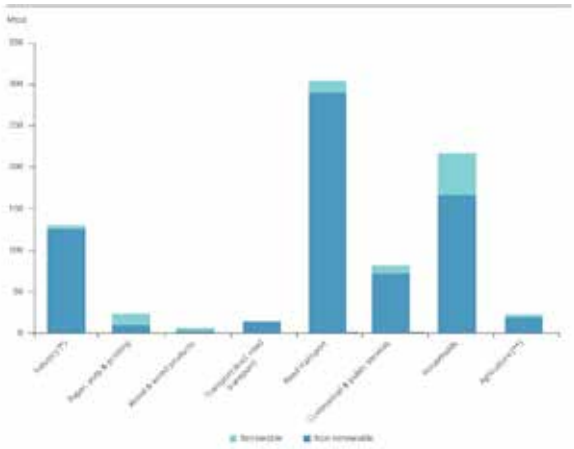
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ανάγκη μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας καθώς και η χρήση πιο φιλικών προς το περιβάλλον ενεργειακών πηγών είναι επιβεβλημένη και ορίζεται πλέον ξεκάθαρα και μέσω του ισχύοντος νομοθετικού πλαισίου. Αρχικά, η ανάγκη αυτή εκφράστηκε μέσω του πρωτοκόλλου του Κιότο, το 1992, το οποίο υπεγράφη το 1997. Οι χώρες που το υπέγραψαν, μεταξύ άλλων, συμφώνησαν να μειώσουν τους 6 βασικούς ρύπους (διοξείδιο του άνθρακα, μεθάνιο, υποξείδιο του αζώτου, υδροφθοράνθρακες, υπερφθοριωμένοι υδρογονάνθρακες και εξαφθοριούχο θείο), οι οποίοι μετριούνται σε τόννους ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα ($tCO2_{eq}$), το οποίο περιλαμβάνει το σύνολο των παραπάνω εκπομπών υπεύθυνους για το φαινόμενο του θερμοκηπίου, κατά τουλάχιστον 5,2% σε σχέση με τα επίπεδα του 1990, μέχρι το 2012. Η ισχύς του ξεκίνησε το 2008 και αφορούσε τις ανεπτυγμένες χώρες που αποτελούσαν κύριες πηγές των ρύπων, ενώ για τις αναπτυσσόμενες χώρες δεν απαιτήθηκαν δεσμεύσεις. Στη συνέχεια, τα επόμενα έτη η Ε.Ε. έχει εγκρίνει ένα μεγάλο αριθμό από πολιτικές και νομοθετικές πράξεις, με στόχο την προώθηση της χρήσης Α.Π.Ε., την μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης καθώς και των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου [1].

Πιο συγκεκριμένα, η Ε.Ε. από το 2000 και μετά έχει θεσπίσει μια σειρά από στόχους για την ενέργεια, την αξιοποίησή της και τις συνακόλουθες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Οι στόχοι, με σειρά χρονικής υλοποίησής τους, είναι:

- Στόχος 20-20-20 (20% βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης, 20% μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου σε σχέση με τα επίπεδα του 1990 και 20% συμμετοχή των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας) [2]
- Στόχος του 2030 (27%-30% βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης, 40% μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου σε σχέση με το 1990, τουλάχιστον 27% συμμετοχή των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, διασύνδεση της ηλεκτρικής ενέργειας σε ποσοστό 15%, με όρο επανεξέτασης το 2023) [3]
- Στόχος του 2050 (μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου κατά 80%-95% σε σχέση με τα επίπεδα του 1990) [4]

Αν κοιτάξει κανείς τον επιμερισμό ανά τομέα της κατανάλωσης ενέργειας από Α.Π.Ε. και συμβατικές πηγές θα διαπιστώσει ότι ο κτιριακός τομέας φαίνεται να ενσωματώνει σε μεγαλύτερο ποσοστό Α.Π.Ε. και μάλιστα περισσότερο τα κτίρια κατοικιών. Πιο συγκεκριμένα, στον τομέα των μεταφορών το 5% της κατανάλωσης αφορούσε Α.Π.Ε., ενώ για τα κτίρια (κατοικίες και υπηρεσίες), οι Α.Π.Ε. καλύπτουν ποσοστό 35% (Εικόνα 1) [1].



Εικόνα 1: Επιμερισμός κατανάλωσης ανά τομέα για ανανεώσιμες και μη πηγές ενέργειας, [5]

Μεταξύ 2005 και 2017, το μερίδιο της ηλεκτρικής ενέργειας από Α.Π.Ε. αυξήθηκε κατά μέσο όρο κατά 1,3 ποσοστιαίες μονάδες ετησίως, το οποίο είχε ως αποτέλεσμα το 2017 περίπου το 31% της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνεται στην Ε.Ε. να προέρχεται από Α.Π.Ε.. Οι σημαντικότερες Α.Π.Ε. για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι η υδροηλεκτρική (35%), η αιολική (34%), τα ηλιακά φωτοβολταϊκά (12%) και η στερεή βιομάζα (9%) (Eurostat, 2019d) (EOX, 2018γ). Παράλληλα, σύμφωνα με τις εκτιμήσεις για το 2018, υπολογίζεται ότι περίπου 32% της συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας θα προέρχεται από Α.Π.Ε., με περισσότερο από το 48% αυτού του μεριδίου να ανήκει στην αιολική (36%) και την ηλιακή ενέργεια (12%) [5]. Στον τομέα της θέρμανσης και της ψύξης, το μερίδιο της συνεισφοράς των Α.Π.Ε. σε όλη την Ε.Ε., αυξήθηκε κατά μέσο όρο 0,7 ποσοστιαίες μονάδες ετησίως για την χρονική περίοδο 2005 – 2017, με περίπου 19,5% να προέρχεται τελικά από Α.Π.Ε. Οι κυριότερες μορφές Α.Π.Ε. που αξιοποιούνται στη θέρμανση και την ψύξη είναι η στερεή βιομάζα, οι αντλίες θερμότητας και τα ηλιοθερμικά συστήματα (EOX, 2017α). Σύμφωνα με τις εκτιμήσεις για το 2018, το ποσοστό ενσωμάτωσης των Α.Π.Ε. στον τομέα της θέρμανσης και της ψύξης υπολογίζεται στο 20,3%. Πιο συγκεκριμένα, για την Ελλάδα σύμφωνα με τα στατιστικά η ενσωμάτωση των Α.Π.Ε. στον τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας για το 2017 ανέρχεται σε 24,5% ενώ στον τομέα της θέρμανσης και της ψύξης για το 2017 το ποσοστό ήταν 26,6% [5].

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

Οι ερευνητές Herrando κ.ά., μελέτησαν την εφαρμογή ενός ηλιοθερμικού συστήματος συνδυασμένης λειτουργίας σε μία μονοκατοικία στο Ηνωμένο Βασίλειο. Το ηλιοθερμικό σύστημα αποτελείτο από ένα συνδυασμό φωτοβολταϊκού συλλέκτη για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμικού συλλέκτη για παραγωγή ζεστού νερού χρήσης. Η μελέτη εγκατάστασης του συστήματος πραγματοποιήθηκε σε μία οροφή κατοικίας στο Λονδίνο, συνολικής επιφάνειας 70-90m^2 με μία μέση διαθέσιμη επιφάνεια στέγης 15m^2. Παράλληλα, έγινε σύγκριση της λειτουργίας του με μία ίδια κατοικία η οποία αγοράζει ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο και χρησιμοποιεί ένα συνδυασμό λέβητα φυσικού αερίου, αντλιών θερμότητας και ηλεκτρικών θερμαντήρων για ζεστό νερό. Οι ερευνητές κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι οι φωτοβολταϊκοί/θερμικοί συλλέκτες, παρά τη χαμηλή ηλιακή ακτινοβολία και θερμοκρασία του Λονδίνου, μπορούν να καλύψουν το 51% της συνολικής ετήσιας ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας και το 36% συνολικής ετήσιας ζήτησης ζεστού νερού. Στην ίδια μελέτη, πραγματοποιήθηκε σύγκριση των φωτοβολταϊκών/θερμικών συλλεκτών με συμβατικούς φωτοβολταϊκούς. Παρατηρήθηκε ότι οι υβριδικοί συλλέκτες έχουν υψηλότερο ποσοστό κάλυψης ηλεκτρικής ενέργειας και ζεστού νερού χρήσης. Επιπρόσθετα, υπολογίσθηκε ότι η χρήση των υβριδικών συλλεκτών έχει ως αποτέλεσμα την μείωση κατά 36% των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα σε σχέση με την περίπτωση των απλών φωτοβολταϊκών, για ένα χρονικό ορίζοντα μελέτης είκοσι ετών [6].

Η εφαρμογή των φωτοβολταϊκών/θερμικών συλλεκτών στα ηλιοθερμικά συστήματα φαίνεται να είναι αρκετά διαδεδομένη στην Ευρώπη. Σε μία μελέτη των Axaopoulos κ.α. πραγματοποιήθηκε ενεργειακή και οικονομική αξιολόγηση εγκατάστασης φωτοβολταϊκών/θερμικών συλλεκτών σε 3 διαφορετικές πόλεις της Ευρώπης. Ειδικότερα, έγινε σύγκριση της ετήσιας θερμικής και ηλεκτρικής απόδοσης τους για την Αθήνα, το Μόναχο της Γερμανίας και το Νταντί της Σκωτίας. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της έρευνας, η ετήσια ηλιακή κάλυψη για την Αθήνα ήταν 59,6%, το Μόναχο 50,9% και το Νταντί 49,5%. Αυτό προφανώς, οφείλεται στην υψηλή ηλιακή ακτινοβολία που λαμβάνει χώρα στην Ελλάδα σε σύγκριση με τις άλλες πόλεις της Ευρώπης, οι οποίες χαρακτηρίζονται από χαμηλότερο ηλιακό δυναμικό. Από την άλλη, η ετήσια ηλεκτρική απόδοση της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης μετρήθηκε σε (kWh/kWhp), δηλαδή παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια του φωτοβολταϊκού προς εγκατεστημένη ισχύ. Η Αθήνα και πάλι, εμφάνισε την υψηλότερη ετήσια ηλεκτρική απόδοση με 1.390,3 kWh/kWhp , το Μόναχο 1.063,1 kWh/kWhp και το Νταντί 916,1 kWh/kWhp. Τα αποτελέσματα της παραπάνω έρευνας, για τις υφιστάμενες κλιματολογικές και οικονομικές συνθήκες της Ελλάδας, έδειξαν ότι μία μικρή εγκατάσταση από φωτοβολταϊκούς/θερμικούς συλλέκτες στην Αθήνα έχει τη δυνατότητα να καλύψει σε ικανοποιητικό βαθμό τις ανάγκες σε ηλεκτρική και θερμική ενέργεια. Οι άλλες πόλεις, μπορούν να πλησιάσουν τις θερμικές και ηλεκτρικές αποδόσεις της Ελλάδας, με μία μεγαλύτερη εγκατάσταση και ως εκ τούτου με μεγαλύτερο κόστος [7].

Επιπρόσθετα, μια πειραματική μελέτη πραγματοποιήθηκε σε δύο κοντινές κατοικίες στη Λυών της Γαλλίας, προκειμένου να επαληθευτεί η αξιοπιστία και η απόδοση της εγκατάστασης ενός ηλιοθερμικού συστήματος για τις ανάγκες ζεστού νερού χρήσης. Η μελέτη, αφορούσε φωτοβολταϊκούς/θερμικούς συλλέκτες τεχνολογίας DualSun, συνδεδεμένους με μία δεξαμενή ηλιακής αποθήκευσης η οποία περιείχε εσωτερικό εναλλάκτη θερμότητας για προθέρμανση του νερού. Με τη βοήθεια αισθητήρων θερμοκρασίας, καταγράφηκε η θερμοκρασία του νερού στον υβριδικό συλλέκτη, η οποία ακόμη και τους θερμότερους μήνες δεν ξεπέρασε τους 68^{o}C. Με αυτή τη διαδικασία, οι

ερευνητές απέδειξαν ότι δεν υπάρχει κίνδυνος υπερθέρμανσης των συλλεκτών. Οι ερευνητές παρουσίασαν επίσης, το μηνιαίο ηλιακό κλάσμα για τις δύο κατοικίες στην περιοχή της Γαλλίας. Η πρώτη κατοικία κατά τους θερμότερους μήνες (Μάιος μέχρι Σεπτέμβριος) κάλυπτε το 84,4% της ζήτησης ζεστού νερού χρήσης από τον υβριδικό συλλέκτη ενώ η μέση ετήσια κάλυψη ήταν 50,3%. Αντίστοιχα, η δεύτερη κατοικία κάλυπτε το 91% των απαιτήσεων για ζεστό νερό χρήσης τους θερμότερους μήνες από τον υβριδικό συλλέκτη ενώ η μέση ετήσια κάλυψη ήταν 64,7% [8].

Ο Καλογήρου, χρησιμοποίησε το λογισμικό προσομοίωσης "TRANSYS" για να επιτύχει το βέλτιστο ρυθμό ροής νερού σε ένα φωτοβολταϊκό/θερμικό συλλέκτη. Η μοντελοποίηση και προσομοίωση, διαμορφώθηκε σε μία κατοικία στην Κύπρο, και έγινε χρήση μετεωρολογικών στοιχείων από το Τμήμα Μετεωρολογίας Λευκωσίας. Συγκεκριμένα, υπολογίσθηκε η ετήσια ηλεκτρική και θερμική ενέργεια του συνδυασμένου ηλιοθερμικού συστήματος, για παροχή νερού στο συλλέκτη από 0 μέχρι 150 l/h. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι με την αύξηση του ρυθμού ροής νερού στο συλλέκτη, η ηλεκτρική ενέργεια αυξάνεται επειδή δουλεύει σε χαμηλότερη θερμοκρασία. Παρομοίως, η θερμική ενέργεια αυξάνεται ενώ στη συνέχεια μειώνεται. Ο βέλτιστος ρυθμός ροής νερού είναι αυτός για τον οποίο η ηλεκτρική και θερμική ενέργεια που παρέχεται από το φωτοβολταϊκό/θερμικό συλλέκτη ικανοποιεί την ηλεκτρική και θερμική ενέργεια που απαιτεί η κατοικία. Για το συγκεκριμένο ηλιοθερμικό σύστημα συνδυασμένης λειτουργίας, με εμβαδό φωτοβολταϊκών/θερμικών συλλεκτών 5,1m^2, ο βέλτιστος ρυθμός ροής ήταν 25 l/h (0,007 kg/s). Επίσης, για το δεδομένο βέλτιστο ρυθμό ροής η ηλεκτρική απόδοση του συλλέκτη αυξήθηκε στο 7,7% σε σύγκριση με ένα τυπικό φωτοβολταϊκό συλλέκτη ηλεκτρικής απόδοσης 2,8% [9].

Οι Ahmad κ.ά., στην πειραματική έρευνά τους εξέτασαν τη θερμική και ηλεκτρική απόδοση ενός φωτοβολταϊκού/θερμικού συλλέκτη νερού για ηλιακή ακτινοβολία εύρους 500-800 W/m^2. Για την πειραματική διεργασία, χρησιμοποιήθηκαν 23 λαμπτήρες αλογόνου-βολφραμίου 500W έκαστος, διατεταγμένοι σε 9 στήλες. Επίσης, δοκιμάστηκαν 3 είδη υβριδικών συλλεκτών από ανοξείδωτο χάλυβα με διαφορετική διαμόρφωση απορροφητή και με διαφορετικούς ρυθμούς ροής μάζας νερού. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν απορροφητής ροής ιστού (web flow), απορροφητής άμεσης ροής (direct flow) και απορροφητής σπειροειδούς ροής (spiral flow). Οι τρεις συλλέκτες νερού δοκιμάστηκαν σε Εργαστήριο Ηλιακής Ενέργειας Πανεπιστημίου της Μαλαισίας, κάτω από θερμοκρασίες και επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας που επικρατούν σε εξωτερικές συνθήκες. Τα αποτελέσματα για επίπεδο ακτινοβολίας 800 W/m^2 και ρυθμό ροής μάζας 0,041 kg/s, έδειξαν ότι ο σπειροειδής απορροφητής έχει την υψηλότερη συνολική απόδοση (65%), με ηλεκτρική και θερμική απόδοση 13% και 52% αντίστοιχα. Η υψηλή απόδοση, μάλιστα, οφείλεται στα μικρά διάκενα απόστασης που δημιουργούνται από τη σπειροειδή ροή, τα οποία καλύπτονται από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο ευνοώντας της απορρόφηση θερμότητας [10].

Οι K. Sopian κ.ά., δημοσίευσαν ένα άρθρο που αφορούσε ένα εναλλακτικό μέσο ψύξης στους φωτοβολταϊκούς/θερμικούς συλλέκτες νερού. Στην έρευνά τους, πρότειναν χρήση νανοφλουδών και πιο συγκεκριμένα ένα μίγμα υγρού και νανοσωματιδίων που ενισχύουν τη θερμική αγωγιμότητα, πυκνότητα, ειδική θερμότητα καθώς και το ιξώδες του νερού. Η πειραματική μελέτη πραγματοποιήθηκε υπό τις τροπικές συνθήκες της Μαλαισίας, χρησιμοποιώντας διαφορετικούς τύπους νανοφλουδών (SiO_2, TiO_2 και SiC) και υπολογίζοντας κάθε φορά την ηλεκτρική και θερμική απόδοση του συλλέκτη. Τα αποτελέσματα για τους φωτοβολταϊκούς/θερμικούς συλλέκτες (ΦΒ/Θ) κατά τη διάρκεια της ημέρας, κατέγραψαν ηλεκτρική απόδοση: ΦΒ/Θ-νερού (10.49-12.14)%, ΦΒ/Θ- SiO_2 (10.85-12,38)% , ΦΒ/Θ-TiO_2 (11,72-13,14)% και ΦΒ/Θ-SiC (13,05-13,79)%. Πέρα από τη μέγιστη ηλεκτρική απόδοση που εμφάνισε η χρήση νανοφλουδών SiC, εμφάνισε και την υψηλότερη συνδυασμένη ηλεκτρική και θερμική απόδοση (81,73%). Έπειτα, χαμηλότερη συνολική απόδοση προέκυψε από τη χρήση νανοφλουιδίων TiO_2, SiO_2 και τέλος από το νερό. Σύμφωνα με τους ερευνητές, η χρήση καλύτερων υγρών μεταφοράς με τη βοήθεια ψυκτικών μέσων, εξασφαλίζουν ομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας στο φωτοβολταϊκό/θερμικό συλλέκτη και ως εκ τούτου καλύτερη συνδυασμένη απόδοση λειτουργίας [11].

Παράλληλα, ο κύριος σκοπός της μελέτης των Yang κ.ά., ήταν να παρουσιάσει την αποτελεσματικότητα της χρήσης υλικών αλλαγής φάσης (Υ.Α.Φ.) στο φωτοβολταϊκό/θερμικό συλλέκτη. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε σύγκριση της ενεργειακής απόδοσης μεταξύ των φωτοβολταϊκών/θερμικών συλλεκτών με ΥΑΦ και των συμβατικών φωτοβολταϊκών/θερμικών συλλεκτών. Κάτω από τη φωτοβολταϊκή μονάδα της διάταξης, προσκολλήθηκε μία χάλκινη πλάκα και στη συνέχεια τοποθετήθηκαν χάλκινοι σωλήνες κυκλοφορίας νερού, τυλιγμένοι με στρώμα ΥΑΦ. Η εφαρμογή στρώματος Υ.Α.Φ., σύμφωνα με τα αποτελέσματα της έρευνας, μείωσε την αύξηση θερμοκρασίας της φωτοβολταϊκής μονάδας, παρουσιάζοντας μέγιστη διαφορά θερμοκρασίας σε σύγκριση με το συμβατικό συλλέκτη, 15,8 ºC. Η ηλεκτρική απόδοση για το συλλέκτη-ΥΑΦ και

συμβατικό συλλέκτη ήταν 8,16 % και 6,98% αντίστοιχα ενώ η θερμική απόδοση από τη χρήση ΥΑΦ έφτασε το 70,34%. Ο συμβατικός φωτοβολταϊκός/θερμικός συλλέκτης παρουσίασε θερμική απόδοση 58,35%, και είναι ευλογοφανές ότι τα υλικά αλλαγής φάσης προσφέρουν καλύτερη συνδυασμένη ολική απόδοση σε ένα υβριδικό συλλέκτη. Σύμφωνα με τους ερευνητές, τα υλικά αυτά μπορούν να αποθηκεύουν υψηλή θερμική ενέργεια με τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας, με αποτέλεσμα ένας φωτοβολταϊκός/θερμικός συλλέκτης-Υ.Α.Φ., να μπορεί να εξοικονομεί περισσότερη θερμική ενέργεια από ένα συμβατικό φωτοβολταϊκό/θερμικό συλλέκτη νερού ή αέρα. Οι μέσες θερμοκρασίες της δεξαμενής αποθήκευσης νερού ήταν για το ΦΒ/Θ-Υ.Α.Φ. 40,3 ºC, ενώ για το ΦΒ/Θ 42,4 ºC. Η λανθάνουσα θερμότητα που αποθηκεύεται στην περίπτωση των ΥΑΦ, μετατρέπεται σε χρήσιμη θερμότητα, η οποία χρησιμοποιείται σε περίπτωση απουσίας ηλιακής ενέργειας. Τέλος, οι θετικές ιδιότητες των Υ.Α.Φ., προσέφεραν στο ηλιοθερμικό σύστημα συνδυασμένης λειτουργίας εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας στο 87,5% αυξημένη κατά 14,5% από ένα συμβατικό ηλιοθερμικό σύστημα [12].

Τέλος, οι Gagliano κ.ά, μελέτησαν διεξοδικά την απόδοση μια εγκατάστασης με ΦΒ/θερμικό συλλέκτη και της αντίστοιχης εγκατάστασης που αποτελείται από ξεχωριστό φωτοβολταϊκό και θερμικό ηλιακό πεδίο. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε για ένα κτίριο μονοκατοικίας σε τρεις διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές, την Κατάνια, το Σπλιτ και το Φρέιμπουργκ. Σύμφωνα με τους συγγραφείς, η εγκατάσταση με το ΦΒ/θερμικό συλλέκτη παράγει συνολικά περισσότερη ενέργεια σε σχέση με αυτήν που έχει ξεχωριστούς φωτοβολταϊκούς και θερμικούς συλλέκτες. Ωστόσο, λόγω του αισθητά χαμηλότερου κόστους επένδυσης που απαιτείται για το συμβατικό φωτοβολταϊκό σύστημα, το τελευταίο προέκυψε και για τις τρεις πόλεις το πιο οικονομικά αποδοτικό σενάριο [13].

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η διαστασιολόγηση του ηλιοθερμικού συστήματος στην παρούσα μελέτη πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τη μεθοδολογία καμπυλών f ενώ τα θερμικά φορτία του κτιρίου υπολογίσθηκαν σύμφωνα με το πρότυπο EN 12831. Ακολούθως η απαίτηση για Ζεστό Νερό Χρήσης καθώς και τα ηλεκτρικά φορτία του κτιρίου υπολογίσθηκαν σύμφωνα με τον Κανονισμό Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων (Κ.Εν.Α.Κ.).

3.1. Υπολογισμός απόδοσης φωτοβολταϊκού/θερμικού συλλέκτη

Ο φωτοβολταϊκός/θερμικός συλλέκτης, συνδυάζει τις λειτουργίες ενός επίπεδου ηλιακού συλλέκτη και τις λειτουργίες ενός φωτοβολταϊκού συλλέκτη, για την ταυτόχρονη παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας. Ως επακόλουθο, η συνολική απόδοση ενός τέτοιου συστήματος, αποτελεί το άθροισμα της θερμικής και ηλεκτρικής απόδοσής του:

$$\eta = \eta_{el} + \eta_{th}$$

3.1.1. Υπολογισμός ηλεκτρικής απόδοσης η_{el}

Η λειτουργία του φωτοβολταϊκού στοιχείου και η ποσότητα της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας εξαρτάται από τρεις σημαντικούς μεταβλητούς παράγοντες όπως η ένταση της ακτινοβολίας, η αντίσταση του κυκλώματος και η θερμοκρασία του στοιχείου. Ως εκ τούτου, κατά το σχεδιασμό των φωτοβολταϊκών στοιχείων, επιδιώκεται ώστε οι παράγοντες αυτοί να παίρνουν ευνοϊκές τιμές και να παράγεται η μέγιστη δυνατή ηλεκτρική ισχύς, που επιτρέπει ο συντελεστής ηλεκτρικής απόδοσης των στοιχείων.

Ο ονομαστικός βαθμός ηλεκτρικής απόδοσης, εκφράζει το ποσοστό ηλιακής ακτινοβολίας που μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια στο φωτοβολταϊκό στοιχείο και υπολογίζεται από την εξίσωση 1 [13]:

$$\eta_{el} = \frac{I_m V_m}{A_c G} \quad (1)$$

Όπου:

I_m, V_m : η τάση και το ρεύμα για τη συνθήκη λειτουργίας του φωτοβολταϊκού στο σημείο μέγιστης ισχύος, αντίστοιχα. [V], [A].

A_c: η ωφέλιμη επιφάνεια φωτοβολταϊκού/θερμικού συλλέκτη [m^2]

G: 1000$\frac{W}{m^2}$, η ένταση ηλιακής ακτινοβολίας υπό σταθερές συνθήκες με θερμοκρασία εξωτερικού αέρα

$T_{amb} = 298\ K$

3.1.2. Υπολογισμός θερμικής απόδοσης η_{th}

Ο βαθμός απόδοσης του θερμικού συλλέκτη ορίζεται ως ο λόγος της χρήσιμης θερμικής ενέργειας Q_{th} προς τη διαθέσιμη προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια G επί το εμβαδόν της επιφάνειας A_c και προσδιορίζεται από εξίσωση 2 [13]:

$$\eta_{th} = \frac{Q_{th}}{G \cdot A_c} \qquad (2)$$

Η ωφέλιμη θερμική ισχύς Q_{th}, εκφράζει τη διαφορά μεταξύ απορροφούμενης ισχύος της ηλιακής ενέργειας και της θερμότητας λόγω απωλειών. Εκφράζεται από την εξίσωση 3 [14]:

$$Q_{th} = A_c \cdot F_R[(\tau\alpha)_n \cdot G_T - U_L(T_i - T_a)] \quad [W] \quad (3)$$

Όπου:

A_c: η ωφέλιμη επιφάνεια συλλογής θερμικού συλλέκτη[m^2].

F_R : ο συντελεστής θερμικής απολαβής του συλλέκτη.

$(\tau\alpha)_n$: το ενεργό γινόμενο, εκφράζει τη μέση τιμή του γινομένου διαπερατότητας (τ) του υαλοπίνακα και της απορροφητικότητας (α) της μαύρης απορροφητικής επιφάνειας του συλλέκτη.

G_T: η ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας [$\frac{W}{m^2}$].

U_L: ο συνολικός ισοδύναμος συντελεστής λόγω θερμικών απωλειών του συλλέκτη [$\frac{W}{m^2 \cdot K}$].

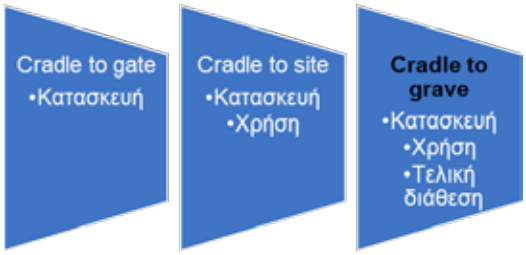
$T_i - T_a$: η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ εξωτερικού αέρα και του ρευστού που κυκλοφορεί στο συλλέκτη αντίστοιχα [K]

3.2. Ενεργειακή προσομοίωση υπό μελέτη συστήματος

Η ενεργειακή προσομοίωση του συστήματος πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό Polysun της εταιρείας Velasolaris. Το λογισμικό "Polysun" αναπτύχθηκε από το ινστιτούτο "SolarTechnik Prufung Forschung" του πολυτεχνείου "HSR Rapperswil" της Ελβετίας. Δίνει την ευκαιρία στο χρήστη να προσομοιώνει αποτελεσματικά, συστήματα όπως ηλιοθερμικά, φωτοβολταϊκά, φωτοβολταϊκά/θερμικά και γεωθερμικά, παρέχοντας παράλληλα τη δυνατότητα ενεργειακής βελτιστοποίησής τους μέσω κατάλληλου σχεδιασμού και τροποποιήσεων [15].

3.3. Περιβαλλοντική αξιολόγηση υπό μελέτη συστήματος

Η περιβαλλοντική αξιολόγηση του συστήματος πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τη μεθοδολογία του ανθρακικού αποτυπώματος. Το Ανθρακικό Αποτύπωμα αντιπροσωπεύει το σύνολο των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, οι οποίες προκαλούνται άμεσα ή έμμεσα από τη λειτουργία ενός συστήματος. Το αποτύπωμα συμπεριλαμβάνει τις εκπομπές έξι αερίων του θερμοκηπίου σύμφωνα με το Πρωτόκολλο του Κιότο (Διοξείδιο του άνθρακα - CO_2, Μεθάνιο - CH_4, Υποξείδιο του αζώτου - N_2O, Υδροφθοράνθρακες (HFCs), Υπερφθοράνθρακες (PFCs) και Εξαφθοριούχο θείο (SF_6)) και μετριέται σε τόννους ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα (tCO_{2eq}), το οποίο περιλαμβάνει το σύνολο των παραπάνω εκπομπών. Ο υπολογισμός του Ανθρακικού Αποτυπώματος, εκτός του ότι αναδεικνύει τα συγκριτικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ενός συστήματος σε ότι αφορά την περιβαλλοντική του επίδοση και τη διαχείριση των κλιματικών επιβαρύνσεων, αποτελεί σημαντικό παράγοντα βελτίωσης της ενεργειακής αποδοτικότητας, της καλύτερης διαχείρισης πόρων και κατ' επέκταση της μείωσης του κόστους [16]. Το ανθρακικό αποτύπωμα μπορεί να υπολογισθεί με τρεις διαφορετικές μεθοδολογικές προσεγγίσεις όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.



Εικόνα 2: Μεθοδολογικές προσεγγίσεις υπολογισμού ανθρακικού αποτυπώματος, [1]

Στην παρούσα μελέτη εφαρμόσθηκε η μεθοδολογία cradle to grave σύμφωνα με την οποία υπολογίζεται το ανθρακικό αποτύπωμα για τον κύκλο ζωής του συστήματος και πιο συγκεκριμένα:

- Το στάδιο της κατασκευής
- Το στάδιο της χρήσης
- Το στάδιο της τελικής διάθεσης όταν ολοκληρωθεί ο κύκλος ζωής του συστήματος.

Είναι προφανές ότι με αυτόν τον τρόπο, ο υπολογισμός του ανθρακικού αποτυπώματος είναι ολοκληρωμένος και αντικατοπτρίζει την πραγματική περιβαλλοντική επίδοση του συστήματος [17].

Πιο συγκεκριμένα, ο υπολογισμός των εκπομπών έγινε σύμφωνα με την εξίσωση 4 [1], [16]:

$$Εκπομπές = \sum M_{ιπ} * F_{ιπ} + \sum (Q_{ηλ} * F_{ηλ} + Q_{κ} * F_{κ}) + \sum M_{ιτδ} * F_{ιτδ} \quad (4)$$

όπου,

$M_{ιπ}$: η ποσότητα του υλικού κατά την παραγωγή (kg)

$F_{ιπ}$: ο συντελεστής ισοδύναμων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου του υλικού

$Q_{ηλ}$: κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας (kWh)

$F_{ηλ}$: ο συντελεστής ισοδύναμων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου για την ηλεκτρική ενέργεια

$Q_{κ}$: κατανάλωση συμβατικού καυσίμου (φυσικό αέριο) (kWh)

$F_{κ}$: ο συντελεστής ισοδύναμων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου για το καύσιμο

$M_{ιτδ}$: η ποσότητα του υλικού κατά την τελική διάθεση (kg)

$F_{ιτδ}$: ο συντελεστής ισοδύναμων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου του υλικού για την φάση της τελικής διάθεσης

Οι συντελεστές εκπομπών επιλέχθηκαν από τη βάση δεδομένων DEFRA [18] για το κάθε υλικό και καύσιμο. Μόνο για την ηλεκτρική ενέργεια ο συντελεστής εκπομπής επιλέχθηκε σύμφωνα με τα επίσημα δεδομένα της ΔΕΗ [19], [20] καθώς η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα στηρίζεται στο φυσικό αέριο, το λιγνίτη και εν συνεχεία τις Α.Π.Ε., και συνεπώς δεν καλυπτόταν από την βάση δεδομένων DEFRA. Επιπρόσθετα, ο συντελεστής εκπομπών ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα για το πυρίτιο που αποτελεί βασικό υλικό του φωτοβολταϊκού στοιχείου επιλέχθηκε σύμφωνα με τη βιβλιογραφία καθώς δεν υπάρχει στη βάση δεδομένων DEFRA [21].

4. Εφαρμογή σε κτίριο μονοκατοικίας

4.1. Περιγραφή κτιρίου

Η κατοικία αποτελείται από δύο υπέργειους ορόφους, με κλιμακοστάσιο και ανελκυστήρα να οδηγεί και σε υπόγειο χώρο. Όλοι οι χώροι του ισογείου και του ορόφου της κατοικίας, συμπεριλαμβανόμενου του κλιμακοστασίου, είναι θερμαινόμενοι ενώ ο υπόγειος χώρος είναι μη θερμαινόμενος. Η συνολική δομημένη επιφάνεια της μονοκατοικίας είναι 220m^2. Η συνολική θερμαινόμενη επιφάνεια είναι 130m^2 ενώ η υπόλοιπη επιφάνεια αποτελεί μη θερμαινόμενο χώρο. Το κτίριο βρίσκεται στη Θεσσαλονίκη και τα δομικά του στοιχεία είναι θερμομονωμένα σύμφωνα με αυτά που ορίζει ο Κ.Εν.Α.Κ. Οι ενεργειακές

απαιτήσεις για θέρμανση, ψύξη, ζεστό νερό χρήσης καθώς και τα ηλεκτρικά φορτία παρουσιάζονται στο πίνακα 1.

Πίνακας 1: Ενεργειακές απαιτήσεις μονοκατοικίας

Ενεργειακές απαιτήσεις	Ζώνη Γ'			
	Θέρμανση (kWh/m²)	Ψύξη (kWh/m²)	Z.N.X. (kWh/m²)	Ηλεκτρικό φορτίο (kWh/m²)
Ενισχυμένη θερμομόνωση	15,41	17,95	15,26	36

4.2. Περιγραφή σεναρίου 1: ηλιοθερμικό σύστημα συνδυασμένης λειτουργίας με φωτοβολταϊκό/θερμικό συλλέκτη

Το ηλιοθερμικό σύστημα που μελετήθηκε είναι συνδυασμένης λειτουργίας και χρησιμοποιείται για την κάλυψη των αναγκών θέρμανσης και Ζεστού Νερού Χρήσης του κτιρίου καθώς και των ηλεκτρικών του αναγκών. Στο σύστημα είναι τοποθετημένη βοηθητική πηγή και πιο συγκεκριμένα λέβητας φυσικού αερίου για την κάλυψη των αναγκών όταν το ηλιοθερμικό σύστημα δεν επαρκεί. Επιπρόσθετα, στο κτίριο είναι εγκατεστήμενη ενδοδαπέδια θέρμανση με στόχο τη μέγιστη εκμετάλλευση του ηλιοθερμικού συστήματος. Τα ηλεκτρικά φορτία που δεν μπορούν να καλυφθούν από το φωτοβολταϊκό, καλύπτονται από το δίκτυο. Στους πίνακες 2 και 3 παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά του φωτοβολταϊκού/θερμικού συλλέκτη καθώς και του ηλιοθερμικού συστήματος αντίστοιχα που μελετήθηκαν.

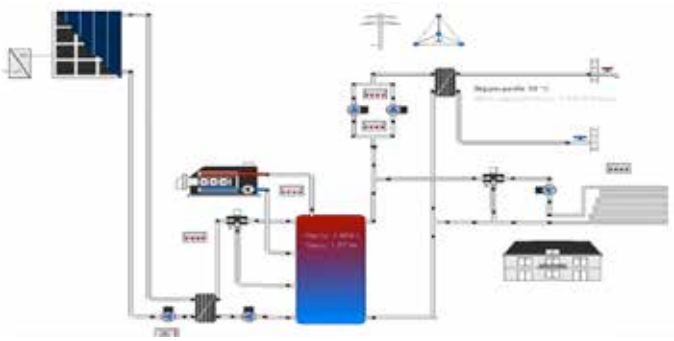
Πίνακας 2: Βασικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκού/θερμικού συλλέκτη

Εγκατεστημένη συλλεκτική επιφάνεια	$16m^2$
Εγκατεστημένη ισχύς Φωτοβολταϊκού	3kWp
Τύπος φωτοβολταϊκού συλλέκτη	Μονοκρυσταλλικός - Si
Τύπος θερμικού συλλέκτη	Επίπεδος συλλέκτης
$F_R \cdot U_L$	4,59 $\frac{W}{m^2 K}$
$F_R \cdot (\tau\alpha)_n$	0,68
$\frac{F_R}{F_R'}$	0,99
Βαθμός ηλεκτρικής απόδοσης η_{el}	0,17
Βαθμός θερμικής απόδοσης η_{th}	0,65

Πίνακας 3 Επιπρόσθετες πληροφορίες ηλιοθερμικού συστήματος

Δοχείο αποθήκευσης (l)	1000
Βοηθητική πηγή Λέβητας φυσικού αερίου	15kW
Βαθμός απόδοσης λέβητα φυσικού αερίου	0,92

Το σύστημα όπως αυτό προσομοιώθηκε στο λογισμικό Polysun παρουσιάζεται στην εικόνα 3 .



Εικόνα 3: Ηλιοθερμικό σύστημα συνδυασμένης λειτουργίας, Polysun

4.3. Περιγραφή σεναρίου 2: ηλιοθερμικό σύστημα συνδυασμένης λειτουργίας με επιλεκτικό επίπεδο θερμικό συλλέκτη

Το ηλιοθερμικό σύστημα σε αυτή την περίπτωση είναι πανομοιότυπο με το αυτό του Σεναρίου 1 και της εικόνας 3 με μόνη και βασική διαφορά την αντικατάσταση του φωτοβολταϊκού/θερμικού συλλέκτη με επιλεκτικό επίπεδο θερμικό συλλέκτη.

Τα βασικά χαρακτηριστικά του επιλεκτικού επίπεδου συλλέκτη φαίνονται στον πίνακα 4.

Πίνακας 4: Βασικά χαρακτηριστικά επιλεκτικού επίπεδου συλλέκτη

Είδος συλλέκτη	Συντελεστής μηδενικών απωλειών $F_R(\tau\alpha)_n$	Συντελεστής θερμικής απώλειας F_RU_L	Εγκατεστημένη συλλεκτική επιφάνεια (m^2)
Επιλεκτικός επίπεδος	0,77	3,75	16

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.1. Αποτελέσματα ενεργειακής αξιολόγησης

Τα αποτελέσματα που αφορούν την κάλυψη των αναγκών θέρμανσης και ZNX από το ηλιοθερμικό σύστημα παρουσιάζονται και για τα δύο σενάρια στην εικόνα ώστε να είναι δυνατή η άμεση σύγκριση τους. Σημειώνεται ότι το ηλιακό κλάσμα στην κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας παρουσιάζεται ξεχωριστά για το Ζεστό Νερό Χρήσης (SF_{ZNX}) και τη θέρμανση του κτιρίου ($SF_{\Theta EPM}$). Για λόγους συντομίας στα αποτελέσματα παρουσιάζεται το ετήσιο ηλιακό κλάσμα σε κάθε περίπτωση.

Εικόνα 4: Ετήσιο ηλιακό κλάσμα

Παρατηρείται ότι σε ότι αφορά την κάλυψη των θερμικών αναγκών, ο επιλεκτικός επίπεδος συλλέκτης παρουσιάζει κατά 7% μεγαλύτερο ηλιακό κλάσμα στην κάλυψη των αναγκών θέρμανσης και 5% υψηλότερο ηλιακό κλάσμα στη κάλυψη του ζεστού νερού χρήσης. Κατά τη διάρκεια της καλοκαιρινής περιόδου και τα δύο συστήματα είτε με ΦΒ/Θ συλλέκτη είτε με επιλεκτικό επίπεδο καλύπτουν το 100% της απαιτούμενης παραγωγής Ζεστού Νερού Χρήσης. Η μείωση αυτή στη θερμική απόδοση του ΦΒ/Θ συλλέκτη, οφείλεται κυρίως στην ύπαρξη του φωτοβολταϊκού στοιχείου επάνω από το θερμικό συλλέκτη. Ο ΦΒ/Θ συλλέκτης έχει υψηλότερο συντελεστή θερμικών απωλειών και ελαφρώς μικρότερο συντελεστή μηδενικών απωλειών σε σχέση με το θερμικό συλλέκτη. Συνεπώς, η παρουσία του φωτοβολταϊκού, μειώνει τη δυνατότητα απορρόφησης θερμικής ενέργειας.

Στη συνέχεια, στην εικόνα 5 παρουσιάζεται η παραγομένη ηλεκτρική ενέργεια από το ηλιοθερμικό σύστημα του σεναρίου 1.

Εικόνα 5: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το φωτοβολταϊκό/θερμικό σύστημα

Παρατηρείται ότι το υβριδικό ηλιοθερμικό σύστημα μπορεί να καλύψει περίπου το 35% της ετήσιας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας της συγκεκριμένης κατοικίας.

5.2. Αποτελέσματα περιβαλλοντικής αξιολόγησης

Για τον υπολογισμό του ανθρακικού αποτυπώματος χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση 4. Πιο αναλυτικά έγιναν οι ακόλουθοι υπολογισμοί:

- Κατά το στάδιο της κατασκευής υπολογίσθηκε το σύνολο των διαφορετικών υλικών των διαφόρων εξαρτημάτων που απαρτίζουν το εκάστοτε σύστημα και τα αντίστοιχα κιλά.
- Κατά το στάδιο της λειτουργίας, υπολογίσθηκαν οι ετήσιες καταναλώσεις ενέργειας που προήλθαν από την ενεργειακή αξιολόγηση του εκάστοτε συστήματος.
- Κατά το στάδιο της τελικής διάθεσης, εντοπίσθηκαν για το σύνολο των εξαρτημάτων του συστήματος, τα υλικά που έχουν τη δυνατότητα να επαναχρησιμοποιηθούν και υπολογίσθηκε η συνολική ποσότητα που μπορεί να ανακυκλωθεί ανά περίπτωση.

Για το σενάριο 1 συνυπολογίσθηκε η μείωση στις εκπομπές αέριων ρύπων που προέρχεται από την κάλυψη μερικού ποσοστού των απαιτήσεων ηλεκτρικής ενέργειας από το υβριδικό ηλιακό σύστημα. Αντιθέτως, στο σενάριο 2 το σύνολο της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας τόσο για τις ανάγκες του κτιρίου όσο και για τη λειτουργία του συστήματος θεωρήθηκε ότι καλύπτεται πλήρως από συμβατική ηλεκτρική ενέργεια του δικτύου.

Πίνακας 5: Εκπομπές CO_{2eq} στον κύκλο ζωής του συστήματος

Εκπομπές ισοδύναμων αέριων ρύπων (CO_{2eq}) [kg]	Στάδιο κατασκευής συστήματος	Στάδιο λειτουργίας συστήματος	Στάδιο τελικής απόρριψης συστήματος	ΣΥΝΟΛΙΚΑ στον κύκλο ζωής του συστήματος	Κάλυψη των ηλεκτρικών φορτίων του κτιρίου
Σενάριο 1	2.850,42	420,48	230,78	**3.501,68**	4.331,8
Σενάριο 2	2.705,69	293,45	244,52	**3.243,66**	6.618,7

Παρατηρείται, ότι όσον αφορά τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά το στάδιο της κατασκευής το σενάριο με το φωτοβολταϊκό/θερμικό συλλέκτη παρουσιάζει μεγαλύτερες εκπομπές σε σχέση με το θερμικό οι οποίες οφείλονται κυρίως στην παρουσία του πυριτίου στο φωτοβολταϊκό. Ακολούθως λόγω του ελαφρώς μικρότερου ηλιακού κλάσματος στην περίπτωση του σεναρίου 1 όσον αφορά την κάλυψη των θερμικών αναγκών, φαίνεται πως οι εκπομπές κατά το στάδιο της λειτουργίας του συστήματος για το σενάριο 1 είναι μεγαλύτερες. Συνολικά λοιπόν όπως φαίνεται και στον πίνακα 5, οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου στον κύκλο ζωής του συστήματος είναι μεγαλύτερες για την περίπτωση του φωτοβολταϊκού/θερμικού συλλέκτη. Ωστόσο, στο σενάριο 2 όπου τοποθετήθηκε απλός θερμικός ηλιακός συλλέκτης, το σύνολο των ηλεκτρικών αναγκών του κτιρίου καλύπτεται αποκλειστικά από το δίκτυο της πόλης. Αυτό με τη σειρά του έχει ως αποτέλεσμα την αυξημένη παραγωγή εκπομπών αέριων ρύπων λόγω της κατανάλωσης συμβατικής ηλεκτρικής ενέργειας. Συνεπώς, είναι φανερό ότι η εφαρμογή του φωτοβολταϊκού/θερμικού συλλέκτη συμβάλλει θετικά στη μείωση αυτών των εκπομπών. Με βάση όλα τα παραπάνω, υπολογίσθηκε ότι το σενάριο 1 παρουσιάζει συνολικά 34% λιγότερες εκπομπές αέριων ρύπων, οι οποίες οφείλονται βασικά στην μείωση της κατανάλωσης συμβατικής ηλεκτρικής ενέργειας.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα μελέτη πραγματοποιήθηκε εκτενής βιβλιογραφική έρευνα σχετικά με τη λειτουργία των υβριδικών φωτοβολταϊκών/θερμικών συλλεκτών, τις τεχνικές βελτίωσής τους και την ενσωμάτωσή τους στον κτιριακό τομέα. Παρατηρήθηκε ότι τα τελευταία χρόνια αποτελούν πεδίο σημαντικής έρευνας με στόχο τη βελτίωση των βαθμών απόδοσής τους καθώς και τη σταδιακή μείωση του απαιτούμενου κόστους επένδυσης για την αγορά και εγκατάσταση τους. Το κύριο πλεονέκτημα των υβριδικών συλλεκτών είναι πως για τον ίδιο διαθέσιμο χώρο, μπορούν να επιτύχουν συμπαραγωγή θερμότητας ηλεκτρισμού σε ικανοποιητικό επίπεδο. Στη συνέχεια, μελετήθηκαν οι βασικές αρχές σχεδιασμού υβριδικού φωτοβολταϊκού/ηλιοθερμικού συστήματος καθώς και ο υπολογισμός χαρακτηριστικών παραμέτρων του υβριδικού συλλέκτη που διέπουν τη λειτουργία του. Για τη μελέτη της ενεργειακής και περιβαλλοντικής απόδοσης του υβριδικού φωτοβολταϊκού/θερμικού συστήματος σε μία μονοκατοικία Κ.Σ.Μ.Κ.Ε., σχεδιάστηκε η κατάλληλη διάταξη ώστε να καλύπτει πρωτίστως κατά 80% την απαίτηση σε Ζεστό Νερό Χρήσης. Έπειτα, το σύστημα αυτό, προσομοιώθηκε στο λογισμικό "Polysun" και στη συνέχεια μελετήθηκε και συγκρίθηκε ως προς την ενεργειακή και περιβαλλοντική απόδοση του, η αντικατάσταση των υβριδικών συλλεκτών από θερμικούς επιλεκτικούς επίπεδους συλλέκτες. Η αντικατάσταση των φωτοβολταϊκών/θερμικών συλλεκτών από απλούς επιλεκτικούς επίπεδους οδήγησε σε υψηλότερα ποσοστά ηλιακής κάλυψης των θερμικών φορτίων. Συγκεκριμένα, το ποσοστό κάλυψης ζεστού νερού χρήσης και θέρμανσης αυξήθηκε κατά 4,2% και 7%, αντίστοιχα. Η αύξηση αυτή, οφείλεται στο μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης και στις μικρότερες απώλειες του θερμικού συλλέκτη σε σχέση με αυτές του υβριδικού. Παρόλα αυτά, παρά τις χαμηλότερες αποδόσεις των υβριδικών συλλεκτών, μπορούν να παράγουν τελικά περισσότερη αξιοποιήσιμη ενέργεια σε σχέση με ένα συμβατικό ηλιοθερμικό σύστημα συνδυασμένης λειτουργίας, εξαιτίας της δυνατότητας της ταυτόχρονης παραγωγής θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας σε μία μόνο επιφάνεια συλλογής. Το γεγονός αυτό συμβάλλει θετικά και στον υπολογισμό του ανθρακικού αποτυπώματος καθώς υπολογίσθηκε ότι οι συνολικές εκπομπές αέριων ρύπων είναι κατά 34% μειωμένες στην περίπτωση εγκατάστασης του υβριδικού φωτοβολταϊκού/θερμικού συλλέκτη σε σχέση με τη χρήση ενός επιλεκτικού επίπεδου συλλέκτη, λόγω της σημαντικής εξοικονόμησης στη χρήση συμβατικής ηλεκτρικής ενέργειας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Έ. Κυριάκη, 'Ενσωμάτωση τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε κτίρια σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας', Διδακτορική διατριβή. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2020.

[2] '2020 climate & energy package | Climate Action', 2020. https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_en (accessed Apr. 10, 2020).

[3] '2030 climate & energy framework | Climate Action', 2030. https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_en (accessed Apr. 10, 2020).

[4] '2050 long-term strategy | Climate Action', 2050. https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_en (accessed Apr. 10, 2020).

[5] EAA, *Trends and projections in Europe 2019*, no. 15. 2019.

[6] M. Herrando, C. N. Markides, and K. Hellgardt, 'A UK-based assessment of hybrid PV and solar-thermal systems for domestic heating and power: System performance', *Appl. Energy*, vol. 122, pp. 288–309, Jun. 2014, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.01.061.

[7] P. J. Axaopoulos and E. D. Fylladitakis, 'Performance and economic evaluation of a hybrid photovoltaic/thermal solar system for residential applications', *Energy Build.*, vol. 65, pp. 488–496, Oct. 2013, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.06.027.

[8] L. Brottier, S. Naudin, V. Veeser, G. Terrom, and R. Bennacer, 'Field Test Results of an Innovative PV/T Collector for Solar Domestic Hot Water', in *Energy Procedia*, Jun. 2016, vol. 91, pp. 276–283, doi: 10.1016/j.egypro.2016.06.219.

[9] S. A. Kalogirou, 'Use a TRNSYS for modelling and simulation of a hybrid pv-thermal solar system for Cyprus', *Renew. Energy*, vol. 23, no. 2, pp. 247–260, Jun. 2001, doi: 10.1016/S0960-1481(00)00176-2.

[10] A. Fudholi, K. Sopian, M. H. Yazdi, M. H. Ruslan, A. Ibrahim, and H. A. Kazem, 'Performance analysis of photovoltaic thermal (PVT) water collectors', *Energy Convers. Manag.*, vol. 78, pp. 641–651, Feb. 2014, doi: 10.1016/j.enconman.2013.11.017.

[11] A. N. Al-Shamani, K. Sopian, S. Mat, H. A. Hasan, A. M. Abed, and M. H. Ruslan, 'Experimental studies of rectangular tube absorber photovoltaic thermal collector with various types of nanofluids under the tropical climate conditions', *Energy Convers. Manag.*, vol. 124, pp. 528–542, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.enconman.2016.07.052.

[12] X. Yang, L. Sun, Y. Yuan, X. Zhao, and X. Cao, 'Experimental investigation on performance comparison of PV/T-PCM system and PV/T system', *Renew. Energy*, vol. 119, pp. 152–159, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.renene.2017.11.094.

[13] A. Gagliano, G. M. Tina, S. Aneli, and S. Nižetić, 'Comparative assessments of the performances of PV/T and conventional solar plants', *J. Clean. Prod.*, vol. 219, pp. 304–315, May 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.02.038.

[14] J. A. Duffie, W. A. Beckman, and J. McGowan, *Solar Engineering of Thermal Processes*, vol. 53, no. 4. 1985.

[15] VelaSolaris, 'Polysun Simulation Software'. 2018.

[16] E. Giama and A. M. Papadopoulos, 'Benchmarking carbon footprint and circularity in production processes: The case of stonewool and extruded polysterene', *J. Clean. Prod.*, vol. 257, p. 120559, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120559.

[17] Ε. Γιαμά, 'Το Ανθρακικό Αποτύπωμα ως δείκτης βιωσιμότητας των ανθρωπογενών διεργασιών', in *Για ένα βιώσιμο οικιστικό περιβάλλον: Προκλήσεις – Απειλές - Προτάσεις*, Π. Κοσμόπουλος, Ed. University Studio Press, 2019, pp. 61–79.

[18] Department for Business Energy & Industrial Strategy, 'Department for Environment, Food and Rural Affairs (DEFRA), Database for conversion factors'. 2020.

[19] 'Κλιματική Αλλαγή | ΔΕΗ Α.Ε.', 2020. https://www.dei.gr/el/i-dei/perivallon/perivallontiki-stratigiki/klimatiki-allagi (accessed Nov. 15, 2020).

[20] 'ΔΕΗ: Μείωσε τον συντελεστή εκπομπών CO2 κατά 21,5% την τελευταία 25ετία | Green Agenda | Περιβάλλον, Οικολογία, Μεσόγειος, Ενέργεια', 2020. http://greenagenda.gr/30596/ (accessed Nov. 15, 2020).

[21] M. GREEN *et al.*, 'Solar cell efficiency tables (version 40)', *Ieee Trans Fuzzy Syst*, vol. 20, no. 6, pp. 1114–1129, 2012, doi: 10.1002/pip.

ΑΠΟ ΤΗΝ ΗΛΙΑΚΗ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΣΤΟΝ ΒΙΩΣΙΜΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ. ΕΜΠΕΙΡΙΑ ΑΠΟ ΤΙΣ ΔΙΑΛΕΞΕΙΣ / ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΤΗΣ ΣΧΟΛΗΣ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΩΝ Ε.Μ.Π. (1978-ΣΗΜΕΡΑ)

Ελένη Αλεξάνδρου[1], Φλώρα Μπουγιατιώτη[1*], Ευάγγελος Ευαγγελινός[1], Ηλίας Ζαχαρόπουλος[1]

[1] Τομέας IV Συνθέσεων Τεχνολογικής Αιχμής, Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, ΕΜΠ,
e-mail: fbougiatioti@central.ntua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η αρχιτεκτονική εκπαίδευση είναι πολυδιάστατη και καλλιεργεί τις ικανότητες και την κριτική σκέψη των σπουδαστών/τριών στον σχεδιασμό σε όλες τις κλίμακες, από αυτή της πόλης και του κτιρίου μέχρι εκείνη του αντικειμένου, καλύπτοντας ένα ευρύ φάσμα γνωστικών αντικειμένων που παρέχονται είτε ως υποχρεωτικά, είτε ως υποχρεωτικά κατ' επιλογήν μαθήματα. Σε αυτή την διαδικασία, το τελικό αποτέλεσμα επηρεάζεται και διαμορφώνεται από αισθητικές, λειτουργικές, κοινωνικές, πολιτισμικές, τεχνολογικές και οικολογικές παραμέτρους. Από αυτές, η τελευταία δηλαδή η σχέση της διαδικασίας παραγωγής δομημένου χώρου με το περιβάλλον και την βιωσιμότητα αλλά και ο βιοκλιματικός σχεδιασμός αποτελούσε ένα μάλλον περιφερειακό, δευτερεύον ζήτημα, το οποίο, όμως, την τελευταία και πλέον δεκαετία έχει ξεκινήσει να αποκτά αυξανόμενο ενδιαφέρον ανάμεσα σε μια μερίδα σπουδαστώ/τριών.

Η εργασία διερευνά τις εργασίες που εκπονήθηκαν στα πλαίσια του μαθήματος «Διάλεξη» 9ου εξαμήνου στον Τομέα Συνθέσεις Τεχνολογικής Αιχμής της Σχολής Αρχιτεκτόνων του Ε.Μ.Π. κατά τη διάρκεια των 40 τελευταίων ετών σχετικά με ζητήματα βιοκλιματικής αρχιτεκτονικής, βιώσιμου περιβαλλοντικού σχεδιασμού και ήπιων μορφών ενέργειας. Στόχος της εργασίας είναι να εξετάσει τη σχέση της θεματολογίας των Διαλέξεων με την τρέχουσα αρχιτεκτονική πρακτική, αλλά και τη διδακτική πραγματικότητα της Σχολής Αρχιτεκτόνων ΕΜΠ κάθε περιόδου. Τα συμπεράσματα αφορούν τη μετατόπιση του ενδιαφέροντος των σπουδαστών/τριών κατά τη διάρκεια των ετών, εντοπίζοντας περισσότερο ή λιγότερο «δημοφιλή» θέματα.

Λέξεις Κλειδιά: βιοκλιματικός σχεδιασμός, ενεργειακός σχεδιασμός, εκπαίδευση αρχιτεκτόνων, ερευνητική εργασία, βιωσιμότητα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Ζητήματα βιωσιμότητας στην αρχιτεκτονική εκπαίδευση

Η αρχιτεκτονική εκπαίδευση και τα βασικά συστατικά στοιχεία της έχουν αδιαμφισβήτητη επίδραση στη διαμόρφωση ήθους, κριτηρίων και κριτικής σκέψης της επόμενης γενιάς αρχιτεκτόνων. Η Διεθνής Ένωση Αρχιτεκτόνων (UIA) [1] υποστηρίζει ότι: «Η αρχιτεκτονική εκπαίδευση που προετοιμάζει τους αρχιτέκτονες για την επαγγελματική τους ζωή, θα πρέπει να αναφέρεται στα παρακάτω πλαίσια και στους ειδικούς στόχους που αυτά περιλαμβάνουν:

- Κοινωνικό, πολιτιστικό και πολιτικό πλαίσιο
- Επαγγελματικό, τεχνολογικό και βιομηχανικό πλαίσιο
- Τη Γη: τοπικό και πλανητικό οικολογικό πλαίσιο
- Ακαδημαϊκό πλαίσιο, που αφορά γενικότερα στην επιστήμη και τη γνώση
- Διεθνές πλαίσιο»

Ταυτόχρονα, η UIA (2011) [1] περιλαμβάνει τη βιωσιμότητα στις ειδικές δεξιότητες που πρέπει να περιλαμβάνονται στην αρχιτεκτονική εκπαίδευση, αναφέροντας:

- την απόκτηση συνειδητοποίησης απέναντι στις ανθρώπινες, κοινωνικές, πολιτιστικές, αστικές, αρχιτεκτονικές και περιβαλλοντικές αξίες, καθώς και στην αρχιτεκτονική κληρονομιά και
- την απόκτηση επαρκούς γνώσης με στόχο να μπορεί να επιτύχει οικολογικά βιώσιμο σχεδιασμό και περιβαλλοντική προστασία και αποκατάσταση.

Τα τελευταία χρόνια, υπάρχει μια συνεχώς αυξανόμενη συνολική συνειδητοποίηση της κλιματικής αλλαγής και γενικότερα των σοβαρών περιβαλλοντικών προβλημάτων, καθώς και του βιώσιμου σχεδιασμού ως μια σοβαρή απάντηση απέναντι σε αυτά. [2,3,4,5] Ταυτόχρονα, ο περιβαλλοντικός και ενεργειακά αποδοτικός σχεδιασμός δεν αποτελεί πλέον μια καθαρά τεχνολογική προσέγγιση, αλλά συσχετίζεται ουσιαστικότερα και αμεσότερα με τον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό και κατά συνέπεια με τους στόχους της εκπαίδευσης των αρχιτεκτόνων. [3]

Σύμφωνα λοιπόν με το παραπάνω πλαίσιο, κατά τις τελευταίες δεκαετίες, οι περισσότερες Σχολές Αρχιτεκτονικής έχουν εισάγει στα προγράμματα σπουδών τους μαθήματα που σχετίζονται με ζητήματα βιωσιμότητας, τόσο σε προπτυχιακό, όσο και σε μεταπτυχιακό επίπεδο. Πηγαίνοντας ακόμη παραπέρα, πολλοί μελετητές [2,3,4,5] τονίζουν ότι η βιωσιμότητα πρέπει να τοποθετηθεί στο κέντρο της αρχιτεκτονικής εκπαίδευσης, από τα πρώτα εξάμηνα μέχρι τα τελευταία, επεκτεινόμενη και στη συνεχιζόμενη εκπαίδευση και τη δια βίου μάθηση, σημειώνοντας ότι αυτός είναι ο μόνος τρόπος για να επιτευχθεί η ουσιαστική κατανόηση των αρχών της και η εφαρμογή τους στην αρχιτεκτονική πρακτική και στον σχεδιασμό ή/και τον ανασχεδιασμό κτιρίων στο μέλλον. [5]

1.2. Ζητήματα βιωσιμότητας στο Πρόγραμμα Προπτυχιακών Σπουδών της Σχολής Αρχιτεκτόνων Μηχανικών Ε.Μ.Π.

Το Πρόγραμμα Προπτυχιακών Σπουδών της Σχολής Αρχιτεκτόνων Μηχανικών Ε.Μ.Π., όπως αναθεωρήθηκε το 2018, αναφέρεται στη σημασία της παραμέτρου βιωσιμότητας, σημειώνοντας ότι «τα μαθήματα κατευθύνουν τους σπουδαστές-σπουδάστριες στη συνειδητοποίηση των αρχών της αειφορίας στην αρχιτεκτονική και της ανάγκης σεβασμού και ενσυνείδητου σχεδιασμού του περιβάλλοντος και του - φυσικού και δομημένου - τοπίου, παράλληλα με την εξυπηρέτηση των ανθρώπινων αναγκών. Οι σπουδές στη Σχολή επιδιώκουν τη δημιουργία ολοκληρωμένων επιστημόνων, που θα έχουν αποκτήσει ικανότητα διεπιστημονικής συνεργασίας και θα έχουν κατανοήσει την ευθύνη τους απέναντι στην κοινωνία για τη δημιουργία ανθρωπογενούς περιβάλλοντος, υψηλής ποιότητας που θα πληροί αισθητικές, λειτουργικές, πολιτιστικές, τεχνολογικές και οικολογικές απαιτήσεις». [6]

1.3. Διάλεξη 9ου εξαμήνου (Ερευνητική εργασία)

Στη Σχολή Αρχιτεκτόνων Ε.Μ.Π., η Διάλεξη 9ου εξαμήνου αποτελεί ερευνητική / θεωρητική εργασία και περιλαμβάνει αναλυτική διερεύνηση και τεκμηρίωση θέματος που εντάσσεται στο περιεχόμενο των μαθημάτων των Τομέων της Σχολής. Εκπονείται στις επιστημονικές περιοχές ενός ή περισσοτέρων

Τομέων ή και σε συνεργασία διδασκόντων των Τομέων της Σχολής με διδάσκοντες άλλων Τομέων του Ιδρύματος. Συνήθως εκπονείται από έναν ή δύο σπουδαστές/σπουδάστριες. [7]

Η επιλογή του θέματος είναι ελεύθερη, με τους/τις φοιτητές/φοιτήτριες να μπορούν να το επιλέξουν σύμφωνα με προσωπικό τους ενδιαφέρον και προβληματισμό γύρω από ζητήματα με τα οποία έχουν έρθει σε επαφή στα υποχρεωτικά και κατ' επιλογήν μαθήματα που έχουν παρακολουθήσει κατά τα προηγούμενα 8 εξάμηνα των σπουδών τους και επιθυμούν να το διερευνήσουν σε βάθος.

Το συγκεκριμένο μάθημα είναι πολύ σημαντικό, καθώς αποτελεί την πρώτη ουσιαστική και συστηματική επαφή των σπουδαστών/τριών με την ερευνητική διαδικασία. Σε αυτό το επίπεδο σπουδών,, η ωριμότητα και το γεγονός ότι έχουν επεξεργαστεί πολλά ζητήματα πάνω στο εκπαιδευτικό και γνωστικό πεδίο τους βοηθά στην ενδελεχή ανάλυση ενός συγκεκριμένου θέματος. Στα πλαίσια του μαθήματος της «Διάλεξης» 9^{ου} εξαμήνου εξοικειώνονται με την διαδικασία έρευνας και επεξεργασίας στοιχείων, την κριτική σκέψη, που περιλαμβάνει εκτεταμένη και εντοπισμένη ανάγνωση ελληνικής και ξένης βιβλιογραφίας, συζήτηση και συνεργασία με τους διδάσκοντες, αλλά και με ειδικούς από άλλες επιστημονικές περιοχές, καθώς και, κατά περίπτωση, με πρωτότυπη έρευνα (ερωτηματολόγια, επιτόπια έρευνα, μετρήσεις, κ.λπ.). Το πιο απαιτητικό τμήμα της εργασίας είναι εκείνο της συγγραφής της εργασίας, όπου το σύνολο της συγκεντρωμένης πληροφορίας πρέπει να παρουσιαστεί κατά τρόπο εποπτικό, εύγλωττο και συγκροτημένο, και να συνδυαστεί με κατάλληλο εποπτικό υλικό (εικόνες και πίνακες). [8]

Το τελικό παραδοτέο είναι τεύχος κειμένου κατά το πρότυπο δοκιμίου (με παραπομπές, βιβλιογραφία, εικόνες κ.λπ.), ενώ η εργασία παρουσιάζεται ενώπιον ακροατηρίου με τη μορφή διάλεξης διάρκειας μιας ακαδημαϊκής ώρας. Οι παρουσιάσεις των διαλέξεων γίνονται κατά τις 3 (τρεις) προβλεπόμενες εξεταστικές περιόδους (Φεβρουαρίου-Μαρτίου, Μαΐου-Ιουνίου και Σεπτεμβρίου-Οκτωβρίου) και η αξιολόγηση από τριμελή επιτροπή, ένα μέλος της οποίας είναι ο εισηγητής (ένας από τους επιβλέποντες, όταν υπάρχουν περισσότεροι). [7]

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η συγκεκριμένη εργασία βασίζεται στο Αρχείο Διαλέξεων 9^{ου} εξαμήνου στην Περιοχής Οικοδομικής του Τομέα Συνθέσεις Τεχνολογικής Αιχμής, στο οποίο κατά τη διάρκεια των 40 και πλέον τελευταίων ετών (1978-2020) πραγματοποιείται συστηματική καταγραφή των εργασιών που είναι σχετικές με ζητήματα βιοκλιματικής αρχιτεκτονικής, βιώσιμου σχεδιασμού και ήπιων μορφών ενέργειας. Η καταγραφή περιλαμβάνει το ακαδημαϊκό έτος παράδοσης/παρουσίασης, το/α όνομα/ονόματα των σπουδαστών/τριών, τον πλήρη τίτλο της εργασίας, καθώς και τον/την Επιβλέποντα/ουσα.

Είναι προφανές ότι στην ίδια θεματολογία έχουν εκπονηθεί Διαλέξεις, τόσο υπό την επίβλεψη άλλων διδασκόντων του Τομέα, όσο και στο σύνολο της Σχολής. Ωστόσο, ως βάση για την παρούσα εργασία λαμβάνεται το προαναφερθέν Αρχείο, εξαιτίας της πλήρους καταγραφής που αυτό περιλαμβάνει.

Στόχος της εργασίας είναι να εξετάσει αυτό το δείγμα Διαλέξεων (137 στο σύνολο) ως προς μια σειρά ποσοτικών και ποιοτικών παραμέτρων. Έτσι, η μεθοδολογία προσέγγισης περιλαμβάνει κατ' αρχήν περιγραφική στατιστική ανάλυση με την γραφική παρουσίαση επιλεγμένων ποσοτικών μεταβλητών, όπως η κατανομή των εργασιών:

- ανά ακαδημαϊκό έτος και ανά δεκαετία
- σε ατομικές και ομαδικές εργασίες

Στη συνέχεια, επιχειρείται η ποιοτική προσέγγιση της θεματολογίας των εργασιών. Ως προς τον βιοκλιματικό και βιώσιμο σχεδιασμό, για πολλά από τα οποία έχει γίνει εισαγωγή και έχουν συζητηθεί στο μάθημα κορμού του 5^{ου} εξαμήνου «Οικοδομική 3 - Ανάλυση και σχεδιασμός κτιριακής δομής με έμφαση στις αρχές βιωσιμότητας και τη βιοκλιματική αρχιτεκτονική», αλλά και σε μαθήματα επιλογής, όπως τα «Ε.Θ. Δομικών Υλικών 5^{ου} εξαμήνου», και τα «Ε.Θ. Οικοδομικής 6^{ου} εξαμήνου-Κατεύθυνση: Βιώσιμος και βιοκλιματικός σχεδιασμός», καθώς και σε άλλα μαθήματα της Σχολής. Ως προς την παραδοσιακή αρχιτεκτονική, το κυριότερο σχετικό μάθημα κορμού είναι το «5^{Α}-Ανάλυση και μελέτη ιστορικών κτιρίων και συνόλων», που διδάσκεται στο 5^{ο} εξάμηνο.

Ωστόσο, τα μαθήματα κορμού κι επιλογής μπορούν μόνο να παρέχουν ενδεικτικά στοιχεία πάνω σε ένα σύνολο θεμάτων, ενώ η Διάλεξη 9ου εξαμήνου απαιτεί την εστίαση σε ένα συγκεκριμένο αντικείμενο και την αναλυτική επεξεργασία του. [8]

Οι εργασίες που έχουν εκπονηθεί μέχρι σήμερα καλύπτουν ένα σημαντικό μέρος των θεμάτων που σχετίζονται με το περιβάλλον και την αρχιτεκτονική. Για λόγους οργάνωσης, αυτά ομαδοποιούνται σε μια σειρά από βασικές θεματικές ενότητες που θεωρούνται θεμελιώδεις για την τρέχουσα αρχιτεκτονική πρακτική [8] :

- Βιοκλιματικός και παθητικός σχεδιασμός (bioclimatic design), που αναφέρεται στην εναρμόνιση των κτιρίων με το κλίμα και το άμεσο περιβάλλον, διασφαλίζοντας παράλληλα άνετη και υγιεινή διαβίωση του ανθρώπου μέσα στα κτίρια, αλλά και στον εξωτερικό χώρο [9]
- Ενεργειακός σχεδιασμός (energy-efficient design), που σχετίζεται με τον σχεδιασμό κτιρίων υψηλών ενεργειακών επιδόσεων, με μειωμένες ενεργειακές απαιτήσεις για τη λειτουργία τους καθώς και την χρήση της ενέργειας. [10] Ο ενεργειακός σχεδιασμός έχει σκοπό τη μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας, των αντίστοιχων ρύπων αλλά και του φορτίου αιχμής για θέρμανση, ψύξη και φωτισμό των κτηρίων, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα θερμική και οπτική άνεση μέσα στους χώρους. [11]
- Περιβαλλοντικά φιλικός, οικολογικός σχεδιασμός (environmentally-friendly, ecological design), που αναφέρεται στον σχεδιασμό σε «συμφωνία» με τη φύση και το περιβάλλον. [10]
- Βιώσιμος σχεδιασμός (sustainable design), που αναφέρεται στην αλληλεπίδραση της αρχιτεκτονικής δραστηριότητας με το φυσικό περιβάλλον, τον άνθρωπο και την ανάπτυξη, σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής των κτιρίων. [10]

Ξεχωριστές κατηγορίες αποτελούν:

- Τα παραδείγματα από την παραδοσιακή αρχιτεκτονική και
- Οι μελέτες περίπτωσης (case studies).

Επιπλέον κατηγορίες μπορούν να διακριθούν ανάλογα με την κλίμακα σχεδιασμού, δηλ. σε: Υλικά, Κτίριο, άμεσος περιβάλλων χώρος και Αστικός και Πολεοδομικός σχεδιασμός.

Τέλος, η διάκριση στις βασικές θεματικές ενότητες με βάση τον σχεδιασμό αναλύεται σε επιμέρους θέματα, όπως φαίνεται στον παρακάτω Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Επιμέρους ανάλυση των βασικών θεματικών κατηγοριών [πηγή: 10]

Βιοκλιματικός και παθητικός σχεδιασμός	Παθητική θέρμανση, Παθητικός δροσισμός, Ηλιοπροστασία, Φυσικός φωτισμός, Θερμική άνεση, Οπτική άνεση, Θερμομόνωση, Μικροκλίμα
Ενεργειακός σχεδιασμός	Ενεργητικά ηλιακά συστήματα, Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Α.Π.Ε.), Ενεργειακά αποδοτικά συστήματα, Σχεδιασμός και ενσωμάτωση κατασκευαστικών συστημάτων και υλικών υψηλών αποδόσεων, Κτίρια Σχεδόν Μηδενικής Κατανάλωσης (ΣΜΗΚ – ΝΖΕΒ)
Περιβαλλοντικά φιλικός, οικολογικός σχεδιασμός	Σχέση δομημένου και φυσικού περιβάλλοντος, Τόπος, Φυσικοί πόροι, Οικολογικά υλικά και Δομικά Συστήματα, Οικολογία, Υγιεινή και Συνθήκες εσωτερικού περιβάλλοντος, Ρύποι και Απόβλητα
Βιώσιμος σχεδιασμός	Κύκλος ζωής υλικών και κτιρίων, Χαμηλή περιβαλλοντική επίπτωση, Επανάχρηση, Ανακύκλωση

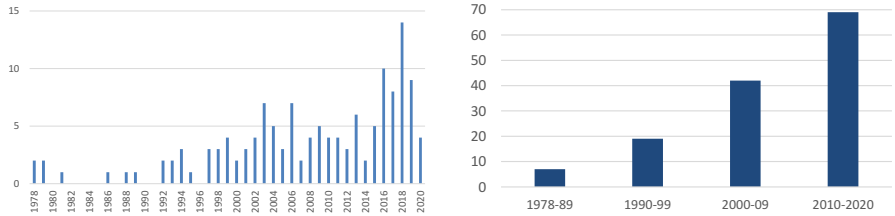
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα της έρευνας περιλαμβάνουν την ανάλυση του συγκεκριμένου δείγματος ως προς μια σειρά ποσοτικών και ποιοτικών παραμέτρων.

3.1. Ποσοτικές παράμετροι

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η περιγραφική στατιστική ανάλυση με τη γραφική παρουσίαση της κατανομής των εργασιών:

- χρονολογικά, ανά ακαδημαϊκό έτος και ανά δεκαετία
- σε ατομικές και ομαδικές εργασίες



α. Ανά ακαδημαϊκό έτος *β. Ανά δεκαετία*

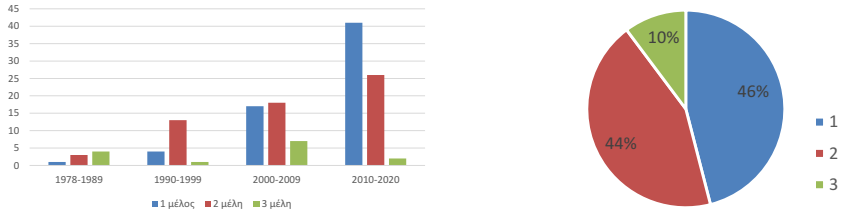
Εικόνα 1: Χρονολογική κατανομή δείγματος εργασιών.

Όπως φαίνεται, ο αριθμός των Διαλέξεων 9ου εξαμήνου που επιλέγουν να εκπονήσουν την εργασία τους σε συνεργασία με την Περιοχή της Οικοδομικής του Τομέα «Συνθέσεις Τεχνολογικής Αιχμής» παρουσιάζει σημαντική αύξηση κατά την τελευταία δεκαετία (Εικόνα 1), με τις εκπονούμενες εργασίες να αυξάνονται, ειδικά κατά τα 5 τελευταία χρόνια.

Η ολοένα και αυξανόμενη ευαισθητοποίηση των φοιτητών/τριών πάνω σε θέματα βιοκλιματικού και βιώσιμου σχεδιασμού οφείλεται κατά πάσα πιθανότητα στη γενικότερη εκπαίδευση και στη διάχυση των ζητημάτων περιβαλλοντικής ευαισθητοποίησης στο ευρύ κοινό και την κοινωνία, αλλά και στο γεγονός ότι τα τελευταία 12 χρόνια έχουν εισαχθεί στο πρόγραμμα σπουδών σχετικά υποχρεωτικά και κατ' επιλογήν μαθήματα.

Ως προς τη διάκριση σε ατομικές και ομαδικές εργασίας (Εικόνα 2), δεν φαίνεται να υπάρχει μεγάλη διαφορά στην προτίμηση των φοιτητών/τριών να εκπονήσουν την εργασία ατομικά ή σε ομάδες των 2 ατόμων. Κατά τις πρώτες δεκαετίες (1978-1999), οι εργασίες δουλεύονταν και παραδίδονταν από ομάδες των 2 και των 3 ατόμων. Τη δεκαετία του 2000-2009, υπήρχε σχεδόν ίσος αριθμός Διαλέξεων μονομελών και διμελών. Την τελευταία δεκαετία, ωστόσο, φαίνεται να υπάρχει σαφής προτίμηση στην εκπόνηση της εργασίας της Διάλεξης 9ου εξαμήνου ατομικά.

Παρατηρείται ίσως μια τάση μετάβασης προς πιο εξατομικευμένα μοντέλα μάθησης, με τις συνεργασίες, ακόμα και σε επίπεδο διμελών ομάδων, να μειώνονται.



α. Χρονολογική κατανομή *β. Ποσοστιαία κατανομή*

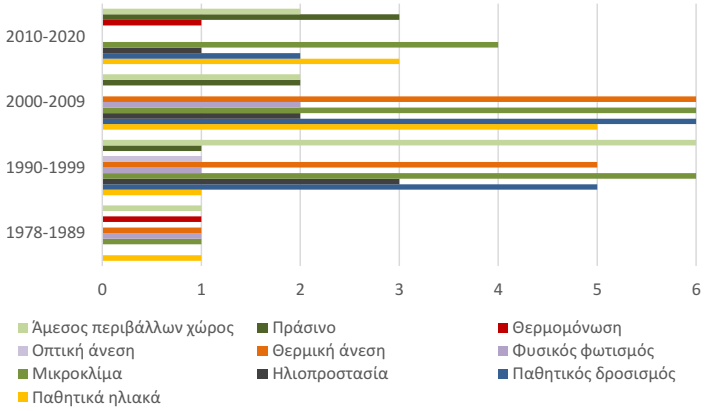
Εικόνα 2: Δείγμα εργασιών ανάλογα με τον αριθμό φοιτητών/φοιτητριών που συμμετείχαν στην εκπόνηση.

3.2. Ποιοτικές παράμετροι - Θεματολογία

Όπως προαναφέρθηκε (Ενότητα 2. Μεθοδολογία), οι εργασίες που έχουν εκπονηθεί μέχρι σήμερα ομαδοποιούνται σε μια σειρά από θεματικές κατηγορίες. Ωστόσο, σημειώνεται ότι εκ των πραγμάτων, οι περισσότερες εργασίες εμπίπτουν σε περισσότερες από μία κατηγορίες. Κατά συνέπεια, στα διαγράμματα που παρουσιάζονται οι αριθμοί δεν συμπίπτουν με τον απόλυτο αριθμό του δείγματος (137 εργασίες).

3.2.1. Παθητικός και βιοκλιματικός σχεδιασμός

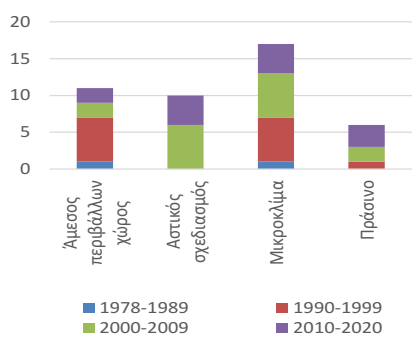
Σε αυτή τη θεματική κατηγορία εντάσσονται τα στοιχεία του βιοκλιματικού σχεδιασμού που σχετίζονται με το κτιριακό κέλυφος. Πρόκειται για στρατηγικές που αναφέρονται στη χειμερινή περίοδο (παθητικά ηλιακά συστήματα θέρμανσης), στη θερινή περίοδο (παθητικά συστήματα δροσισμού), στη θερμομόνωση και τον φυσικό φωτισμό στο σύνολο του έτους, αλλά και ζητήματα θερμικής και οπτικής άνεσης.



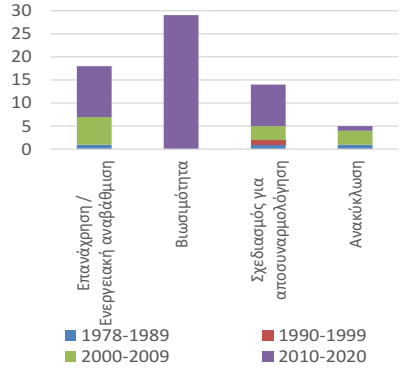
Εικόνα 3: Χρονολογική και ποιοτική κατανομή δείγματος εργασιών σε ζητήματα βιοκλιματικού και παθητικού σχεδιασμού.

3.2.2. Το περιβάλλον και η πόλη

Αυτή η θεματική κατηγορία περιλαμβάνει αφενός την εφαρμογή των αρχών περιβαλλοντικού και βιοκλιματικού σχεδιασμού στην πόλη και τις παραμέτρους που επηρεάζουν το αστικό μικροκλίμα και αφετέρου την ανάπτυξη βασικών κριτηρίων για την αξιολόγηση του αστικού περιβάλλοντος σε όλες τις κλίμακες σχεδιασμού, με στόχο την ενεργειακή αναβάθμιση. Έτσι, αντίστοιχα, υπάρχουν εργασίες στις οποίες αναλύονται οι συνθήκες που επικρατούν σε πλατείες ή σκιασμένες περιοχές μέσα στην πόλη, μικρές παρεμβάσεις, υλικά επιστρώσεων, φυτεύσεις κ.λπ. και εργασίες που αναφέρονται στην ενεργειακή αναβάθμιση του υφιστάμενου κτιριακού δυναμικού και στη μεγάλη σημασία του ρόλου του αρχιτέκτονα και της νομοθεσίας προς την κατεύθυνση αυτή. [8]



Εικόνα 4: Χρονολογική και ποιοτική κατανομή δείγματος εργασιών στο ευρύτερο θέμα του περιβάλλοντος και της πόλης.



Εικόνα 5: Χρονολογική και ποιοτική κατανομή δείγματος εργασιών στο ευρύτερο πεδίο του βιώσιμου σχεδιασμού.

3.2.3. Βιώσιμος σχεδιασμός

Σε αυτήν τη θεματική κατηγορία εντάσσονται ζητήματα που αφορούν στην ανάλυση του κύκλου ζωής κτιρίων και υλικών. Στο πλαίσιο αυτό, αναλύονται και οι στρατηγικές που σχετίζονται με τα 3R της βιώσιμης ανάπτυξης (Reduce-Reuse-Recycle).

Η ανάλυση του κύκλου ζωής αναφέρεται στην περιβαλλοντική επίδραση κάθε στοιχείου του κτιρίου καθώς και του ιδίου, κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του (εξαγωγή, παραγωγή, μεταφορά, κατασκευή, χρήση και κατεδάφιση), ως προς την κατανάλωση ενέργειας και πρώτων υλών και τα απόβλητα στο έδαφος, τα ύδατα και τον αέρα. Όλες αυτές οι παράμετροι οφείλουν να λαμβάνονται υπόψη από τα πρώτα στάδια του σχεδιασμού, κατά τη διάρκεια της κατασκευής και της χρήση του κτιρίου, έως και το τέλος της «χρήσιμης» ζωής του. Η αξιολόγηση του κύκλου ζωής υλικών και κτιρίων έχει αρχίσει να εφαρμόζεται διεθνώς τα τελευταία λίγα χρόνια, γεγονός που αιτιολογεί τον μικρό αριθμό σχετικών εργασιών. [8]

Σε ό,τι αφορά στα 3R, η μείωση (Reduce) αφορά στη μείωση της χρήσης πρώτων υλών, της κατανάλωσης ενέργειας και παραγωγής αποβλήτων. Η επανάχρηση (Reuse) αναφέρεται τόσο στο σύνολο του κτιρίου, όσο και στα υλικά και τα δομικά στοιχεία του, καθώς και στη δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν για την ίδια ή άλλη χρήση. Ένα κτίριο μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς μεταβολή της αρχικής του μορφής, με ελάχιστες επεμβάσεις. Τα υλικά πρέπει να μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν με ελάχιστη επεξεργασία, εάν η αποσυναρμολόγηση ληφθεί υπόψη από τα πρώτα στάδια του σχεδιασμού και της κατασκευής. Τέλος, η ανακύκλωση (Recycle) χρησιμοποιείται στην αρχιτεκτονική με ένα διπλό νόημα και αφορά είτε την αποσυναρμολόγηση ενός κτιρίου με στόχο την επανασυναρμολόγησή του σε κάποιο άλλο μέρος, είτε την επανάχρηση των υλικών και των στοιχείων του σε μια άλλη κατασκευή [8].

3.2.4. Περιβαλλοντικά φιλικός, οικολογικός σχεδιασμός

Ο περιβαλλοντικά φιλικός σχεδιασμός απαιτεί την ορθολογική χρήση των υλικών και τη μείωση των αποβλήτων σε όλα τα στάδια της παραγωγής και της κατασκευής τους. Η επιλογή των κατάλληλων υλικών μπορεί να είναι ένα ενδιαφέρον έργο, καθώς εξαρτάται από πολλές μεταβλητές και απαιτεί ένα ευρύ πλαίσιο γνώσεων και κριτηρίων επιλογής. Ανάμεσα στα ζητήματα που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη είναι και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα και η κατανάλωση πόρων κατά τα στάδια της παραγωγής, αλλά και της χρήσης των κτιρίων, οπότε και τίθενται και ζητήματα που σχετίζονται με τις συνθήκες θερμικής και οπτικής άνεσης, αλλά και της ποιότητας εσωτερικού αέρα και υγείας των εργαζομένων και των κατοίκων / χρηστών [8]. Οι Διαλέξεις 9^{ου} εξαμήνου που εντάσσονται σε αυτή τη θεματική κατηγορία ασχολούνται με πολλά από αυτά τα ερωτήματα, με τη διερεύνηση τόσο φυσικών, όσο και τεχνητών υλικών.

3.2.5. Παραδείγματα από την παραδοσιακή αρχιτεκτονική

Τα παραδοσιακά, προβιομηχανικά κτίρια θεωρούνται βιώσιμα εξ ορισμού, καθώς κατά τον χρόνο κατασκευής τους, οι κλιματικές παράμετροι λαμβάνονταν σοβαρά υπόψη στον σχεδιασμό και τον προσανατολισμό των κτιρίων [8]. Κτίστηκαν με φυσικά ή/και τοπικά υλικά και στις περισσότερες περιπτώσεις κάλυπταν διαχρονικές ανάγκες. Οι προβιομηχανικές κοινωνίες ισορροπούσαν ανάμεσα στον πολιτισμό, τα διαθέσιμα υλικά και το κλίμα. Πρακτικές όπως η οικονομία, η ανακύκλωση δομικών υλικών και αγαθών και η σχεδόν μηδενική παραγωγή υλικών αποβλήτων ήταν δεδομένες. Είναι, πλέον, τεκμηριωμένο ότι αυτές οι κατασκευές παρέχουν πολύτιμα, ευανάγνωστα μαθήματα για τον βιώσιμο και βιοκλιματικό σχεδιασμό. Για τον λόγο αυτό, η ανάγνωση και η ανάλυση τους μπορεί να παρέχει στους αρχιτέκτονες σημαντικά στοιχεία γύρω από τη δόμηση σε συμφωνία με το κλίμα και τον τόπο, την ορθολογική χρήση υλικών και χώρου, τον σεβασμό απέναντι στο περιβάλλον και τους ανθρώπους, και τέλος τη χρήση των φυσικών και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η μελέτη της παραδοσιακής αρχιτεκτονικής καλλιεργεί στους μελλοντικούς αρχιτέκτονες τα απαραίτητα κριτήρια προκειμένου να αποτιμήσουν και να αναδιατυπώσουν τις αρχιτεκτονικές, δομικές και οικολογικές ποιότητες προκειμένου να εφαρμόσουν εύστοχες παρεμβάσεις ένταξης ή αποκατάστασης σε φυσικά και δομημένα περιβάλλοντα που εμπίπτουν σε διατάξεις προστασίας.

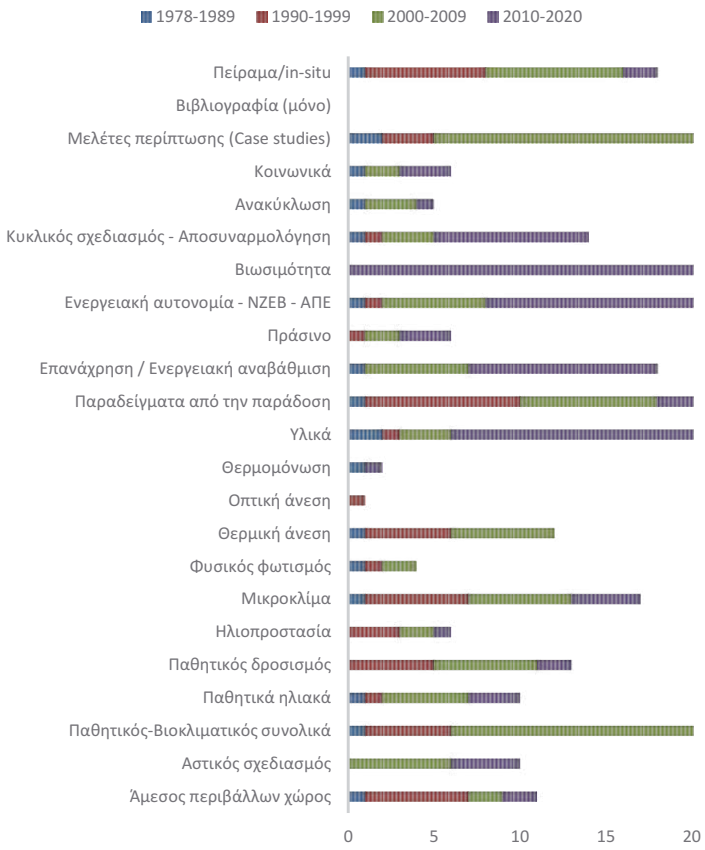
Τα ιστορικά και παραδοσιακά κτίρια αντικατοπτρίζουν την πολιτιστική κληρονομιά και ταυτότητα κάθε χώρας. Η διατήρησή τους αποτελεί πολιτισμικό αφήγημα με υλικά και άυλα χαρακτηριστικά για κάθε κοινωνία, καθώς εμπεριέχουν σημαντικές κοινωνικές, πολιτιστικές, αρχιτεκτονικές αλλά και περιβαλλοντικές ποιότητες. Τέλος, η διατήρηση τους συμβάλλει στην ικανοποίηση μιας βασικής αρχής της βιωσιμότητας, ιδιαίτερα στην περίπτωση περιοχών υπό καθεστώς προστασίας, που είναι η διατήρηση και επανάχρηση κτιρίων ελαχιστοποιώντας έτσι την ανάγκη για νέες κατασκευές, διατηρώντας με τον τρόπο αυτό την ενσωματωμένη ενέργεια των κτιρίων και των υλικών τους.

Καθώς η αποκατάσταση και αναβάθμιση υφιστάμενων παραδοσιακών και ιστορικών κτιρίων θεωρείται εξαιρετικά σημαντική για την αρχιτεκτονική εκπαίδευση και πρακτική, οι Διαλέξεις του 9ου εξαμήνου που εντάσσονται σε αυτήν τη θεματική κατηγορία θεωρούνται ιδιαίτερα χρήσιμες και σημαντικές. Σημαντικό είναι και το γεγονός ότι οι περισσότερες από αυτές τις εργασίες συνδύαζαν και επιπόπια (in-situ) πειραματική έρευνα, που περιλάμβανε πολλές φορές αποτυπώσεις και μετρήσεις περιβαλλοντικών παραμέτρων (τιμών θερμοκρασίας ή/και σχετικής υγρασίας, έντασης φωτισμού, κλπ.).

Εικόνα 6: Περιοχές της Ελλάδας όπου έχουν εκπονηθεί Διαλέξεις 9ου εξαμήνου που τεκμηριώνουν στοιχεία της βιοκλιματικής συμπεριφοράς παραδοσιακών κτιρίων. [πηγή χάρτη υποβάθρου: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Greece-satellite-map.jpg]

3.2.6. Μελέτες περίπτωσης (Case studies)

Η εξέταση και αποτίμηση των βιοκλιματικών στοιχείων σε κτίρια ή στο έργο γνωστών αρχιτεκτόνων αποτελεί ακόμα μία κατηγορία θεμάτων η διερεύνηση των οποίων μπορεί να προσφέρει πολύτιμες πληροφορίες. Σε αυτή την κατηγορία θεμάτων, οι σπουδαστές/τριες αξιολογούν τα βιοκλιματικά στοιχεία και τις παραμέτρους βιωσιμότητας. Η ποιότητα της μορφής και τη λειτουργίας των υπό διερεύνηση κτιρίων εκτιμάται ιδιαίτερα. Εξίσου χρήσιμη είναι και η αξιολόγηση του συνόλου του έργου γνωστών αρχιτεκτόνων σε σχέση με την αξιολόγηση και αξιοποίηση των κλιματικών και περιβαλλοντικών παραμέτρων στον σχεδιασμό. Έτσι, έχουν επιλεγεί γνωστοί Έλληνες (Αλέξανδρος Ν. Τομπάζης, 2007, Μιχάλης Σουβατζίσης, 2007) και ξένοι αρχιτέκτονες (Le Corbusier, 1998, Frank Lloyd Wright, 1998, Νεοπτόλεμος Μιχαηλίδης, 2003) [8].



Εικόνα 7: Χρονολογική κατανομή δείγματος εργασιών ανάλογα με τη θεματολογία.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ελεύθερη επιλογή θέματος της Διάλεξης 9ου εξαμήνου σημαίνει πρακτικά ότι τα παιδιά που επιλέγουν να ασχοληθούν με την παραπάνω θεματολογία, είναι ευαισθητοποιημένα ως προς αυτά τα ζητήματα και θέλουν να εμβαθύνουν σε αυτά, είτε μεμονωμένα, είτε ως προετοιμασία για τη Διπλωματική τους εργασία.

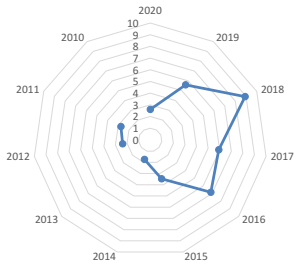
Ως προς τον αριθμό των εκπονούμενων εργασιών, παρατηρείται όπως αναφέρθηκε αύξηση αλλά και διεύρυνση της θεματολογίας γύρω από τα ευρύτερα ζητήματα του βιώσιμου και βιοκλιματικού σχεδιασμού που συμβαδίζει με την συνεχή όξυνση των περιβαλλοντικών προβλημάτων, των φυσικών καταστροφών και της υποβάθμισης των συνθηκών διαβίωσης και του φυσικού περιβάλλοντος. Ακόμα η διαρκής εξέλιξη και δυναμική γύρω από τα περιβαλλοντικά προβλήματα και την ανάγκη να επιτευχθεί ισορροπία ανάμεσα στην ανθρώπινη δραστηριότητα, την ανάπτυξη της τεχνολογίας και των επιστημών και του περιορισμού των περιβαλλοντικών προβλημάτων συμβάλλει στον ολοένα και αυξανόμενο προβληματισμό και στην ευαισθητοποίηση των σπουδαστών/τριών σχετικά με την αλληλεπίδραση του δομημένου χώρου με το περιβάλλον. Και μάλιστα μιας αλληλεπίδρασης πολυστρωματικής που αφορά όχι μόνο στον σχεδιασμό και την διαδικασία παραγωγής αρχιτεκτονικού έργου αλλά και στην λειτουργία και στην βιώσιμη διαχείρισή του. Αξίζει να παρατηρηθεί ότι στην πρώτη δεκαετία (1970-1980) εκπόνησης σχετικών εργασιών που τα κυρίαρχα θέματα ήταν η

ενεργειακή κρίση και η προσπάθεια ανεύρεσης εναλλακτικών μορφών ενέργειας, η θεματολογία σχετιζόταν κυρίως με θέματα ηλιακής αρχιτεκτονικής και αυτόνομων κτιρίων. Στην συνέχεια ακολούθησε ο βιοκλιματικός σχεδιασμός και οι σχετικές με αυτόν παράμετροι και κυρίως στην αρχιτεκτονική του παρελθόντος, ενώ τα τελευταία χρόνια τα ζητήματα σχετίονται περισσότερο με την βιωσιμότητα, τον κύκλο ζωής και τα κτίρια σχεδόν μηδενικής ενέργειας (NZEB).

Ενδιαφέρον παρουσιάζει ο συσχετισμός του αριθμού, αλλά και των θεμάτων των Διαλέξεων 9ου εξαμήνου με τη διδακτική πραγματικότητα της Σχολής στην πάροδο αυτών των 40 χρόνων. Αναφέρεται, λοιπόν, ότι το υποχρεωτικό μάθημα της Οικοδομικής 3 του 5ου εξαμήνου άρχισε να διδάσκεται από τον Σεπτέμβριο 2008. Από το 1989 μέχρι το 2008, τα ζητήματα αυτά αναφέρονταν μόνο στο κατ΄ επιλογήν μάθημα Θέματα Προωθημένης Οικοδομικής (8ου εξαμήνου), στο οποίο εντάσσονταν ο Βιοκλιματικός Σχεδιασμός - Περιβαλλοντικές Ήπιες Οικοδομικές Τεχνικές. Με βάση τις χρονολογίες αυτές, φαίνεται ότι μέχρι το 1989, οι Διαλέξεις 9ου εξαμήνου που εντάσσονται στην εξεταζόμενη θεματολογία παρουσίαζαν ένα νέο, "εξωτικό" θέμα για τους/τις φοιτητές/φοιτήτριες, το οποίο από το 1989 έως το 2008 γινόταν όλο και πιο γνωστό, χωρίς όμως, να αποτελεί μέχρι τότε υποχρεωτικό διδακτέο μάθημα.

Σχετικά την ενασχόληση με την παραδοσιακή αρχιτεκτονική, βασικό ερέθισμα αποτελεί πιθανότατα και το υποχρεωτικό μάθημα κορμού 5Α-Αρχιτεκτονική ανάλυση κτιρίων και συνόλων που διδάσκεται στη Σχολή από την δεκαετία 1970, στα πλαίσια του οποίου οι σπουδαστές και οι σπουδάστριες της Σχολής Αρχιτεκτόνων του Ε.Μ.Π. έχουν τη δυνατότητα να μελετήσουν την Ελληνική παραδοσιακή αρχιτεκτονική με επιτόπου εργασία σε παραδοσιακό οικισμό διάρκειας μίας περίπου εβδομάδας, γεγονός που τους δίνει την δυνατότητα να βιώσουν και να αξιολογήσουν τις δομικές, αρχιτεκτονικές και περιβαλλοντικές ποιότητες και τα ουσιώδη χαρακτηριστικά τους. Έτσι, φτάνοντας στο 9ο εξάμηνο και το μάθημα της Διάλεξης, έχουν αναπτύξει μια καλή γνώση και κατανόηση των παραδοσιακών δομικών συστημάτων. Ως προς την κατανομή στον χρόνο, φαίνεται ότι παλαιότερα τα ζητήματα διερεύνησης βιοκλιματικών παραμέτρων στην παραδοσιακή αρχιτεκτονική ήταν πιο «δημοφιλή».

Τέλος, πέρα των ανωτέρω, θεωρήθηκε απαραίτητη μια επιπλέον επεξεργασία, σχετική με τον αριθμό των υπό διερεύνηση Διαλέξεων 9ου εξαμήνου του Τομέα IV σε σχέση με τον συνολικό αριθμό σε επίπεδο Σχολής. Καθώς δεν υπήρχαν διαθέσιμα ψηφιακά δεδομένα πέραν της τελευταίας δεκαετίας, η επεξεργασία αυτή πραγματοποιήθηκε για τα έτη 2012-2020. Όπως σημειώθηκε και πιο πάνω, στην ίδια θεματολογία έχουν εκπονηθεί και εκπονούνται Διαλέξεις, τόσο υπό την επίβλεψη άλλων διδασκόντων του Τομέα, όσο και της Σχολής, που όμως δεν προσμετρήθηκαν, ελλείψει πλήρους καταγραφής. Αυτό που φαίνεται είναι ότι το ποσοστό του υπό εξέταση δείγματος επί του συνόλου είναι εξαιρετικά χαμηλό και κυμαίνεται αρκετά κάτω από το 5%, με εξαίρεση τα έτη 2016-2019, οπότε και παρουσίασε αύξηση, η οποία έφτασε το 2018 το 8,9%. Φαίνεται, λοιπόν, ότι τα ζητήματα αυτά παραμένουν «περιφερειακά στην ακαδημαϊκή συζήτηση» [12].



Εικόνα 8: Ποσοστό (%) των Διαλέξεων 9ου του υπό εξέταση Αρχείου, σε σχέση με τις συνολικές που παρουσιάστηκαν στη Σχολή (2010-2020).

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τους σπουδαστές και τις σπουδάστριές που συνεργαστήκαμε στις Διαλέξεις του 9ου εξαμήνου όλα αυτά τα χρόνια, που μαζί τους διαβάσαμε, μάθαμε και αποκτήσαμε νέα γνώση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] UIA, 2011, UIA and architectural education reflections and recommendations, General Assembly, Berlin, Germany. [Arial 11στ, Διάστημα πριν: 0, Διάστημα μετά: 6, Στυλ:IHT-References]

[2] Altomonte, S., ed., 2012, Sustainable architectural education. White Paper, EDUCATE Press. United Kingdom, University of Nottingham.

[3] Keumala, N., et al., 2019, "Pedagogy of architectural education on Sustainability in Malaysia – Student Perspective", Open House International 41, 4, pp. 104-108.

[4] Khan, A.Z., Vandevyvere H. and Allacker, K., 2013, "Design for the Ecological Age: Rethinking the Role of Sustainability in Architectural Education", JAE, 67(2), pp. 175-185.

[5] Wright, J., 2003, "Introducing sustainability into the architecture curriculum in the United States", IJSHE, 4(2), pp. 100-105.

[6] Πρόγραμμα Προπτυχιακών Σπουδών, Σχολή Αρχιτεκτόνων Ε.Μ.Π.

[7] ΕΜ.Π., Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, Προπτυχιακές Σπουδές, 9ο εξάμηνο, Διάλεξη, [Online] Available, http://www.arch.ntua.gr/course_instance/13638

[8] Alexandrou E. and Zacharopoulos E., 2013, "Environmental design as a research topic in architectural education", Int. Conf. Architectural Education and the Reality of the ideal: Environmental design for innovation in the post-crisis world, M. Voyatzaki, Ed., pp. 119-132.

[9] Ανδρεαδάκη-Χρονάκη, Ε., 2017, *Βιοκλιματικός Σχεδιασμός. Κλιματική αλλαγή, Περιβάλλον, Βιωσιμότητα*, Θεσσαλονίκη: University Studio Press.

[10] Αλεξάνδρου, Ε., χ.ε., «Εισαγωγή στον Βιώσιμο Περιβαλλοντικό Σχεδιασμό, Διάλεξη στο μάθημα 5ου εξαμήνου: Οικοδομική 3- Ανάλυση και σχεδιασμός κτιριακής δομής με έμφαση στις αρχές βιωσιμότητας και τη βιοκλιματική αρχιτεκτονική, Αθήνα: Σχολή Αρχιτεκτόνων Ε.Μ.Π.

[11] Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέρνειας (Κ.Α.Π.Ε.), Ενεργειακός σχεδιασμός κτηρίων και οικιστικών συνόλων, [Online] Available, http://www.cres.gr/services/istos.chtm?prnbr=25338&locale=el

[12] Stasinopoulos Th. N., 2005. Sustainable architecture teaching in non-sustainable societies, in: Proc. Int .Conf. PLEA 2005, Notre Dame University Publishing, Lebanon.

[13] Alexandrou, E., 2011, "Environmental issues and Sustainability in the Architectural Technology Teaching Process", EAAE Transactions on Architectural Education no 53 Teaching a new Environmental Culture. The Environment as a Question of Architectural Education, Voyatzaki, M. (Eds.), pp.47-58, [Online] Available, http://www.enhsa.net/Publications/EV2010.pdf

[14] Alexandrou, E. and †Tsouras, V., 2009, "Implementation of Environmental Issues and Sustainability in the Design Process", EAAE no 45 Architectural Design and Construction Education - Experimentation towards Integration, Spiridonidis, C. and Voyatzaki, M. (Eds.), Genoa, pp.331-342, [Online] Available, http://www.eaae.be/wp-content/uploads/2017/04/45_architectural-design-and-construction-education.pdf.

ΕΞΕΛΙΞΗ ΑΠΑΙΤΗΣΕΩΝ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΝΕΣΗΣ ΣΤΟΝ ΚΤΙΡΙΑΚΟ ΤΟΜΕΑ

Παναγιώτα Αντωνιάδου[1*], Γεώργιος Χαντζής[1], Μαρία Συμεωνίδου[1], Ευφροσύνη Γιαμά[1], Συμεών Οξυζίδης[1],Διονυσία Κολοκοτσά[2], Άγις Μ. Παπαδόπουλος[1]

[1*] Εργαστήριο Κατασκευής Συσκευών Διεργασιών, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη,
[2] Εργαστήριο Δομημένου Περιβάλλοντος και Διαχείρισης Ενέργειας, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά
e-mail:pantoniadou@auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ανάγκη διατήρησης και συνεχούς βελτίωσης των εσωκλιματικών συνθηκών σε ένα κτίριο είναι αδήριτη. Συγκεκριμένα, οι άνθρωποι περνούν το 60-90% της καθημερινότητάς τους στο εσωτερικό κτιρίων και είναι ευνόητο να προσδοκούν οι συνθήκες που επικρατούν σε αυτό να είναι οι ιδανικές για αυτούς και τις ανάγκες τους.

Παρόλα αυτά η ανάγκη αυτή πρέπει να συνάδει με την επιδίωξη μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας και τη βελτίωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των κατασκευών, καθώς και οι δύο αυτοί στόχοι αποτελούν, ή οφείλουν να αποτελούν, πυλώνες των στρατηγικών ανάπτυξης του κατασκευαστικού τομέα. Παράλληλα, η υλοποίηση αυτών των επιδιώξεων πρέπει να γίνεται διατηρώντας τόσο το αρχικό κόστος επένδυσης όσο και τις λειτουργικές δαπάνες σε ένα επίπεδο που να μην τις καθιστά απαγορευτικές για τους χρήστες των κτιρίων. Τις τελευταίες δεκαετίες έχει θεσπιστεί ένα πλήθος νομοθετημάτων, κανονισμών και κανονιστικών πλαισίων με στόχο τη μείωση των επιπέδων κατανάλωσης ενέργειας και της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης δίνοντας έμφαση στον κατασκευαστικό τομέα. Αναλυτικότερα, ιδιαίτερο ενδιαφέρον δίνεται στις εσωκλιματικές συνθήκες και συγκεκριμένα στη θερμική άνεση των χρηστών, σημειώνοντας τους δείκτες και τις παραμέτρους που λαμβάνουν υπόψιν τα διάφορα μοντέλα προσδιορισμού της αντιληπτής άνεσής τους.

Στο πλαίσιο αυτό, αντικείμενο της έρευνας αποτελεί η καταγραφή του ευρωπαϊκού κανονιστικού πλαισίου αλλά και των επιστημονικών μοντέλων που ακολουθούνται για τον προσδιορισμό των απαιτήσεων και του τρόπου προσδιορισμού της θερμικής άνεσης, με στόχο την αξιολόγηση αφενός των δεικτών και παραμέτρων που λαμβάνονται υπόψιν στα επιστημονικά μοντέλα και αφετέρου της μεθοδολογικής προσέγγισης και των πιθανών κενών που πρέπει να καλυφθούν και αξιολογηθούν σε επόμενο στάδιο.

Λέξεις Κλειδιά: εσωκλιματικές συνθήκες, θερμική άνεση, νομοθετικό πλαίσιο, κτιριακός τομέας

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διατήρηση συνθηκών άνεσης και ευεξίας των ατόμων εντός του δομημένου περιβάλλοντος, είτε αυτή εστιάζεται στους χώρους εργασίας είτε στα κτίρια κατοικιών, είναι ιδιαίτερα σημαντική. Στις μέρες μας αυτό γίνεται ακόμα πιο επιτακτικό καθώς η υγειονομική κρίση του COVID-19 επιβάλει τον αυτοπεριορισμό μας στο εσωτερικό των κτιρίων. Ιδιαίτερη, μνεία στη σημασία του δομημένου περιβάλλοντος επιχειρείται εδώ και δεκαετίες, μέσω πολυάριθμων κειμένων και πολιτικών, με σημεία αναφοράς να αποτελούν το πρωτόκολλο του Κιότο [1] και η Ατζέντα 21 [2] και όπου αποτυπώνεται και επίσημα η σημασία του περιβάλλοντος και η ανάγκη προς τη βιώσιμη ανάπτυξη.

Συγκεκριμένα, η Ατζέντα 21 εστιάζει στην υλοποίηση ενός προγράμματος που έχει ως στόχο την επίτευξη ενός «ανεκτού» μέλλοντος για τους ανθρώπους διασφαλίζοντας ότι ο κόσμος θα αλλάξει σε έναν πιο δίκαιο, ασφαλή και πλούσιο βιότοπο για όλη την ανθρωπότητα. Στο πλαίσιο αυτό, θεσπίστηκαν διάφορα έτη στόχοι, όπως το 2030 και το 2050, με την αειφορία να αποτελεί στόχο για 17 κύριους άξονες, όπου ο ενδέκατος εστιάζει στην αειφορία των πόλεων και των κοινωνιών [3].

Από το σύνολο των θεματικών ενοτήτων που συνδέονται με αυτόν τον τομέα, το δομημένο περιβάλλον και κυρίως η ευεξία και άνεση των χρηστών εντός αυτού αποτελεί μια σημαντική παράμετρο. Η σημασία αυτή καταδεικνύεται εντονότερα από το γεγονός, πως το 2008 για πρώτη φορά ο παγκόσμιος αστικός πληθυσμός ξεπέρασε αυτόν της υπαίθρου, σηματοδοτώντας τη νέα εποχή της «αστικής χιλιετίας» με τις εκτιμήσεις να καταγράφουν πως έως το 2050 αναμένεται τα 2/3 του πληθυσμού να ζουν σε αστικές περιοχές [4]. Τα στοιχεία αυτά αποτελούν προβλέψεις για ακόμα πιο πυκνοκατοικημένα αστικά κέντρα και πιο αυξημένες ανάγκες και απαιτήσεις των χρηστών κατά την παραμονή τους εντός του δομημένου περιβάλλοντος.

Στο πλαίσιο αυτό, διαπιστώνεται η ανάγκη δημιουργίας συνθηκών εντός του δομημένου περιβάλλοντος που διασφαλίζουν την υψηλή ποιότητα άνεσης και ευεξίας των χρηστών. Συγκεκριμένα, πλήθος προσεγγίσεων έχουν θεσπιστεί έχοντας ως τελικό στόχο τη βέλτιστη αξιολόγηση των υφιστάμενων εσωκλιματικών συνθηκών μέσα από τον προσδιορισμό παραμέτρων που χαρακτηρίζονται ως δείκτες αξιολόγησης.

Στόχος της διεξαχθείσας έρευνας αποτελεί η καταγραφή της εξέλιξης του κανονιστικού πλαισίου και των επιστημονικών μοντέλων που ακολουθούνται για τον προσδιορισμό των επιπέδων άνεσης αλλά και την αξιολόγησή τους μέσω των δεικτών που εφαρμόζονται.

2. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΑΝΕΣΗΣ

Για τον προσδιορισμό και την αξιολόγηση των συνθηκών εσωτερικού περιβάλλοντος, κύριες μεθοδολογικές προσεγγίσεις αποτελούν η διεξαγωγή έρευνας πεδίου με την άμεση καταγραφή των υφιστάμενων συνθηκών, η έρευνα ερωτηματολογίου στους χρήστες και ο συνδυασμός αυτών.

Αναλυτικότερα, οι Bravo και González μελέτησαν στη Βενεζουέλα, τα επίπεδα θερμικής άνεσης όπως τα αντιλήφθηκε πλήθος εθελοντών μετά από παραμονή τους σε ειδικά διαμορφωμένους χώρους είτε φυσικώς αεριζόμενους είτε με συστήματα παθητικού δροσισμού. Κύριες παράμετροι προσδιορισμού στην έρευνα ήταν η θερμοκρασία αέρα, η σχετική υγρασία, η θερμοκρασία μαύρης σφαίρας και η ροή αέρα στον χώρο [5]. Παρόμοια προσέγγιση ακολουθήθηκε και από τους Gao et al. [6] οι οποίοι αξιολόγησαν τις ίδιες παραμέτρους διενεργώντας την έρευνά τους σε χώρους γραφείων του πανεπιστημίου.

Οι Asdrubali et al. [7] για τον προσδιορισμό των εσωκλιματικών συνθηκών, εκτός από τη θερμοκρασία αέρα και τη σχετική υγρασία, έλαβαν υπόψη τους επιπλέον παραμέτρους όπως τη ροή αέρα στον χώρο, τη φωτεινότητα αλλά και τους δείκτες άνεσης κατά Fanger, PMV και PPD. Αντίστοιχη προσέγγιση ακολούθησαν και οι Akimoto et al. [8] με τις παραμέτρους που προσδιορίστηκαν να είναι τα επίπεδα θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας, η ροή αέρα και η δραστηριότητα που επιτελούνταν από τους χρήστες.

Παράλληλα, οι Wagner et al. [9] κατά την έρευνά τους για την αξιολόγηση της άνεσης και τη συσχέτισή της με τα επίπεδα αντίληψής της από τους χρήστες διεξήγαγαν μετρήσεις πεδίου προσδιορίζοντας τα επίπεδα θερμοκρασίας του χώρου και τις τιμές των δεικτών άνεσης PMV και PPD με τελικό στόχο την αναζήτηση πιθανών συσχετίσεων. Αντίστοιχη ανάλυση με διεξαγωγή μετρήσεων για τον προσδιορισμό και την αξιολόγηση των εσωκλιματικών συνθηκών μέσω παραμέτρων όπως η

θερμοκρασία, σχετική υγρασία, θερμοκρασία μαύρης σφαίρας, ροή αέρα και συγκέντρωση επιπέδων διοξειδίου του άνθρακα πραγματοποιήθηκε από τους Vesely et al. [10]. Τέλος, η Αντωνιάδου [11] στο πλαίσιο ολοκληρωμένης αξιολόγησης συνθηκών άνεσης σε περιπτώσεις κτιρίων γραφείου έλαβε υπόψη παραμέτρους όπως η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία, η θερμοκρασία μαύρης σφαίρας, η ροή αέρα, η συγκέντρωση επιπέδων διοξειδίου του άνθρακα, τα επίπεδα φωτεινότητας και τις τιμές των δεικτών άνεσης PMV και PPD. Το σύνολο των παραμέτρων που προσδιορίζονται από τις εργασίες αυτές παρουσιάζονται στον Πίνακα 1 και ακολουθούν παρόμοια κατανομή με αυτή που προέκυψε από την ανάλυση των Antoniadou & Papadopoulos σύμφωνα με τη βάση δεδομένων του Scopus για την τελευταία δεκαετία [12].

Πίνακας 1:Παράμετροι προσδιορισμού κατά τη διενέργεια επιτόπιων μετρήσεων για την αξιολόγηση συνθηκών εσωτερικού περιβάλλοντος.

Συγγραφείς	Παράμετροι μέτρησης							
	Θερμοκρασία αέρα	Σχετική Υγρασία	Θερμοκρασία Μαύρης Σφαίρας	Ροή Αέρα	Συγκέντρωση Διοξειδίου του Άνθρακα (CO_2)	Φωτεινότητα	Δραστηριότητα	Δείκτες Θερμικής Άνεσης PMV/PPD
Bravo και González [5]	x	x	x	x				
Gao et al. [6]	x	x	x	x				
Asdrubali et al. [7]	x	x		x		x		x
Akimoto et al. [8]	x	x	x	x			x	
Wagner et al. [9]	x							x
Vesely et al. [10]	x	x	x	x	x			
Αντωνιάδου [11]	x	x	x	x	x	x		x

3. ΕΞΕΛΙΞΗ ΘΕΣΜΙΚΩΝ ΑΠΑΙΤΗΣΕΩΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΑΝΕΣΗΣ

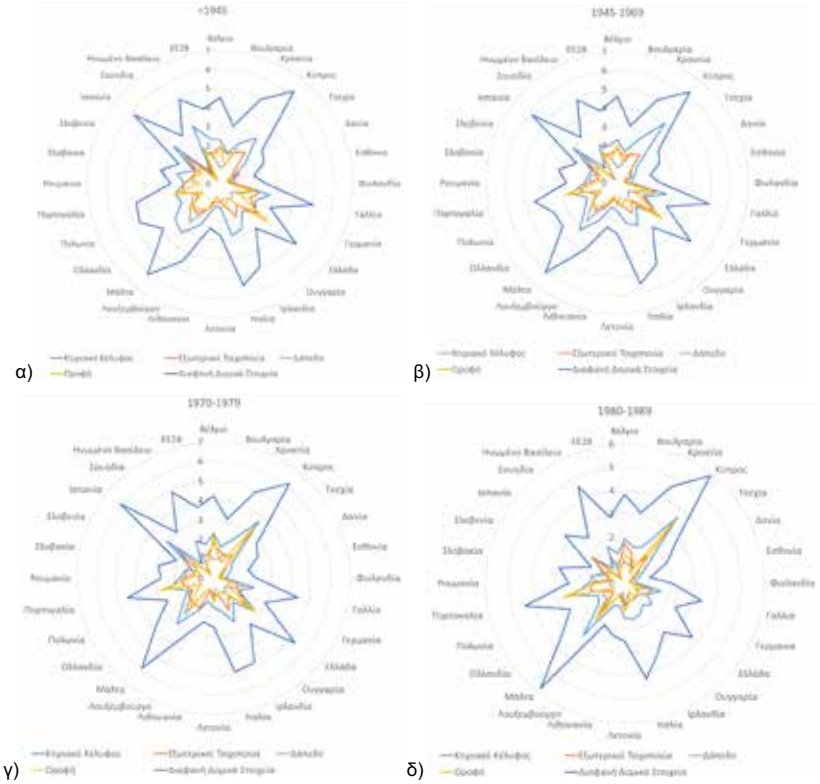
Η πρώτη απόπειρα για την επιστημονική έκφραση της σημασίας της ευεξίας και άνεσης των χρηστών έγινε το 1911 με το μοντέλο του Lefevre [13]. Οι πρώτες, όμως, αναφορές της στο νομοθετικό πλαίσιο ξεκίνησαν πολύ αργότερα και συγκεκριμένα μετά την πετρελαϊκή κρίση της δεκαετίας του 1970 [14]. Την περίοδο αυτή στόχος αποτέλεσε η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας για την κάλυψη των ιδίων αναγκών άνεσης και ευεξίας των χρηστών στο εσωτερικό περιβάλλον του κτιρίου. Για την επίτευξη των στόχων αυτών, ξεκίνησαν να θεσπίζονται πλήθος νομοθετημάτων, εστιάζοντας αρχικά στην αναβάθμιση του κτιριακού κελύφους και στη συνέχεια στην εγκατάσταση ηλεκτρομηχανολογικών συστημάτων με βελτιωμένα χαρακτηριστικά απόδοσης.

3.1. Κτιριακό κέλυφος

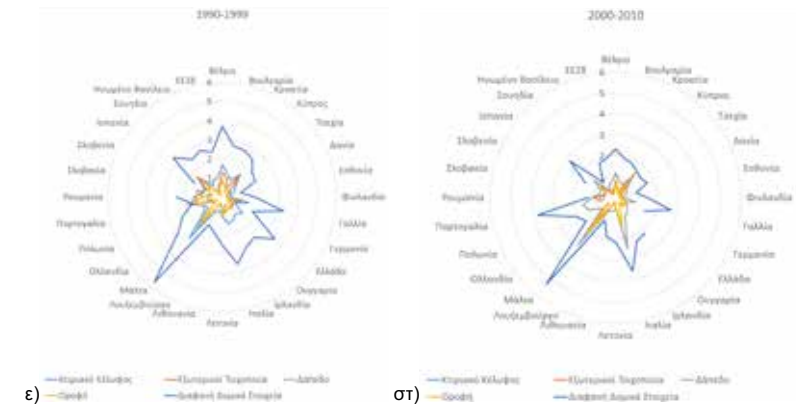
Σε ότι αφορά το κτιριακό κέλυφος, πυλώνα ενδιαφέροντος αποτέλεσε η μείωση των θερμικών απωλειών που προέρχεται τόσο από τα αδιαφανή όσο και από τα διαφανή δομικά στοιχεία της κατασκευής, καθώς επίσης και από την κατασκευαστική προσέγγιση στο στάδιο σχεδιασμού ενός κτιρίου. Οι κυριότεροι σταθμοί σε νομοθετικό επίπεδο που συνέβαλαν προς την κατεύθυνση αυτή είναι οι Ευρωπαϊκές Οδηγίες 2002/91 [15], 2010/31 [16] και 2018/844 [17], οι οποίες εστίασαν στην προοδευτική αυστηροποίηση του θεσμικού νομοθετικού πλαισίου σε επίπεδο ενεργειακής απόδοσης των κατασκευών έχοντας ως τελικό στόχο την εισαγωγή και θέσπιση των αρχών δημιουργίας κτιρίων χαμηλών ενεργειακών απαιτήσεων με επίκεντρο τον χρήστη και τις ανάγκες του.

Οι ανωτέρω Ευρωπαϊκές Οδηγίες ενσωματώθηκαν και στο εθνικό νομοθετικό πλαίσιο μέσω των νόμων 3661/2008 [18] και 4122/2013 [19,20], αντίστοιχα, με την τελευταία ευρωπαϊκή οδηγία να μην έχει εναρμονιστεί ακόμα[18–20]. Παρόλα αυτά, σε εθνικό επίπεδο είχαν γίνει ήδη προσπάθειες αυστηροποίησης των κανονισμών προς τη θερμική ενίσχυση του κτιριακού κελύφους μέσα από τον πρώτο Κανονισμό Θερμομόνωσης Κτιρίων (Π.Δ. 1.6/4.7/1979) και τον Κανονισμό Ορθολογικής Χρήσης και Εξοικονόμησης Ενέργειας (Κ.Υ.Α. 21475/1998) [21,22]. Από το σύνολο αυτών των νομοθετικών προσπαθειών, επιτεύχθηκε σταδιακή μείωση των δεκτών που συνδέονται με τη θερμική επάρκεια του κτιριακού κελύφους, όπως ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας (U-value).

Ιδιαίτερα, σε ό,τι αφορά τους δείκτες θερμικής αγωγιμότητας ενός δομικού στοιχείου, τόσο σε εθνικό όσο και ευρωπαϊκό επίπεδο παρατηρείται μια μεταβολή των τιμών οδηγώντας σε ολοένα και πιο αυστηρά επίπεδα λαμβάνοντας υπόψη σε πολλές χώρες το έτος κατασκευής του κτιρίου που αξιολογείται. Συγκεντρωτικά, στα γραφήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται γραφικά τα επίπεδα τιμών του δείκτη U για διάφορα έτη κατασκευής κτιρίων, ανά δομικό στοιχείο για το σύνολο των χωρών μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ). Όπως προκύπτει από τη σύγκριση μεταξύ των τιμών του συντελεστή (Εικόνα 1), ανά περίοδο κατασκευής, για το σύνολο των επιμέρους στοιχείων που περιγράφονται καταγράφονται μικρότερες τιμές του συντελεστή στις νεότερες κατασκευές και στην περίπτωση των διαφανών δομικών στοιχείων τιμές μεγαλύτερες από αυτές των αδιαφανών. Αναλυτικότερα, στις κτιριακές δομές με έτος κατασκευής μέχρι το 1979 παρατηρούνται στις περισσότερες χώρες υψηλές τιμές του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας αγγίζοντας και τα 3W/m^{2}K. Ωστόσο, στα κτίρια με μεταγενέστερο έτος κατασκευής σημειώνεται μια σταδιακή μείωση των τιμών του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας οδηγώντας σε τιμές μικρότερες του 1W/m^{2}K για την πλειοψηφία των χωρών στις νεότερες κατασκευές (έτος κατασκευής 2000-2010).



α) β) γ) δ)



ε) στ)

Εικόνα 1: Τιμές συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας ανά έτος κατασκευής κτιρίου για το σύνολο των χωρών της ΕΕ [23].

3.2. Συστήματα θέρμανσης, αερισμού & κλιματισμού

Το υψηλό κόστος των καύσιμων υλών αλλά και η περιβαλλοντική επιβάρυνση αποτελούν πτυχές μείζονος σημασίας για την επίτευξη αειφορίας στις κατασκευές κάτι το οποίο φαίνεται να επηρεάζει και τη λειτουργία των ηλεκτρομηχανολογικών συστημάτων (Η/Μ) [24]. Στοχεύοντας προς αυτή την κατεύθυνση, έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον καταγράφεται προς την ανάπτυξη ευφυών συστημάτων διαχείρισης των Η/Μ εγκαταστάσεων.

Η προσέγγιση αυτή συμβάλει στη βελτίωση των συνθηκών άνεσης με τα κλασσικά συστήματα διαχείρισης και τα συστήματα ελέγχου να αποτελούν τις κυριότερες εφαρμογές [25]. Αναλυτικότερα, τα ευφυή συστήματα διαχείρισης στοχεύουν στην επίτευξη υψηλών επιπέδων άνεσης, εξοικονόμησης ενέργειας και ελέγχου της ποιότητας αέρα [26]. Έτσι, ανάλογα με το σύστημα διαχείρισης που επιλέγεται, μπορούν να επιτύχουν βέλτιστες συνθήκες εσωτερικού περιβάλλοντος [27].

Την τελευταία δεκαετία καταγράφεται μια προσέγγιση άμεσης σύνδεσης των αναγκών του χρήστη με το αντίστοιχο εγκατεστημένο Η/Μ σύστημα, αξιοποιώντας δεδομένα, όπως οι επικρατούσες συνθήκες στο εσωτερικό ενός κτιρίου για να ρυθμιστεί αντίστοιχα η λειτουργία των Η/Μ συστημάτων [28]. Με αυτό τον τρόπο, βελτιώνονται οι συνθήκες εσωτερικού περιβάλλοντος και παράλληλα η άνεση των χρηστών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν ο αερισμός και η ψύξη λαμβάνοντας υπόψη το προφίλ των χρηστών του εκάστοτε κτιρίου, όπου επιτυγχάνεται παροχή καθαρού αέρα στο εσωτερικού του χώρου, βελτιώνοντας αισθητά την ποιότητα αέρα εσωτερικού περιβάλλοντος και αυξάνοντας την αποτελεσματικότητα και απόδοση της ψύξης του χώρου μέσα από τη ροή αέρα [11,29]. Τα συστήματα αυτά υπερτερούν έναντι των κλασσικών, καθώς δεν προσφέρουν ομοιόμορφες και άνετες συνθήκες για τους χρήστες, αφού ένα ομοιόμορφο περιβάλλον, μπορεί να συμβάλει στη διασφάλιση ενός άνετου περιβάλλοντος, με ενεργειακά αποδοτικό τρόπο [29,30].

Επιπροσθέτως, η επιλογή των συστημάτων θέρμανσης και κλιματισμού διέπεται από πλήθος πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, τα οποία πρέπει να αξιολογηθούν κατάλληλα και ακολούθως να πραγματοποιηθεί επιλογή του καταλληλότερου ανά περίπτωση συστήματος. Κάποια μέτρα που μπορούν να εφαρμοστούν για τη βελτίωση της ενεργειακής επάρκειας των κτιρίων, είναι η επιλογή συστημάτων κλιματισμού μεταβλητού όγκου αέρα, η χρήση υψηλής απόδοσης κινητήρων και ανεμιστήρων μεταβλητής ταχύτητας, η εγκατάσταση αντλιών θερμότητας και ψυκτών με υψηλό συντελεστή απόδοσης (COP, EER) και συστημάτων βέλτιστου ελέγχου [11,31].

3.3. Άνεση και ευεξία χρηστών

Τελευταία πτυχή αξιολόγησης αποτελεί το θεσμικό πλαίσιο που περιγράφει την άνεση και ευεξία των χρηστών σε επίπεδο κτιρίου καθώς τελικός στόχος των ανωτέρω πλαισίων αποτελεί η βελτίωση των συνθηκών που επικρατούν στο εσωτερικό ενός κτιρίου με επίκεντρο τον χρήστη και τις ανάγκες του. Το ενδιαφέρον αυτό αντανακλάται σε νομοθετικό επίπεδο μέσα από τον Νόμο 4122/2013, άρθρο 3 και συγκεκριμένα στις παραγράφους 2 και 6, όπου σημειώνεται πως η άνεση λαμβάνεται υπόψη κατά τον

προσδιορισμό της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων (θερμική και οπτική άνεση) και επισημαίνεται η ανάγκη διασφάλισης των συνθηκών άνεσης στο σύνολο των κτιρίων μέσα από τη ρύθμιση των εσωτερικών κλιματικών συνθηκών [19].

Οι παράμετροι άνεσης αλλά και ο τρόπος προσδιορισμού και αξιολόγησής τους δεν επιτυγχάνεται τόσο αναλυτικά μέσα από το νομοθετικό πλαίσιο αλλά μέσω εθνικών και διεθνών προτύπων. Αναλυτικότερα, η θερμική άνεση προσδιορίζεται μέσω του προτύπου ΕΛΟΤ EN 7730:2005 [32] και ANSI/ASHRAE Standard 55:2010 [33], η οπτική άνεση ακολουθεί το πρότυπο EN 12464-1-2011 [34], η ακουστική άνεση μέσω προτύπων όπως το EN15251-2007 [35] και η ποιότητα εσωτερικού αέρα μέσω του ASHRAE 62.1 [36].

Στόχος αυτών των προτύπων και οδηγιών, είναι η εφαρμογή ενός ενιαίου και κοινά αποδεκτού πλαισίου προσδιορισμού των συνθηκών άνεσης στα κτίρια. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον σημειώνεται προς αυτή την κατεύθυνση σε διεθνές επίπεδο όπως προκύπτει από το πλήθος των διεθνών προτύπων, που εστιάζουν στις επικρατούσες εσωκλιματικές συνθήκες και την ποιότητα αέρα στα κτίρια (ISO 7731 [37], ISO 8995 [38], ISO 15742 [39], ISO 15743 [40]) αλλά και τη θερμική άνεση (ISO 7726 [41], ISO 7730 [32], ISO 13732 part 2 [42]). Στην ίδια λογική, καλύπτεται και ο τομέας των μεταφορών (ISO 14505 parts 1-3 [43–45]) καθώς και ο ίδιος ο χρήστης μέσω της υποκειμενικότητας που χαρακτηρίζει την ανθρώπινη φύση για τον προσδιορισμό του αισθήματος άνεσης (ISO 14415 [46], ISO 8996 [47], ISO 9920 [48], ISO 10551 [49]) [50].

Ιδιαίτερα σε ότι αφορά την άνεση των χρηστών, όπως σημειώνεται και από τους Antoniadou και Papadopoulos, από το 1911 μέχρι και σήμερα πλήθος ερευνητικών εργασιών εστιάζουν προς την κατεύθυνση αξιολόγησης και προσδιορισμού της άνεσης ιδιαίτερα την τελευταία δεκαετία. Ακόμα σημειώνεται πως περισσότερα από 13 μοντέλα έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία 110 χρόνια στην προσπάθεια να περιγραφεί με τον πιο αναλυτικό τρόπο ένα τόσο υποκειμενικό φαινόμενο, με τους ερευνητές τα τελευταία χρόνια να εισάγουν δυναμικά την αντίληψη και την αίσθηση του ίδιου του χρήστη [12].

Αναλυτικότερα, το πρώτο μοντέλο προσδιορισμού της άνεσης τα 1911 από τον Lefevre [13] προσομοίωνε το ανθρώπινο σώμα ως μια σφαίρα με τον πυρήνα να ανταλλάσσει θερμότητα με το περιβάλλον. Τα επόμενα μοντέλα υπήρξαν πιο αναλυτικά εισάγοντας την επίδραση της ψυχολογίας στον προσδιορισμό της άνεσης [51] αλλά και μη κλασσικών μέχρι τότε παραμέτρων αξιολόγησης εσωτερικού χώρου, όπως η ενδυμασία [52]. Ακόμα, αναπτύχθηκαν και εξελίχθηκαν δυναμικά μαθηματικά μοντέλα περιγράφοντας το ανθρώπινο σώμα μέσω πλήθους σημείων [53–55]. Παρόλα αυτά, τα περισσότερα μοντέλα αποτέλεσαν εξέλιξη του μοντέλου του Fanger, εστιάζοντας στην ανάπτυξη δεικτών δυναμικής θερμικής αίσθησης [56] αλλά και ενός πιο προσαρμοστικού μοντέλου [57,58], με τελευταίο αυτό του Zhang όπου πραγματοποιείται ένας συνδυασμός των μοντέλων του Fanger και της δυναμικής προσομοίωσης του ανθρώπινου σώματος [59].

Παρ' όλα αυτά, σε επίπεδο εθνικού νομοθετικού πλαισίου δεν υπάρχει ακόμα κάποιο μοντέλο ή μεθοδολογία αξιολόγησης και προσδιορισμού της άνεσης και ευεξίας των χρηστών. Μόνη παράμετρος που λαμβάνεται υπόψη είναι τα επίπεδα θερμοκρασίας αέρα και σχετικής υγρασίας κατά τη χειμερινή και καλοκαιρινή περίοδο. Όπως προκύπτει και από τους Antoniadou, Papakostas & Papadopoulos [60], η πλειοψηφία των χωρών της ΕΕ επιλέγει ως θερμοκρασίες βάσης αντίστοιχες με τα προτεινόμενα επίπεδα κατά EN 15251. Υπάρχουν όμως χώρες, όπως η Μάλτα και η Κύπρος, που αποκλίνουν από τα επίπεδα αυτά, καθώς διαφοροποιούνται σημαντικά τα επίπεδα βαθμοημερών θέρμανσης και ψύξης για τις χώρες αυτές.

Διαπιστώνεται πως, παρά το έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον για την άνεση και ευεξία των χρηστών, δεν έχουν θεσπιστεί αρχές αναλυτικού προσδιορισμού και αξιολόγησής τους στο ισχύον νομοθετικό πλαίσιο είτε σε εθνικό είτε και σε διεθνές επίπεδο, που θα μπορούσαν να συμβάλλουν στη διασφάλιση καλών συνθηκών εσωτερικού περιβάλλοντος για τους χρήστες.

4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Οι σύγχρονες απαιτήσεις σχεδιασμού και η ανάγκη δημιουργίας ενός κτιριακού αποθέματος που δεν επιβαρύνει ενεργειακά και περιβαλλοντικά τον πλανήτη, αποτελούν τον βασικό στόχο προς την επίτευξη της βιωσιμότητας. Για την επίτευξη αυτού του στόχου, απαιτείται μια πιο ανθρωποκεντρική προσέγγιση στις φάσεις σχεδιασμού και λειτουργίας των κτιρίων. Η αποκοπή των αναγκών του χρήστη και των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του από τα στάδια αυτά μπορεί να οδηγήσει σε κτίρια και χρήστες δύο ταχυτήτων: (α) κτίρια όπου οι χρήστες ακολουθούν τις αρχές σχεδιασμού και λειτουργίας που τα διέπουν και είναι ενεργειακά ουδέτερα χωρίς όμως να επιτυγχάνεται συνεχώς άνεση του

χρήστη και (β) κτίρια όπου οι χρήστες θέτουν ως επίκεντρο την άνεσή τους επιβαρύνοντας ενεργειακά τη λειτουργία των κτιρίων.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της ασυμβατότητας μεταξύ κτιριακής εγκατάστασης και αναγκών χρήστη παρατηρείται σε ένα βαθμό σήμερα λόγω των ειδικών συνθηκών περιορισμού της κινητικότητας που οφείλεται στην πανδημία του COVID-19. Σε πολλές περιπτώσεις οι χώροι γραφείων πλέον υπολειτουργούν με τους χρήστες τους, να μεταφέρουν τις δραστηριότητές τους στις κατοικίες τους. Η μεταβολή αυτή της καθημερινότητας τουλάχιστον του 50% των εργαζομένων σε χώρους γραφείων, μέσω της τηλε-εργασίας, οδήγησε στην ανάγκη υιοθέτησης ενός νέου λειτουργικού προφίλ της κατοικίας που περιλαμβάνει πολλαπλές δραστηριότητες όπως η εργασία, η κατοίκηση, η εκπαίδευση και η ψυχαγωγία. Μέσα, λοιπόν, από τις πολυσχιδείς αυτές δραστηριότητες που επιτελούνται πλέον στην κατοικία, κρίνεται αναγκαία η υιοθέτηση μιας προσέγγισης με επίκεντρο τον χρήστη, κατά τη φάση σχεδιασμού και λειτουργίας ενός κτιρίου, ενσωματώνοντας ευφυή συστήματα διαχείρισης ώστε να συνυπολογίζεται η ατομική αντίληψη άνεσης και ευεξίας, καθώς τελικός στόχος είναι η μείωση στο μέγιστο δυνατό της κατανάλωσης ενέργειας και της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης της κατασκευής.

Προς την κατεύθυνση αυτή στοχεύει η ΕΕ με τη θέσπιση ευρωπαϊκών στρατηγικών, όπως οι στόχοι του 2030 και του 2050. Συγκεκριμένα, οι στόχοι που έχουν τεθεί για το 2030 εστιάζουν στην μείωση κατά τουλάχιστον 40% των εκπομπών αέριων ρύπων του θερμοκηπίου, στη συμμετοχή κατά τουλάχιστον 32% των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και στη βελτίωση τουλάχιστον κατά 32,5% της ενεργειακής απόδοσης, ενώ αναμένεται μέχρι τον Ιούνιο του 2021 μετά από αξιολόγηση της υφιστάμενης συνθήκης να επαναπροσδιοριστούν οι στόχοι ανά χώρα. Τελικός στόχος των επιμέρους στρατηγικών είναι το 2050 να αποτελεί μια χρονιά ορόσημο, με την ΕΕ να είναι κλιματικά ουδέτερη δίνοντας έμφαση στην οικονομία, την ευεξία και υγεία των ανθρώπων αλλά και την προστασία του περιβάλλοντος [61,62]. Μέσω του πλαισίου αυτού διακρίνεται μια σταθερή τάση ανάπτυξης έχοντας ως επίκεντρο τόσο το περιβάλλον όσο και τον άνθρωπο.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ανάγκη βελτίωσης του κτιριακού αποθέματος και η ανάπτυξη και εφαρμογή τεχνικών προς έναν κτιριακό τομέα με μηδενικό ενεργειακό και περιβαλλοντικό προφίλ αποτελεί την βασική πρόκληση του 21^{ου} αιώνα. Στο πλαίσιο αυτό διεξήχθη μια αποτύπωση της εξέλιξης των απαιτήσεων άνεσης στον κτιριακό τομέα σε θεσμικό επίπεδο, έχοντας ως κέντρο ενδιαφέροντος τον χρήστη και τη διασφάλιση άνεσης και ευεξίας του. Από την διεξαχθείσα ανάλυση προκύπτει πως στοχεύοντας προς την επίτευξη υψηλών επιπέδων άνεσης και ευεξίας των χρηστών εντός του κτιριακού περιβάλλοντος, πλήθος αλλαγών και νεωτερισμών πρέπει να ενσωματωθούν στο θεσμικό νομοθετικό πλαίσιο. Την τελευταία δεκαετία έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον καταγράφεται τόσο στη μελέτη του τρόπου επίδρασης της αντίληψης άνεσης των χρηστών στη λειτουργία του κτιρίου όσο και σε μια ευρύτερη, πιο ανθρωποκεντρική θεώρηση της λειτουργίας του κτιρίου.

Αυτή, όμως, η τάση, δεν αποτυπώνεται ακόμα έντονα σε επίπεδο θεσμικού πλαισίου, παρά μόνο μέσα από διεθνή και εθνικά πρότυπα, όπως είναι το ISO 7730 και το ASHRAE 55. Επιπρόσθετα, εστιάζοντας στην άνεση και την ευεξία των χρηστών κατά την παραμονή τους εντός του δομημένου περιβάλλοντος, παρατηρείται η ανάγκη λεπτομερούς προσδιορισμού των παραμέτρων επίδρασης στην αντίληψή τους από τους χρήστες. Η ανάγκη αυτή τονίζεται τόσο από τον αριθμό των μοντέλων που έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία 110 χρόνια για τον σκοπό αυτό, όσο και από τον αριθμό των ερευνών που έχουν εστιάσει σε αυτήν την κατεύθυνση ειδικά τις τελευταίες δεκαετίες. Από τα στοιχεία αυτά, προκύπτει πως οι κύριες παράμετροι αξιολόγησης για τον προσδιορισμό των επιπέδων άνεσης του χώρου είναι η θερμοκρασία αέρα, τα επίπεδα σχετικής υγρασίας, η ροή αέρα, τα επίπεδα συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) αλλά και τα επίπεδα λειτουργίας και απόδοσης των κατασκευών.

Λαμβάνοντας υπόψη το σύνολο των στοιχείων αυτών, προκύπτει πως το νομοθετικό πλαίσιο, εμπλουτίζεται μεν, έστω και αργά και σταδιακά, δίνοντας έμφαση στην ενίσχυση του κτιριακού κελύφους και των Η/Μ συστημάτων και λιγότερο στην επίτευξη άνεσης, στοχεύοντας εν τέλει κυρίως στη δημιουργία κτιρίων με σχεδόν μηδενικό ενεργειακό και περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

Επόμενο βήμα οφείλει να είναι μια περισσότερο ανθρωποκεντρική προσέγγιση του σχεδιασμού και λειτουργίας της κατασκευής, ώστε τελικά να διασφαλίζοντα συνθήκες θερμικές άνεσης για τους πραγματικούς χρήστες και όχι για τον στατιστικά μέσο χρήστη.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς θέλουν να ευχαριστήσουν το Ελληνικό Ίδρυμα Έρευνας και Καινοτομίας καθώς, η ερευνητική εργασία υποστηρίχτηκε από το Ελληνικό Ίδρυμα Έρευνας και Καινοτομίας (ΕΛ.ΙΔ.Ε.Κ.) στο πλαίσιο της Δράσης «1η Προκήρυξη ερευνητικών έργων ΕΛ.ΙΔ.Ε.Κ. για την ενίσχυση των μελών ΔΕΠ και Ερευνητών/τριών και την προμήθεια εξοπλισμού μεγάλης αξίας» (Αριθμός Έργου:4104).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] United Nations Framework Convention on Climate Change, 2017, 'Kyoto Protocol' [Online]. Available: http://unfccc.int/kyoto_protocol/items/2830.php. [Accessed: 24-Mar-2017].

[2] United Nations, 1992, 'Agenda 21 .:. Sustainable Development Knowledge Platform' [Online]. Available: https://sustainabledevelopment.un.org/outcomedocuments/agenda21. [Accessed: 27-Jan-2021].

[3] United Nations, 2021, 'THE 17 GOALS | Sustainable Development', Departmen Econ. Soc. Aff. [Online]. Available: https://sdgs.un.org/goals. [Accessed: 28-Jan-2021].

[4] United Nations, 2021, 'Sustainable Cities and Human Settlements', Dep. Econ. Soc. Aff. [Online]. Available: https://sdgs.un.org/topics/sustainable-cities-and-human-settlements. [Accessed: 28-Jan-2021].

[5] Bravo, G., and González, E., 2013, 'Thermal Comfort in Naturally Ventilated Spaces and under Indirect Evaporative Passive Cooling Conditions in Hot-Humid Climate', Energy Build., 63, pp. 79–86.

[6] Gao, J., Wang, Y., and Wargocki, P., 2015, 'Comparative Analysis of Modified PMV Models and SET Models to Predict Human Thermal Sensation in Naturally Ventilated Buildings', Build. Environ., 92, pp. 200–208.

[7] Asdrubali, F., Buratti, C., Cotana, F., Baldinelli, G., Goretti, M., Moretti, E., Baldassarri, C., Belloni, E., Bianchi, F., Rotili, A., Vergoni, M., Palladino, D., and Bevilacqua, D., 2013, 'Evaluation of Green Buildings' Overall Performance through in Situ Monitoring and Simulations', Energies, 6(12), pp. 6525–6547.

[8] Akimoto, T., Tanabe, S. ichi, Yanai, T., and Sasaki, M., 2010, 'Thermal Comfort and Productivity - Evaluation of Workplace Environment in a Task Conditioned Office', Build. Environ., 45(1), pp. 45–50.

[9] Wagner, A., Gossauer, E., Moosmann, C., Gropp, T., and Leonhart, R., 2007, 'Thermal Comfort and Workplace Occupant Satisfaction-Results of Field Studies in German Low Energy Office Buildings', Energy Build., 39(7), pp. 758–769.

[10] Veselý, M., Li, R., and Zeiler, W., 2015, 'Comparison of Thermal Comfort and Sensation Scales - a Case Study', Heal. Build. Eur. 2015, (May), pp. 18–20.

[11] Αντωνιάδου, Π., 2019, 'Αξιολόγηση Εσωκλίματος Και Ανάπτυξη Δεικτών Άνεσης Για Κτίρια Σχεδόν Μηδενικής Κατανάλωσης Ενέργειας', Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

[12] Antoniadou, P., and Papadopoulos, A. M., 2017, 'Occupants' Thermal Comfort: State of the Art and the Prospects of Personalized Assessment in Office Buildings', Energy Build.

[13] Lefevre, J., 1911, 'Chaleur Animale et Energetigue'.

[14] Papadopoulos, A. M., 2016, 'Forty Years of Regulations on the Thermal Performance of the Building Envelope in Europe: Achievements, Perspectives and Challenges', Energy Build., 127, pp. 942–952.

[15] Οδηγία 2002/91/ΕΚ, 2002, 'Οδηγία 2002/91/Εκ Του Ευρωπαϊκού ΚοινοβουλίουΚαι Του Συμβουλίου Της 16ης Δεκεμβρίου 2002 Για Την Ενεργειακή Απόδοση Των Κτιρίων', Επίσημη Εφημερίδα των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων, pp. 351–352.

[16] Οδηγία 2010/31/ΕΕ, 2010, 'Οδηγία 2010/31/ΕΕ Του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου Και Του Συμβουλίου Για Την Ενεργειακή Απόδοση Των Κτιρίων.', Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης, pp. 13–35.

[17] Οδηγία 2018/844/ΕΕ, 2018, 'Οδηγία (ΕΕ) 2018/844 ΤΟΥ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟΥ ΚΟΙΝΟΒΟΥΛΙΟΥ ΚΑΙ

[55] Huizenga, C., Hui, Z., and Arens, E., 2001, 'A Model of Human Physiology and Comfort for Assessing Complex Thermal Environments', Build. Environ., 36(6), pp. 691–699.

[56] Fiala, D., 1998, 'Dynamic Simulation of Human Heat Transfer and Thermal Comfort', Dr. Diss. HOCHSCHULE FÜRTECHNIK.

[57] De Dear, R. J., and Brager, G. S., 2002, 'Thermal Comfort in Naturally Ventilated Buildings: Revisions to ASHRAE Standard 55', Energy Build., 34(6), pp. 549–561.

[58] Fu, X., and Wu, D., 2015, 'Comparison of the Efficiency of Building Hybrid Ventilation Systems with Different Thermal Comfort Models', Energy Procedia, 78, pp. 2820–2825.

[59] Zhang, H., Arens, E., Huizenga, C., and Han, T., 2010, 'Thermal Sensation and Comfort Models for Non-Uniform and Transient Environments: Part II: Local Comfort of Individual Body Parts', Build. Environ., 45(2), pp. 389–398.

[60] Antoniadou, P., Papakostas, K., and Papadopoulos, A., 2020, 'The Occupants' Comfort in Non-Residential Nearly Zero Energy Buildings in the 21stcentury: A Review', *2020 5th International Conference on Smart and Sustainable Technologies, SpliTech 2020*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.

[61] European Commission, 'Making the EU Climate-Neutral by 2050' [Online]. Available: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_20_335. [Accessed: 12-Feb-2021].

[62] European Commission, 'The European Green Deal' [Online]. Available: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_19_6691. [Accessed: 12-Feb-2021].

ΠΟΛΙΤΙΚΗ

ΟΙ ΑΠΟΨΕΙΣ ΚΑΤΟΙΚΩΝ ΤΗΣ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΜΕΓΑΛΟΠΟΛΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΛΙΓΝΙΤΟΠΟΙΗΣΗ ΩΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ ΤΗΣ ΕΥΡΩΠΑΪΚΗΣ ΠΡΑΣΙΝΗΣ ΣΥΜΦΩΝΙΑΣ ΤΟΥ 2019

Γαρυφαλλιά Κουτζή, Ελένη Σαρδιανού[1], Ρόιδω Μητούλα[1], Κωνσταντίνος Αμπελιώτης[1]*

[1] ΠΜΣ "Βιώσιμη Ανάπτυξη", Τμήμα Οικονομίας και Βιώσιμης Ανάπτυξης, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Ελ. Βενιζέλου 70, 17671 Καλλιθέα
*e-mail: kabeli@hua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της εργασίας είναι η καταγραφή των απόψεων των κατοίκων των περιοχών της Ελλάδος – Δυτική Μακεδονία και Πελοπόννησος (ευρύτερη περιοχή της Μεγαλόπολης) – στις οποίες αναμένεται να έχει καθοριστική επίδραση η εφαρμογή της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας του 2019. Για τους σκοπούς της έρευνας, πραγματοποιήθηκε, κατά τους θερινούς μήνες του 2020, τυχαία δειγματοληψία με χρήση δομημένου ερωτηματολογίου. Στην έρευνα συμμετείχαν 150 άτομα που ζουν και εργάζονται στις υπό εξέταση περιοχές. Στόχος του ερωτηματολογίου είναι η ανάλυση των απόψεων των ερωτηθέντων σχετικά με την Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία και την προοπτική απολιγνιτοποίησης στις περιοχές τους, τις επιπτώσεις της και την έναρξη της «νέας εποχής».

Τα αποτελέσματα αναδεικνύουν το γεγονός πως στην αρχή και κατά την περίοδο της έρευνας, η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία άφηνε ένα αβέβαιο μέλλον για την περίπτωση του λιγνίτη στην Ελλάδα. Επιπρόσθετα, όπως φάνηκε από τα αποτελέσματα του ερωτηματολογίου, υπήρχε φόβος για τη νέα εποχή. Οι κάτοικοι των λιγνιτικών περιοχών ένιωθαν ανασφαλείς μπροστά στη νέα εποχή. Δεν ήταν τόσο πρόθυμοι να δεχτούν τη δημιουργία εγκαταστάσεων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Ωστόσο αντιλήφθηκαν πως ο λιγνίτης έχει επιφέρει σοβαρές αρνητικές επιπτώσεις τόσο σε εκείνους τους ίδιους, όσο και στον περιβάλλον χώρο.

Γίνεται έτσι αντιληπτό, πως όσο προχωρούν οι εξελίξεις, απαιτείται μια σαφής και σωστή πληροφόρηση, ώστε να ξεδιαλύνει το θολό τοπίο που υπήρχε ως το καλοκαίρι του 2020. Τόσο οι αρμόδιοι ευρωπαϊκοί φορείς, όσο και οι εθνικές πρωτοβουλίες, οι οποίες πρόκειται να συμβάλλουν στην αναγκαία μετάβαση στην εποχή της απολιγνιτοποίησης, πρέπει να λάβουν υπόψη τους τις κοινωνικο-οικονομικές επιπτώσεις στις τοπικές κοινωνίες. Η συμβολή της τοπικής κοινότητας, η ενημέρωση και η εκπαίδευση κρίνονται απαραίτητες για την ομαλή ανάκαμψη των περιοχών που πρόκειται να πληγούν περισσότερο τα επόμενα χρόνια.

Λέξεις Κλειδιά: *Κλιματική αλλαγή, Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία, Λιγνιτικές περιοχές, Απολιγνιτοποίηση, Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας*

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία ή αλλιώς European Green Deal [1] ανακοινώθηκε την 11η Δεκεμβρίου 2019 από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή. Πρόκειται για ένα κείμενο στο οποίο ορίζεται η στρατηγική που πρέπει να ακολουθήσουν τα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης και οι πολίτες τους στο πλαίσιο μιας αναπτυξιακής λογικής με βιώσιμα χαρακτηριστικά. Το κείμενο αυτό προτάθηκε με τη μορφή αναπτυξιακού πλάνου από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή προς τα υπόλοιπα Ευρωπαϊκά Όργανα (το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο, το Συμβούλιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης και την Ευρωπαϊκή Οικονομική και Κοινωνική Επιτροπή και την Επιτροπή των Περιφερειών).

Στόχος της νέας συμφωνίας είναι να αποτελέσει η Ευρωπαϊκή Ένωση έναν χώρο με μηδενικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και να αναδειχθεί η Ευρώπη ως η πρώτη ενεργειακά ουδέτερη ήπειρος έως το 2050. Από την πρόεδρο της Επιτροπής Ursula von der Leyen έγινε λόγος για τη δημιουργία μιας ενεργειακά ουδέτερης ηπείρου. Αυτό συνεπάγεται την έλλογη χρήση και διαχείριση των φυσικών πόρων με τρόπο αποδοτικό και φιλικό προς το περιβάλλον. Η επίτευξη αυτού του στόχου, θα είχε ως συνέπεια την αναπροσαρμογή της ευρωπαϊκής οικονομίας, η οποία μπορεί να καταστεί περισσότερο ανταγωνιστική και δίκαιη για όλους τους πολίτες της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Παράλληλα, η εξάλειψη των αερίων του θερμοκηπίου μπορεί να συμβάλλει σημαντικά στη βελτίωση της υγείας των πολιτών και στη μείωση των κινδύνων που μπορεί να επέλθουν, λόγω της καταστροφής του φυσικού περιβάλλοντος. Συνεπώς, πρόκειται για μια συμφωνία που στοχεύει παράλληλα στη βελτίωση της κοινωνίας και της οικονομίας, εστιάζοντας στα προβλήματα του περιβάλλοντος.

1.1. Το Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα

Η περίοδος της απολιγνιτοποίησης είναι μια εποχή προσαρμογής και λήψης νέων μέτρων. Για το λόγο αυτό, στην Ελλάδα, το Νοέμβριο του 2019, το Υπουργείο Περιβάλλοντος παρουσίασε το Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα (Ε.Σ.Ε.Κ.) [2]. Το Ε.Σ.Ε.Κ. αποτελεί ένα κείμενο που έχει τη μορφή στρατηγικού σχεδίου και αφορά στη διαχείριση της ενέργειας και την κλιματική αλλαγή. Πρόκειται για μέτρα και πολιτικές που στοχεύουν στην αλλαγή ή βελτίωση της κλιματικής και περιβαλλοντικής κατάστασης της χώρας μέχρι το 2030. Ανάμεσα στους στόχους είναι η μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου. Για να επιτευχθεί αυτός ο στόχος απαιτείται μια ενεργειακή μετάβαση σε μια εποχή απολιγνιτοποίησης. Δεδομένου, όμως, ότι ο λιγνίτης αποτελεί το «εθνικό καύσιμο» της χώρας η συγκεκριμένη μετάβαση πρέπει να πραγματοποιηθεί με τον πλέον οικονομικά ανταγωνιστικό και ωφέλιμο τρόπο.

Πιο συγκεκριμένα, το εθνικό σχέδιο θέτει ως στόχους τους παρακάτω: (α) Μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου (ως το 2030), σε επίπεδα -42% συγκριτικά με το 1990 και -55% συγκριτικά με το 2005. (β) Αλλαγές όσον αφορά στη διαχείριση αποβλήτων μέσα από την εφαρμογή ενός σχεδίου κυκλικής οικονομίας. Μάλιστα, η Εθνική Στρατηγική Προσαρμογής για την Κλιματική Αλλαγή (Ε.Σ.Π.Κ.Α.), αναμένεται να καθορίζει τους στόχους, τις κατευθυντήριες γραμμές και τα μέσα τα οποία θα πρέπει να εφαρμοστούν σε κάθε ξεχωριστή περίπτωση σε όλα τα επίπεδα (τοπικό, περιφερειακό, εθνικό). (γ) Χρήση των ΑΠΕ κατά 35% στο σύνολο της εθνικής κατανάλωσης ενέργειας. (δ) Μείωση της τελικής κατανάλωσης ενέργειας, με παράλληλη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης. Τα ποσοστά που θέτει η ελληνική κυβέρνηση είναι υψηλότερα των προσδοκιών της Ε.Ε.

Επιπλέον, στο πλαίσιο του Ε.Σ.Ε.Κ. παρουσιάζεται το χρονοδιάγραμμα για την παύση της λειτουργίας των λιγνιτικών σταθμών. Η λιγνιτική μονάδα στο Αμύνταιο έχει ήδη σταματήσει να λειτουργεί από τις αρχές Σεπτέμβρη του 2020. Το 2021 εκτιμάται ότι θα κλείσουν δύο λιγνιτικές μονάδες στην Καρδία της Δυτικής Μακεδονίας και μία ακόμα στην Αρκαδία, στην περιοχή της Μεγαλόπολης μέχρι το 2022. Επίσης, μέχρι το 2023 προβλέπεται να σταματήσουν να λειτουργούν και άλλες τρεις λιγνιτικές μονάδες. Το 2023 αποτελεί χρονιά σταθμό, αφού έως τότε το μεγαλύτερο μέρος της παραγωγής λιγνίτη θα έχει σταματήσει. Η μόνη κατ' εξαίρεση μονάδα που θα βρίσκεται σε λειτουργία μέχρι το 2028 είναι η μονάδα Πτολεμαΐδα V.

1.2. Το Σχέδιο Δίκαιης Αναπτυξιακής Μετάβασης

Για να επιτευχθεί η ομαλότερη μετάβαση στην μεταλιγνιτική εποχή, έχει συνταχθεί, επιπλέον, το Σχέδιο Δίκαιης Αναπτυξιακής Μετάβασης, το οποίο εγκρίθηκε από την Κυβερνητική Επιτροπή και αφορά στην δίκαιη μετάβαση των λιγνιτικών περιοχών [3]. Πιο συγκεκριμένα το σχέδιο αφορά στις περιοχές της Δυτικής Μακεδονίας και της Μεγαλόπολης.

Μετά από διαγωνισμούς δημοσίων και ιδιωτικών φορέων, ανακοινώθηκαν πλήθος επενδύσεων στις λιγνιτικές περιοχές. Στη Δυτική Μακεδονία πρόκειται να εγκατασταθούν «φωτοβολταϊκά πάρκα, πεδίο ενεργειακής έρευνας και τεχνολογίας, βιομηχανικό πάρκο ηλεκτροκίνησης, έξυπνες αγροτικές μονάδες παραγωγής, οικοσύστημα οινικού τουρισμού και υπερσύγχρονη κλινική φυσικής αποκατάστασης». Αντίστοιχα στην περιοχή της Μεγαλόπολης οι επενδύσεις αφορούν «φωτοβολταϊκά πάρκα, πρότυπη βιομηχανία φαρμάκων, μονάδα ευφυούς κτηνοτροφίας και ζωοτροφών, καθώς και πρωτότυπο θεματικό πάρκο».

Για τη σύνταξη του Σ.Δ.Α.Μ. λήφθηκαν υπόψη κάποιοι σημαντικοί παράμετροι. Αρχικά, έγινε ανάλυση της κατάστασης σε κάθε περιοχή και εξετάστηκαν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της. Ύστερα, σχεδιάστηκαν ανάλογα οι επενδύσεις που πρόκειται να πραγματοποιηθούν σε κάθε τόπο, ενώ παράλληλα, υπολογίστηκαν οι θέσεις εργασίας που θα δημιουργηθούν και το ενδεχόμενο εξειδίκευσης των ήδη εργαζομένων στις λιγνιτικές βάσεις. Χαρτογραφήθηκαν τα κίνητρα κάθε επένδυσης και αποφασίστηκαν να διενεργηθούν ειδικά πολεοδομικά σχέδια. Τέλος, ορίστηκαν οι πηγές από τις οποίες θα χρηματοδοτείται κάθε έργο.

Επιπλέον, πρόκειται να πραγματοποιηθούν περαιτέρω έλεγχοι σε σχέση με την κοινωνική και οικονομική κατάσταση της εκάστοτε περιοχής. Παράλληλα, θα γίνουν έρευνες σχετικά με τις μελλοντικές επιπτώσεις τις απολιγνιτοποίησης, όσον αφορά για παράλληλα στις θέσεις εργασίας. Και τέλος, θα εξεταστεί το ενδεχόμενο της τηλεθέρμανσης.

Το Σ.Δ.Α.Μ. προσπαθεί να καλύψει ένα εύρος πεδίων. Ωστόσο, κάθε περιοχή είναι ξεχωριστή και έχει μοναδικές ανάγκες, γι' αυτό πρέπει να δεχθεί διαφορετική αντιμετώπιση. Παρακάτω, αναλύονται συνοπτικά οι συνέπειες της απολιγνιτοποίησης στη Δυτική Μακεδονία και Μεγαλόπολη.

1.3. Η εφαρμογή του Σ.Δ.Α.Μ. σε Δυτική Μακεδονία και Μεγαλόπολη

Στο πλαίσιο της εφαρμογής του Σ.Δ.Α.Μ., αναδείχθηκαν κάποια ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των περιοχών, τα οποία μπορούν να αναδειχθούν τώρα που ο λιγνίτης «αποχωρεί».

Στην περίπτωση της Δυτικής Μακεδονίας, αυτά τα μοναδικά χαρακτηριστικά μπορούν να ενισχύσουν τον τουρισμό στην περιοχή και να αποφέρουν σημαντικά κοινωνικά και οικονομικά αποτελέσματα για την ανάκαμψη του τόπου. Πιο συγκεκριμένα, στην περιοχή υπάρχει μια πλούσια πολιτισμική κληρονομιά (π.χ. ο προϊστορικός οικισμός Δισπηλιού, η Κοβεντάρειος Βιβλιοθήκη, κ.α.). Παράλληλα, η περιοχή θα μπορούσε να αναπτύξει και ένα είδος εναλλακτικού τουρισμού, τον θρησκευτικό τουρισμό. Η Δυτική Μακεδονία διαθέτει πλήθος μονών ιστορικής και θρησκευτικής σημασίας, όπως είναι η μονή Μαυριώτισσας, η Βασιλική του Αγίου Αχιλλείου Πρεσπών και ο Άγιος Στέφανος. Εκτός από την πολιτιστική κληρονομιά του τόπου, το κρασί που παράγεται θα μπορέσει να προσελκύσει επισκέπτες που ενδιαφέρονται για τον οινικό τουρισμό.

Στόχος είναι η περιοχή της Δυτικής Μακεδονίας να μετατραπεί σε ένα κέντρο «παραγωγής και έρευνας καθαρής ενέργειας». Αυτό σημαίνει πως τα φωτοβολταϊκά πάρκα θα δώσουν νέα μορφή στην περιοχή, θα αναπτυχθούν σύγχρονες μονάδες αγροτικής παραγωγής, ενώ παράλληλα θα δημιουργηθούν περίπου 9.100 θέσεις εργασίας τόσο άμεσα όσο και κατά τη λειτουργία των νέων εγκαταστάσεων.

Στην περιοχή της Μεγαλόπολης, η κατάσταση είναι κάπως διαφορετική. Ο φυσικός πλούτος της ευρύτερης περιοχής της Μεγαλόπολης είναι αξιοθαύμαστος και μπορεί να προσελκύσει πλήθος τουριστών (π.χ. το όρος Μαίναλο και το χιονοδρομικό κέντρο, ο ποταμός Λούσιος, κ.α.). Εκτός αυτού, στην Πελοπόννησο παράγονται ποιοτικό ελαιόλαδο, κρασί, μέλι και καρύδια, τα οποία με την κατάλληλη αξιοποίηση μπορούν να συμβάλλουν στην ανάπτυξη των εμπορικών δραστηριοτήτων. Ωστόσο, το επίπεδο κατάρτισης του πληθυσμού είναι αρκετά χαμηλό, για αυτό απαιτείται η παρότρυνση του πληθυσμού για απασχόληση σε νέου τομείς εργασίας και η κατάρτιση των ατόμων που πρόκειται να εργαστούν στις νέες εγκαταστάσεις.

Στόχος είναι η Μεγαλόπολη να αναδειχθεί σε μια ενεργειακή και βιομηχανική περιοχή. Πρόκειται να λειτουργήσει μια πρότυπη βιομηχανία φαρμάκων, να αναπτυχθεί η κτηνοτροφία και να ιδρυθεί ένα θεματικό πάρκο ψυχαγωγίας. Μάλιστα, κατά τη διάρκεια κατασκευής και λειτουργίας των νέων εγκαταστάσεων πρόκειται να δημιουργηθούν ως 3.650 θέσεις εργασίας.

Πράγματι, η απολιγνιτοποίηση θα επιφέρει σημαντικές αλλαγές τόσο στη Δυτική Μακεδονία, όσο και στη Μεγαλόπολη. Σίγουρα, στην αρχή υπάρχει ο φόβος για κάθε τι καινούριο, για τα αποτελέσματα του οποίου δεν μπορεί κανείς να μιλήσει με ακρίβεια. Ωστόσο, είναι μια ευκαιρία οι περιοχές αυτές να αναδείξουν τη φυσιογνωμία τους και να ανακάμψουν σύντομα οικονομικά και κοινωνικά.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η έρευνα πραγματοποιήθηκε, στο πλαίσιο μιας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας [4], με τη μορφή ερωτηματολογίου, το οποίο διαμοιράστηκε με ηλεκτρονικό τρόπο, λόγω της επιδημιολογικής κατάστασης, κατά τους θερινούς μήνες του 2020. Στόχος του ερωτηματολογίου ήταν να συλλεχθούν σημαντικά δεδομένα σχετικά με την ως τώρα επίδραση των λιγνιτωρυχείων στους κατοίκους των περιοχών της Κοζάνης, Φλώρινας, Πτολεμαΐδας και της ευρύτερης περιοχής της Δυτικής Μακεδονίας, καθώς και της Μεγαλόπολης. Παράλληλα, εξετάστηκε ο τρόπος με τον οποίο οι κάτοικοι των συγκεκριμένων περιοχών πιστεύουν ότι θα τους επηρεάσει η μεταλιγνιτική περίοδος.

Το ερωτηματολόγιο ήταν ανώνυμο και δεν συλλέχθηκαν προσωπικά στοιχεία των συμμετεχόντων. Στο σύνολό του το ερωτηματολόγιο περιλάμβανε 22 ερωτήσεις, ορισμένες εκ των οποίων δημογραφικές. Κάποιες σχετίζονταν με την Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία και κάποιες άλλες άφηναν τους ερωτηθέντες να εκφράσουν την άποψή τους σχετικά με το λιγνίτη στις περιοχές τους, τις επιπτώσεις του και τη «νέα εποχή». Το δείγμα ήταν 150 άτομα και η επιλογή των ατόμων ήταν τυχαία. Με τον όρο «τυχαίο δείγμα» εννοείται πως κάθε κάτοικος των παραπάνω περιοχών, είχε την ίδια πιθανότητα συμμετοχής στην έρευνα.

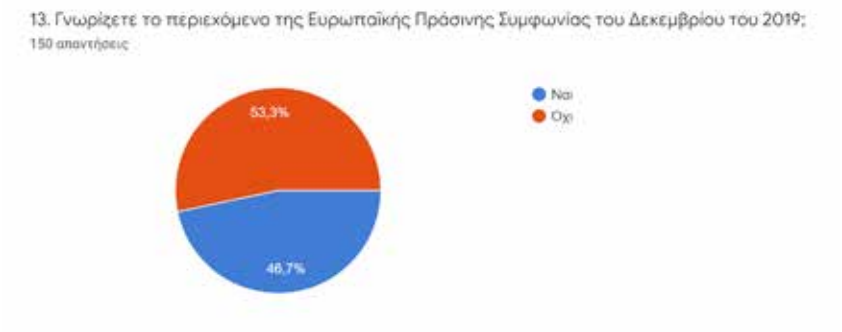
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Από το σύνολο των ερωτηθέντων, το 56% ήταν γυναίκες και το 44% άντρες. Παρουσιάστηκε ένα εύρος ηλικιών από 25 έως 72 ετών, με τους περισσότερους να κυμαίνονται μεταξύ 35 και 50 ετών. Αυτό σημαίνει πως στο ερωτηματολόγιο συμμετείχαν άτομα που είναι ενεργά στην κοινωνία και στην αγορά εργασίας. Όσον αφορά στην οικογενειακή κατάσταση, το 66% εκ των ερωτηθέντων δήλωσαν έγγαμοι, ενώ το 24% εξ αυτών δεν έχει παντρευτεί.

Το 88% των συμμετεχόντων δήλωσε πως κατοικεί κοντά στις περιοχές προς εξέταση, δηλαδή σε λιγνιτικές περιοχές. Στην επόμενη ερώτηση σχετικά με τον αν εξαρτάται το οικογενειακό εισόδημα από τη λειτουργία των λιγνιτωρυχείων, η πλειονότητα απάντησε πως «ΝΑΙ». Επιπλέον, σχεδόν όλοι οι ερωτηθέντες δήλωσαν πως γνωρίζουν κάποιον που έχει εργαστεί σε λιγνιτωρυχείο. Σε αυτό το σημείο γίνεται κατανοητό πως οι κάτοικοι των περιοχών βρίσκονται ή τουλάχιστον βρίσκονταν σε άμεση σχέση με τα λιγνιτωρυχεία. Είναι σπάνιο να μην υπάρχει έστω ένας άνθρωπος στο στενό τους κύκλο που να μην έχει ασχοληθεί με το λιγνίτη. Το ορυκτό είναι, λοιπόν, άμεσα συνδεδεμένο με τις περιοχές αυτές.

Ακολούθησαν οι ερωτήσεις σχετικά με τις επιπτώσεις της εξόρυξης και επεξεργασίας του λιγνίτη. Οι περισσότεροι, το 32%, αμφιβάλλουν σχετικά με το αν η εξόρυξη λιγνίτη επηρεάζει τα κτίσματα της περιοχής. Βέβαια, όσον αφορά στο περιβάλλον, οι απαντήσεις είναι πιο ξεκάθαρες. Από το σύνολο των 150 ατόμων, ένα ποσοστό 74% φάνηκε πολύ σίγουρο έως πάρα πολύ σίγουρο πως η εξόρυξη λιγνίτη μπορεί να προκαλέσει περιβαλλοντικά προβλήματα. Όσον αφορά στα προβλήματα υγείας, το 62,7% συμφώνησε πως πράγματι έχουν παρατηρηθεί ασθένειες όπως ρινίτιδα και άσθμα. Το ποσοστό είναι αρκετά υψηλό σε σημείο στο οποίο επιβεβαιώνεται η βιβλιογραφία. Πράγματι, η εξόρυξη λιγνίτη ευθύνεται για την έξαρση προβλημάτων υγείας. Έτσι, ενώ στην επόμενη ερώτηση σχετικά με άλλα προβλήματα που έχουν παρατηρηθεί οι απαντήσεις έκλιναν προς το «ΟΧΙ» (56,7%), εκείνοι που απάντησαν «ΝΑΙ» συμπλήρωσαν διάφορες ασθένειες. Για παράδειγμα, αναφέρθηκε ο καρκίνος, οι αλλεργίες, η δύσπνοια, οι πνευμονοπάθειες, τα καρδιολογικά, τα δερματολογικά και τα ψυχολογικά προβλήματα. Εκτός από την υγεία, κάποιοι από τους ερωτηθέντες σημείωσαν το χαμηλό μορφωτικό επίπεδο της περιοχής, λόγω του εφησυχασμού και της μόνιμης εργασίας στα λιγνιτικά εργοστάσια, την καταστροφή της βιοποικιλότητας και την εξαφάνιση των ζώων που υπήρχαν στην περιοχή, την υποβάθμιση της γης, τη ρύπανση της ατμόσφαιρας και των υδάτων με αποτέλεσμα την όξινη βροχή και την υποβάθμιση της ποιότητας ζωής.

Έπειτα, ακολούθησαν ερωτήσεις σχετικά με την Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία. Τα αποτελέσματα στην ερώτηση για το αν γνωρίζουν το περιεχόμενό της δεν είχαν μεγάλες αποκλίσεις (βλ. Εικόνα 1).



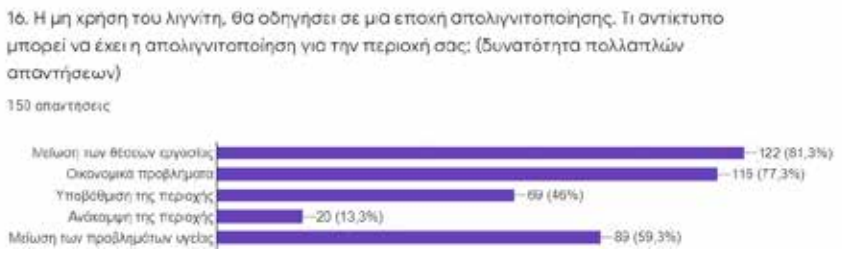
Εικόνα 1: Γνώση περιεχομένου της Πράσινης Συμφωνίας.

Με μικρή διαφορά 6,6%, φάνηκε πως οι περισσότεροι δεν την γνωρίζουν. Από την μία, είναι λογικό να μην γνωρίζει κάποιος μια συμφωνία, η οποία υπεγράφη κάποιους μήνες νωρίτερα, από την άλλη, όμως, είναι σημαντικό να υπάρχει ενημέρωση. Σε αυτή την περίπτωση, παρόλο που οι κάτοικοι των περιοχών στις οποίες διεξήχθη η έρευνα πρόκειται να επηρεαστούν σε μεγάλο βαθμό από αυτή τη συμφωνία, δεν ήταν επαρκώς ενημερωμένοι. Αυτό έχει ως συνέπεια, όταν φτάσει η στιγμή των πρακτικών αλλαγών, να υπάρξουν αντιδράσεις από την κοινότητα, να εκφραστεί φόβος και ανασφάλεια σχετικά με το μέλλον.

Αυτό φαίνεται και στις απαντήσεις της επόμενης ερώτησης. Όταν έγινε σαφές ότι η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία και ο Ευρωπαϊκός νόμος για το κλίμα στοχεύουν στην απαγόρευση χρήσης του λιγνίτη ως μέσο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, οι περισσότεροι (56%) απάντησαν πως «ΝΑΙ» πιστεύουν ότι θα μπορούσε να είναι εφικτό κάτι τέτοιο στην Ελλάδα. Η γνώση και η σωστή ενημέρωση φάνηκε να αλλάζουν την άποψη μερικών ατόμων. Ωστόσο, υπάρχει ένα μεγάλο αίσθημα ανασφάλειας (68,7%) σχετικά με την άμεση εφαρμογή των μέτρων της Ε.Ε. και της Ελληνικής κυβέρνησης.

Οι επόμενες ερωτήσεις είχαν σκοπό να αποσαφηνίσουν την άποψη των ερωτηθέντων σχετικά με την απολιγνιτοποίηση. Οι περισσότεροι από αυτούς, με ποσοστό 81,3% εξέφρασαν την ανησυχία τους πως θα μειωθούν οι θέσεις εργασίας (βλ. Εικόνα 2). Παρόμοια έρευνα που διεξήχθη στη Γερμανία, αποδεικνύει πως η διαδικασία απολιγνιτοποίησης που έχει ήδη τεθεί σε εφαρμογή και υπολογίζεται να ολοκληρωθεί μέχρι το 2038, πρόκειται να οδηγείται σε αύξηση της ανεργίας, στη μείωση του εισοδήματος και στην πιθανή αναγκαστική μετοίκηση των πληθυσμών που ως σήμερα ζούσαν από το λιγνίτη. [5]

Αμέσως μετά, το 77,3% των ερωτηθέντων δήλωσε οικονομική ανασφάλεια. Είναι θετικό, όμως, πως ένα αρκετά ικανοποιητικό ποσοστό (65,3%) αναγνωρίζει πως με την επερχόμενη απολιγνιτοποίηση θα υπάρξει μείωση των περιβαλλοντικών προβλημάτων, αλλά και μείωση των προβλημάτων υγείας (59,3%). Φαίνεται πως η απολιγνιτοποίηση ως έννοια και ως κατάσταση φοβίζει τους κατοίκους και τους εργαζομένους των λιγνιτικών περιοχών, ωστόσο είναι καθησυχαστικό πως αναγνωρίζουν και οι ίδιοι ότι θα αποφέρει κάποια πλεονεκτήματα στις περιοχές αυτές.



Εικόνα 2: Πρόβλεψη επιπτώσεων από την απολιγνιτοποίηση.

Όσον αφορά στην ερώτηση για το αν είναι όντως η κατάλληλη περίοδος να στραφεί η χώρα σε εναλλακτικές πηγές ενέργειας, όπως είναι οι Α.Π.Ε., το 70,7% φάνηκε να συμφωνεί (βλ. Εικόνα 3). Βέβαια, στην ερώτηση σχετικά με την προθυμία των κατοίκων για την κατασκευή ηλεκτροπαραγωγικών μονάδων, όπως ανεμογεννήτριες ή φωτοβολταϊκά, κοντά στον τόπο κατοικίας τους, οι απόψεις διίσταντο, ωστόσο τα αποτελέσματα δεν είναι τελείως αποθαρρυντικά. Ένα μεγάλο ποσοστό 34,7% δήλωσε πως θα ήταν πολύ πρόθυμο. Ενώ, ένα εξίσου σημαντικό ποσοστό 24% δήλωσε αβεβαιότητα. Ίσως, να χρειάζονται περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τις νέες μονάδες, όπως είναι η απόσταση από τον οικισμό ή το πόσο αποδοτικές θα είναι τελικά.

Εικόνα 3: Καταλληλόλητα περιόδου για τη στροφή της χώρας στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.

Όσον αφορά στην άποψη των ερωτηθέντων σχετικά με την επαναχρησιμοποίηση των λιγνιτικών εργοστασίων, οι περισσότεροι, το 46% των ερωτηθέντων, φάνηκαν να πιστεύουν σε μεγάλο βαθμό πως οι εγκαταστάσεις αυτές μπορούν να μετατραπούν σε χώρους πολιτισμού. Μάλιστα, η συντριπτική πλειοψηφία τόνισε πως πράγματι κάτι τέτοιο θα απέφερε οικονομικό και κοινωνικό όφελος στην περιοχή (βλ. Εικόνα 4). Γενικότερα, παρατηρείται μια τάση προσαρμογής, και όχι μια έντονη αρνητικότητα. Ένας χώρος, ο οποίος μπορεί να έχει τελικά όφελος για την κοινωνία, αντιμετωπίζεται θετικά.

Παρόμοια έρευνα που διεξήχθη από άλλη ερευνητική ομάδα [6] στην περιοχή της Δυτικής Μακεδονίας, απέδειξε ακριβώς αυτό. Οι κάτοικοι τείνουν να συμφωνούν με το ενδεχόμενο δημιουργίας νέων εγκαταστάσεων στις λιγνιτικές περιοχές [6]. Προσπαθώντας να προβούμε σε μια σύγκριση των δύο ερευνητικών ερωτημάτων, αν και η φύση της ερώτησης είναι διαφορετική, μπορεί κανείς να αντιληφθεί πως η άποψη ότι οι κάτοικοι είναι θετικοί στην επαναχρησιμοποίηση των λιγνιτικών εγκαταστάσεων και στη δημιουργία νέων δομών.

Εικόνα 4: Αντίληψη για το αντίκτυπο της επανάχρησης των λιγνιτικών εργοστασίων.

Οι δύο τελευταίες ερωτήσεις είχαν να κάνουν σχετικά με την τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος κατά τη νέα εποχή, μετά το λιγνίτη δηλαδή. Οι περισσότεροι (68,7%), εξέφρασαν το φόβο τους πως το ρεύμα θα έχει υψηλότερο κόστος, στο μέλλον (βλ. Εικόνα 5).

Αυτό ακριβώς εκφράστηκε και στην επόμενη ερώτηση σχετικά με την προθυμία τους να πληρώνουν κάτι παραπάνω για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Το 26,7% δήλωσε ότι δεν είναι καθόλου πρόθυμο να δαπανά περισσότερα χρήματα για το ρεύμα. Παράλληλα, οι περισσότερο διστακτικοί ανήκαν στο 22%, ενώ το 24% δήλωσε πολύ πρόθυμο (βλ. Εικόνα 6).

Εικόνα 5: Αντίληψη για την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας μετά την απολιγνιτοποίηση.

Παρατηρείται εδώ μια διαφορά στη γνώμη των ερωτηθέντων. Τα τρία αυτά ποσοστά σχεδόν συγκλίνουν, κάτι που σημαίνει ότι ο κόσμος δεν είναι ακόμα βέβαιος για το αν θα είναι σε θέση να πληρώσει παραπάνω χρήματα για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Μπορεί να υποθέσει κανείς πως σημαντικό ρόλο σε αυτή την απόφαση είναι το «πόσο περισσότερο» θα κληθεί κανείς να πληρώσει. Πάντως, οι μεταβλητές του περιβάλλοντος και της ανθρώπινης υγείας φάνηκε να επηρέασαν την απόφαση των συμμετεχόντων.

Εικόνα 6: Προθυμία πληρωμής επιπλέον τιμής για την ηλεκτρική ενέργεια.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα μέχρι τώρα δεδομένα αποδεικνύουν πως οι κάτοικοι των περιοχών έχουν μάθει να ζουν υπό τις συνθήκες του λιγνίτη. Το ορυκτό έχει δημιουργήσει θέσεις εργασίας, έχει συμβάλλει στην οικονομική ανάπτυξη της περιοχής, έχει στηρίξει την κοινωνία, αλλά ταυτόχρονα έχει προκαλέσει την μετεγκατάσταση πληθυσμών, έχει καταστρέψει το φυσικό περιβάλλον. Σε κάθε περίπτωση, ο λιγνίτης αποτελούσε μέχρι σήμερα αναπόσπαστο κομμάτι των περιοχών και επομένως η μετάβαση σε μια άλλη εποχή προκαλεί αντιδράσεις.

Το αβέβαιο μέλλον που σηματοδοτεί η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία σχετικά με το λιγνίτη είναι απολύτως λογικό και αναμενόμενο. Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή θέτει τους στόχους και τα κράτη μέλη, ακολουθώντας τις οδηγίες της, λαμβάνουν νέα μέτρα και αποφάσεις σε εθνικό επίπεδο. Η ελληνική κυβέρνηση αντέδρασε ουσιαστικά στο ζήτημα με την υιοθέτηση του Σ.Δ.Α.Μ. και στο μέλλον θα παρθούν σίγουρα νέες αποφάσεις. Είναι δεδομένο ότι η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία πρόκειται να επηρεάσει την Ελλάδα, όπως και όλες τις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Ωστόσο, για την Ελλάδα ξεκινά μια νέα ενεργειακή εποχή. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το λιγνίτη θα σταματήσει στη χώρα μέχρι το 2023, ή έστω μέχρι το 2028. Είναι αρκετά σύντομο χρονικό διάστημα για μπορέσει κανείς να μιλήσει με ακρίβεια για μια ομαλή ενεργειακή μετάβαση. Οι περιοχές που πρόκειται να επηρεαστούν περισσότερο είναι η Δυτική Μακεδονία και η Μεγαλόπολη. Αυτές οι περιοχές θα βρεθούν στο επίκεντρο τόσο των νέων επενδυτών όσο και της ελληνικής κυβέρνησης με διαφορετικό τρόπο. Οι επενδυτές θα προσπαθήσουν να στραφούν προς πράσινες μορφές ενέργειας, ενώ η κυβέρνηση καλείται να παίξει βοηθητικό ρόλο, ώστε να εξασφαλίσει πως θα υπάρξει μια δίκαιη διαδικασία μετάβασης.

Το Σ.Δ.Α.Μ. φαίνεται να παρουσιάζει ένα ολοκληρωμένο πλάνο, ωστόσο πρέπει να ληφθούν σημαντικά υπόψη τα χαρακτηριστικά κάθε περιοχής ξεχωριστά. Επιπλέον, οι νέες μορφές ενέργειας που φαίνεται πως θα υιοθετηθούν, όπως είναι οι Α.Π.Ε. ή το υδρογόνο, πρέπει να είναι ασφαλείς και αποδοτικές.

Τέλος, από τα αποτελέσματα του ερωτηματολογίου συμπεραίνεται ότι υπάρχει φόβος και ανασφάλεια για τη νέα εποχή. Είναι μια πραγματικότητα που δεν μπορεί να αμφισβητηθεί. Ο φόβος για το καινούριο και το διαφορετικό είναι στη φύση του ανθρώπου και έχει αποδειχθεί από έρευνες που αφορούν την ψυχοσύνθεση του ατόμου. Όσα κίνητρα και αν υπάρχουν, αν δεν υπάρχει σωστή πληροφόρηση σχετικά με το «πώς θα γίνει, γιατί θα γίνει, τι θα κερδίσει ο τόπος» δεν πρόκειται να είναι σύμφωνοι όλοι οι κάτοικοι. Πρέπει, επίσης, να ληφθεί υπόψη πως ένα μεγάλο ποσοστό από εκείνους έχασε τη δουλειά του, οπότε είναι φυσικό επόμενο οι κάτοικοι να μην είναι ούτε αισιόδοξοι ούτε δεκτικοί στην αλλαγή. Αποδείχτηκε μεν ότι δεν είναι τόσο πρόθυμοι για τη δημιουργία εγκαταστάσεων νέων πηγών ενέργειας, αντιλαμβάνονται δε πως ο λιγνίτης έχει επιφέρει σοβαρές αρνητικές επιπτώσεις τόσο σε εκείνους τους ίδιους, όσο και στον περιβάλλον χώρο.

Όσον αφορά σε σχετικές προτάσεις βελτίωσης, είναι πολύ νωρίς για να μπορέσει κανείς να αξιολογήσει πλήρως την κατάσταση και να σχηματίσει αξιόλογες προτάσεις. Άλλωστε, η απολιγνιτοποίηση βρίσκεται ακόμα σε πρωταρχικό στάδιο και για αυτό αξίζει να παρατηρήσουμε την εξέλιξή της.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] A European Green Deal, striving to be the first climate neutral. Ανακτήθηκε 7/1/2021, https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en

[2] A European Green Deal, striving to be the first climate-neutral continentΕλληνική Δημοκρατία, Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. (2019). Εθνικό σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα. Αθήνα. Ανακτήθηκε 7/1/2021, http://www.opengov.gr/minenv/?p=10155

[3] Σχέδιο Δίκαιης Αναπτυξιακής Μετάβασης. Ανακτήθηκε 7/1/2021, https://www.sdam.gr/el/node/143

[4] Κουτζή Γαρυφαλλιά (2020). Η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία του Δεκεμβρίου του 2019 και η περίπτωση του λιγνίτη στην Ελλάδα. Διπλωματική εργασία, Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών "Βιώσιμη Ανάπτυξη", Τμήμα Οικονομίας και Βιώσιμης Ανάπτυξης, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο. Ανακτήθηκε 7/1/2021, http://dl-db.hua.gr/browse/24050

[5] Heinisch, K., Holtemöller, O., Schult, C., J. (2021). Power generation and structural change: Quantifying economic effects of the coal phase-out in Germany. Energy Economics, 95, https://doi.org/10.1016/j.eneco.2020.105008

[6] Karasmanaki, E., Ioannou, K., Katsaounis, K., Tsantopoulos, G. (2020). The attitude of the local community towards investments in lignite before transitioning to the post-lignite era: The case of Western Macedonia, Greece. Resources Policy, 68, https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101781

ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ ΠΟΥ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΖΟΥΝ ΤΗΝ ΚΟΙΝΩΝΙΚΗ ΑΠΟΔΟΧΗ ΤΩΝ ΥΠΟΔΟΜΩΝ ΔΕΣΜΕΥΣΗΣ, ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΚΑΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ CO_2 ΣΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΟΥ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟΥ ΕΡΓΟΥ MOF4AIR

Σ. Καρύτσας[1*], Ο. Πολύζου[2], Θ. Ι. Οικονόμου[2], Κ. Καρύτσας[2]

[1*] Τμήμα Γεωθερμικής Ενέργειας, Διεύθυνση ΑΠΕ, ΚΑΠΕ
190 09 Πικέρμι, e-mail: spkary@cres.gr
[2] Τμήμα Γεωθερμικής Ενέργειας, Διεύθυνση ΑΠΕ, ΚΑΠΕ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η Δέσμευση και Αποθήκευση Άνθρακα (CCS – Carbon Capture and Storage) αφορά τη δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) από διεργασίες παραγωγής ενέργειας ή βαριάς βιομηχανίας και ανακατεύθυνσή του σε δομές μακροχρόνιας γεωλογικής αποθήκευσης (π.χ. εξαντλημένα κοιτάσματα πετρελαίου ή αλατούχους υδροταμιευτήρες). Με αυτό τον τρόπο, το CCS μπορεί να συμβάλλει στις παγκόσμιες προσπάθειες καταπολέμησης της κλιματικής αλλαγής. Ωστόσο, παραμένει μια αμφιλεγόμενη τεχνολογία η οποία συχνά αντιμετωπίζει δημόσια αντίσταση ως προς την αποδοχή συγκεκριμένων έργων. Δεν πρέπει, λοιπόν, να παραγνωρισθεί το γεγονός ότι η κοινωνική αποδοχή του CCS είναι μια απαραίτητη προϋπόθεση για την περαιτέρω ανάπτυξη και διάδοση της εν λόγω τεχνολογίας.

Σε αυτό το πλαίσιο, το ευρωπαϊκό έργο MOF4AIR (Metal Organic Frameworks for Carbon Dioxide Adsorption in Power Production and Energy Intensive Industries), το οποίο στοχεύει στην ανάδειξη των αποδόσεων των τεχνολογιών δέσμευσης CO_2 που βασίζονται σε MOF (Metal Organic Frameworks – Μεταλλικά Οργανικά Πλέγματα), περιλαμβάνει συγκεκριμένες δραστηριότητες σχετικά με τη μελέτη των κοινωνικών θεμάτων που άπτονται του CCS.

Η παρούσα εργασία, λοιπόν, παρουσιάζει τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει κατά τα αρχικά στάδια αυτών των δραστηριοτήτων. Βάσει της βιβλιογραφικής ανασκόπησης που πραγματοποιήθηκε, εντοπίσθηκαν οι παράγοντες που επηρεάζουν την κοινωνική αποδοχή του CCS, καθώς και οι σχέσεις μεταξύ τους. Εντοπίσθηκε πλήθος παραγόντων που επηρεάζουν την κοινωνική αποδοχή είτε άμεσα είτε έμμεσα, με αυτούς που συναντώνται πιο συχνά στην βιβλιογραφία να είναι οι αντιληπτοί κίνδυνοι και οφέλη, η εμπιστοσύνη προς τους εμπλεκόμενους φορείς, καθώς και η γνώση επί σχετικών ζητημάτων. Στη συνέχεια, δημιουργήθηκε ερωτηματολόγιο με σκοπό την υλοποίηση ποσοτικής κοινωνικής έρευνας, η οποία θα πραγματοποιηθεί σε 7 ευρωπαϊκά κράτη. Η δημιουργία του ερωτηματολογίου βασίστηκε στη βιβλιογραφική ανασκόπηση και τον καθορισμό των ερευνητικών κενών που υπάρχουν στις υφιστάμενες έρευνες.

Τα αποτελέσματα που θα προκύψουν από τη συγκεκριμένη ποσοτική έρευνα, σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα που θα προκύψουν από συνεντεύξεις που θα απευθύνονται σε στοχευμένους εμπλεκόμενους φορείς θα αξιοποιηθούν για την ανάπτυξη σεναρίων δημόσιας δέσμευσης (public engagement scenarios).

Λέξεις Κλειδιά: *CCS, διοξείδιο του άνθρακα, δέσμευση, αποθήκευση, κοινωνική αποδοχή*

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ηλεκτροπαραγωγή και οι βιομηχανίες υψηλής έντασης ενέργειας (για παράδειγμα βιομηχανίες τσιμέντου, χάλυβα, πετροχημικών προϊόντων) ευθύνονται για το μεγαλύτερο μέρος των εκπομπών CO_2. Εκτός από τον περιορισμό των ανθρωπογενών εκπομπών CO_2, η δέσμευση, μεταφορά και αποθήκευση του άνθρακα (CCS - Carbon Capture and Storage), αποτελεί μία από τις λίγες τεχνολογικές λύσεις που μπορεί να μειώσει σημαντικά τις εκπομπές από τις προαναφερόμενες βιομηχανικές διεργασίες (οι οποίες είναι καθοριστικής σημασίας για τη σύγχρονη κοινωνία), καθώς και από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από άνθρακα και φυσικό αέριο, επιτυγχάνοντας σημαντικές μειώσεις αέριων εκπομπών, και δίνοντας τη δυνατότητα αξιοποίησης του παραγόμενου CO_2 για αποθήκευση, ή ακόμη και για χρήση –αναφερόμενοι σε αυτήν την περίπτωση σε CCUS (Carbon Capture Utilization and Storage).

Η στροφή προς μία οικονομία χαμηλών εκπομπών άνθρακα απαιτεί την ανάπτυξη, δοκιμή και υλοποίηση οικονομικώς αποδοτικών λύσεων δέσμευσης άνθρακα. Η πιο ώριμη τεχνολογία, η δέσμευση CO_2 μετά την καύση με καθαρισμό αμίνης, δεν προσφέρει επαρκείς αποδόσεις. Διάφορες τεχνολογίες διαφορετικών επιπέδων ωριμότητας και αποδόσεων είναι διαθέσιμες για τη δέσμευση του CO_2 (π.χ. καύση με οξυγόνο, τεχνολογία ψύξης αμμωνίας, προσροφητικές διεργασίες, βρόχος ασβεστίου κ.λπ.). Οι διαδικασίες προσρόφησης αποτελούν υποσχόμενες εναλλακτικές λύσεις για τη δέσμευση CO_2 από μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και άλλες βιομηχανίες υψηλής έντασης ενέργειας.

Από την άποψη αυτή, τα μεταλλικά οργανικά πλέγματα (MOFs – Metal Organic Frameworks) είναι μια ευρέως μελετημένη κατηγορία πορωδών προσροφητικών ουσιών που προσφέρουν τεράστιες δυνατότητες, λόγω της μεγάλης τους ικανότητας προσρόφησης CO_2 και της συγγένειας τους με το CO_2. Ωστόσο, οι αποδόσεις των τεχνολογιών δέσμευσης άνθρακα που βασίζονται σε MOF δεν έχουν αξιολογηθεί πλήρως.

1.1 Το ευρωπαϊκό έργο MOF4AIR

Σχεδόν όλα τα σχέδια δράσης για το κλίμα ενσωματώνουν το CCS στο ισοζύγιο, ωστόσο η έρευνα και η καινοτομία εξακολουθούν να είναι άκρως απαραίτητες προκειμένου να καταστούν βιώσιμα αυτά τα σχέδια. Σε αυτό το πλαίσιο, ο βασικός σκοπός του ευρωπαϊκού έργου MOF4AIR (Metal Organic Frameworks for Carbon Dioxide Adsorption in Power Production and Energy Intensive Industries – Μεταλλικά Οργανικά Πλέγματα Προσρόφησης Διοξειδίου του Άνθρακα στην Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας και στις Βιομηχανίες Υψηλής Έντασης Ενέργειας) είναι να αναδείξει τις αποδόσεις των τεχνολογιών δέσμευσης CO_2 που βασίζονται σε MOF σε μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και βιομηχανίες υψηλής έντασης ενέργειας. Για τον σκοπό αυτό, το MOF4AIR θα παρουσιάσει βελτιστοποιημένα MOF βασισμένα σε υλικά προσρόφησης με μικρορυθμίσεις για την τελειοποίηση της διεργασίας προσρόφησης CO_2 μέσω μιας πολυεπιστημονικής προσέγγισης. Το έργο, υλοποιείται στο πλαίσιο Horizon 2020, έχει προϋπολογισμό άνω των 11 εκ. €, ξεκίνησε τον Ιούλιο του 2019, και αναμένεται να ολοκληρωθεί εντός του 2023.

Πιο συγκεκριμένα, οι κύριοι στόχοι του έργου MOF4AIR είναι:

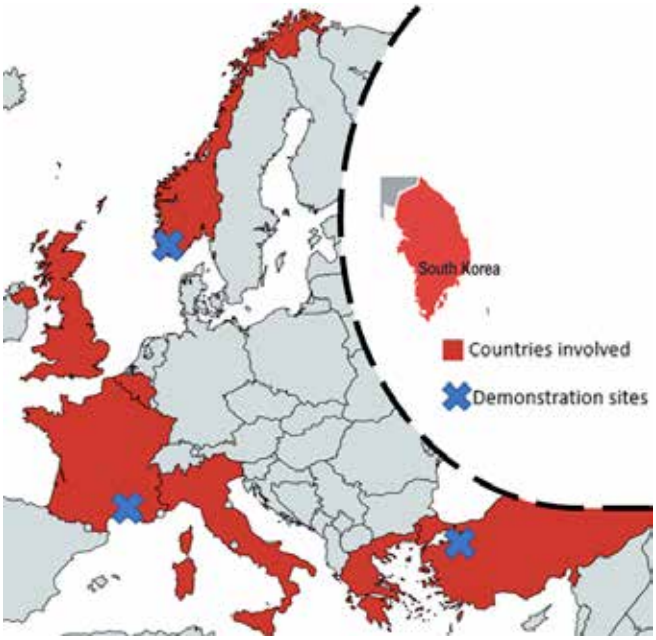
1. Αύξηση της αποτελεσματικότητας σε σχέση με το κόστος της δέσμευσης και αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα σε γεωλογικούς σχηματισμούς και μείωση του ενεργειακού τιμήματος.
2. Ποιοτικός προσδιορισμός και επικύρωση των κατάλληλων υλικών MOF για δέσμευση άνθρακα με προσρόφηση.
3. Μικρορυθμίσεις για την τελειοποίηση των διεργασιών προσρόφησης για MOF υψηλής απόδοσης.
4. Παρουσίαση της απόδοσης των MOF βασιζόμενο στην προσρόφηση άνθρακα σε πραγματική λειτουργία.
5. Εφαρμογή της τεχνολογίας σε άλλες βιομηχανίες υψηλής έντασης ενέργειας και εξασφάλιση της βιωσιμότητάς της.
6. Αύξηση της ευαισθητοποίησης των ενδιαφερόμενων μερών και του κοινού σχετικά με τις προκλήσεις, τα οφέλη και θέματα που σχετίζονται με τη δέσμευση, τη μεταφορά, τη χρήση και την αποθήκευση του διοξειδίου του άνθρακα.

Το έργο MOF4AIR, για τη διασφάλιση της επιτυχίας του, συγκεντρώνει 14 εταίρους από 8 χώρες της Ευρώπης και από την Ασία (βλ. Εικόνα 1) και ένα Συμβούλιο Βιομηχανικού Συνεργατικού Σχηματισμού (ICB - Industrial Cluster Board). Το Πανεπιστήμιο MONS από το Βέλγιο συντονίζει το

έργο, ως ερευνητικό κέντρο με μεγάλη εμπειρία όσον αφορά τη θεματική ενότητα MOF, καθώς και τις διάφορες διεργασίες δέσμευσης άνθρακα.

Στο έργο συμμετέχουν συνολικά 6 ερευνητικά κέντρα, τα οποία κατέχουν την απαραίτητη εμπειρία για την υλοποίηση του έργου, τρεις μικρομεσαίες επιχειρήσεις εξειδικευμένες στην παραγωγή MOFs και την διαμόρφωσή τους σε βιομηχανική κλίμακα, μία ένωση παραγωγής τσιμέντου, και μία μικρομεσαία επιχείρηση εξειδικευμένη σε θέματα επικοινωνίας και διάδοσης. Συγκεκριμένα, οι εταίροι του έργου είναι οι ακόλουθοι:

1. Πανεπιστήμιο του MONS (Συντονιστής του έργου) / Ερευνητικό κέντρο / Βέλγιο
2. SINTEF AS / Ερευνητικό κέντρο / Νορβηγία
3. Centre National De La Recherche Scientifique / Ερευνητικό κέντρο / Γαλλία
4. Politecnico di Milano (POLIMI) / Ερευνητικό κέντρο / Ιταλία
5. Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας / Ερευνητικό κέντρο / Ελλάδα
6. SiKEMIA / Μικρομεσαία επιχείρηση / Γαλλία
7. MOF Technologies Limited / Μικρομεσαία επιχείρηση / Ηνωμένο Βασίλειο
8. Korea Research Institute of Chemical Technology / Ερευνητικό κέντρο / N. Κορέα
9. ENGTECH CO LTD / Ερευνητικό κέντρο (Τελικός χρήστης) / N. Κορέα
10. Technology Centre Mongstad / Τελικός χρήστης / Νορβηγία
11. Solamat Merex / Τελικός χρήστης / Γαλλία
12. Türkiye Petrol Rafinerileri A.Ş. / Τελικός χρήστης / Τουρκία
13. Euroquality / Μικρομεσαία επιχείρηση / Γαλλία
14. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği / Ένωση παραγωγής τσιμέντου / Τουρκία



Εικόνα 1. Γεωγραφική κατανομή εταίρων του έργου MOF4AIR

Οι εταίροι του MOF4AIR φιλοδοξούν να προσφέρουν αποτελέσματα που θα έχουν μεγάλες δυνατότητες αναπαραγωγής σε άλλους κλάδους, προκειμένου να προάγουν τα αποτελέσματα του έργου τους. Η μελέτη δυνατότητας αναπαραγωγής του MOF4AIR σε άλλους κλάδους θα επιτευχθεί σε στενή συνεργασία με το Συμβούλιο Βιομηχανικού Συνεργατικού Σχηματισμού (ICB) του MOF4AIR. Το εν λόγω Συμβούλιο θα λειτουργεί σε συνέργεια με το MOF4AIR, έχοντας στόχευση σε πάνω από 10 διαφορετικούς τομείς (τσιμέντου, ασβεστόλιθου, ενέργειας, χημείας και πετροχημείας, αποτεφρωτών αποβλήτων κλπ.). Τα μέλη του ICB θα παρακολουθήσουν στενά τα αποτελέσματα του έργου, ιδίως όσον αφορά το κόστος των λύσεων δέσμευσης άνθρακα, και θα εξετάσουν με τους εταίρους του MOF4AIR την πιθανή εφαρμογή των λύσεων στις βιομηχανίες τους.

1.2 Δραστηριότητες του MOF4AIR

Το MOF4AIR είναι δομημένο σε 11 Πακέτα Εργασίας (ΠΕ). Αφού προσδιοριστούν τα καλύτερα MOF στο ΠΕ1 και επικυρωθούν μέσω δοκιμών (π.χ. ως προς τη σταθερότητα και την επιλεκτικότητα) στο ΠΕ2, τα πλέον υποσχόμενα MOF θα παραχθούν και θα διαμορφωθούν σε μεγαλύτερη κλίμακα στο ΠΕ3.

Στο ΠΕ4 θα διεξαχθούν προσομοιώσεις για τη μελέτη της συμπεριφοράς των MOF σε δύο διεργασίες προσρόφησης: VPSA (Vacuum Pressure Swing Adsorption) και MBTSA (Moving Bed Temperature Swing Adsorption) και θα γίνει βελτιστοποίησή τους. Και οι δύο λύσεις θα δοκιμαστούν σε εργαστηριακό επίπεδο στο ΠΕ5.

Στο ΠΕ6, 3 επιδεικτικά έργα στην Ευρώπη (βλ. Εικόνα 1: Γαλλία, Τουρκία, Νορβηγία) θα αποδείξουν την οικονομική αποδοτικότητα και την αξιοπιστία της δέσμευσης άνθρακα με χρήση MOF σε τομείς έντασης άνθρακα: μονάδες ηλεκτροπαραγωγής, διυλιστήρια και μονάδες αποτέφρωσης αποβλήτων.

Για να διασφαλιστεί η ευρεία διάδοση των λύσεων που αναπτύχθηκαν, το ΠΕ7 θα επικεντρωθεί σε νομοθετικά / κανονιστικά ζητήματα, τεχνικο-οικονομική ανάλυση και ανάλυση κύκλου ζωής, ενώ το ΠΕ8 στην κοινωνική αποδοχή και τη δυνατότητα αναπαραγωγής σε άλλους κλάδους.

Στο ΠΕ9 θα οργανωθούν όλες οι δραστηριότητες επικοινωνίας, διάδοσης και αξιοποίησης και στο ΠΕ10 θα διασφαλιστεί η απρόσκοπτη πρόοδος των δραστηριοτήτων κατά τη διάρκεια του έργου μέσω της κατάλληλης διαχείρισης. Τέλος, το ΠΕ11 θα επικεντρωθεί σε θέματα δεοντολογίας που άπτονται των δραστηριοτήτων του έργου.

2. ΚΟΙΝΩΝΙΚΗ ΑΠΟΔΟΧΗ ΤΩΝ ΥΠΟΔΟΜΩΝ ΔΕΣΜΕΥΣΗΣ, ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΚΑΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ CO_2

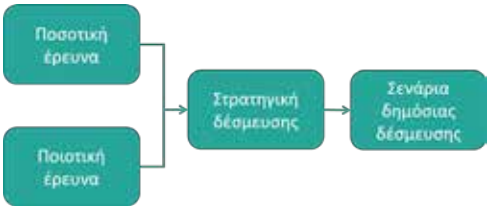
Η δέσμευση, μεταφορά και αποθήκευση CO_2 μπορεί να συμβάλλει στις παγκόσμιες προσπάθειες καταπολέμησης της κλιματικής αλλαγής. Ωστόσο, παραμένει μια αμφιλεγόμενη τεχνολογία η οποία συχνά αντιμετωπίζει δημόσια αντίσταση ως προς την αποδοχή συγκεκριμένων έργων. Δεν πρέπει, λοιπόν, να παραγνωρισθεί το γεγονός ότι η κοινωνική αποδοχή του CCS είναι μια απαραίτητη προϋπόθεση για την περαιτέρω ανάπτυξη και διάδοση της εν λόγω τεχνολογίας.

2.1 Μελέτη κοινωνικών θεμάτων σχετικά με τη δέσμευση, μεταφορά και αποθήκευση CO_2

Υπό αυτό το πρίσμα, το έργο MOF4AIR διερευνά το συγκεκριμένο ζήτημα μέσω του ΠΕ8, το οποίο περιλαμβάνει τη Δράση 8.1 «Μελέτη κοινωνικών θεμάτων σχετικά με τη δέσμευση, μεταφορά και αποθήκευση CO_2». Η δράση αυτή περιλαμβάνει μια ποσοτική κοινωνική έρευνα που στοχεύει στις τοπικές κοινότητες, με στόχο να μελετήσει τους παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν την κοινωνική αποδοχή των εγκαταστάσεων δέσμευσης, μεταφοράς και αποθήκευσης CO_2. Η έρευνα θα υλοποιηθεί σε όλες τις ευρωπαϊκές χώρες, οι οποίες εκπροσωπούνται στην κοινοπραξία του έργου. Επιπλέον, θα διεξαχθεί μια ποιοτική μελέτη (μέσω συνεντεύξεων) στοχεύοντας σε κυβερνητικούς εκπροσώπους και υπευθύνους υλοποίησης των έργων, έτσι ώστε να αποτυπωθούν οι διαφορετικές ερμηνείες και απόψεις τους σχετικά με τις τεχνολογίες CCS. Η ποιοτική μελέτη θα περιλαμβάνει την αξιολόγηση του κόστους, των τεχνικών απαιτήσεων και των επιπτώσεων της λειτουργίας και της ασφάλειας στις σχετικές υποδομές CCS, ως μέρος της ενσωμάτωσής τους σε ένα σύστημα υποδομών.

Βάσει των κοινωνικών ερευνών θα καθορισθεί μια στρατηγική σχετικά με τη δέσμευση των εμπλεκόμενων φορέων (stakeholder engagement strategy) όσον αφορά τις υπό σχεδιασμό δραστηριότητες, λαμβάνοντας υπόψη διάφορους παράγοντες, όπως θετικές και αρνητικές εξωτερικότητες, τη δημιουργία θέσεων εργασίας και την περιβαλλοντική βιωσιμότητα. Αυτή η

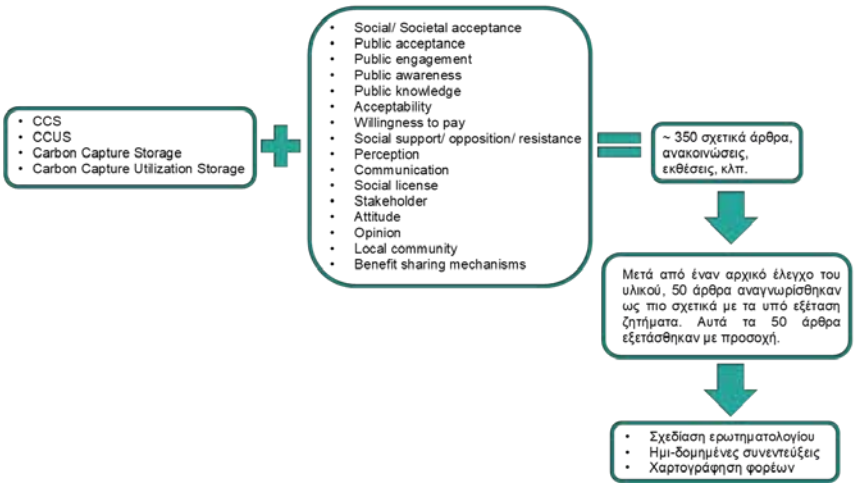
στρατηγική θα χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη σεναρίων δημόσιας δέσμευσης (public engagement[1]). Θα προταθούν συγκεκριμένες πρακτικές από την πλευρά των φορέων υλοποίησης και των διαχειριστών των έργων, καθώς και των δημόσιων αρχών, προκειμένου να συμβάλλουν στην κοινωνική αποδοχή αυτών των έργων. Η αλληλουχία των δραστηριοτήτων της Δράσης 8.1 απεικονίζονται διαγραμματικά στην Εικόνα 2.



Εικόνα 2. Δραστηριότητες Δράσης 8.1 - Μελέτη κοινωνικών θεμάτων σχετικά με το CCS

2.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Το πρώτο βήμα για τη διεξαγωγή της ποσοτικής κοινωνικής έρευνας ήταν η υλοποίηση βιβλιογραφικής ανασκόπησης έτσι ώστε να εντοπισθούν οι παράγοντες οι οποίοι έχουν βρεθεί να επηρεάζουν την κοινωνική αποδοχή των υποδομών CCS. Όπως αποτυπώνεται και στην Εικόνα 3, το αρχικό βήμα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης ήταν η εύρεση άρθρων, ανακοινώσεων, εκθέσεων κλπ., τα οποία να περιλαμβάνουν ένα συνδυασμό μεταξύ δυο ομάδων λέξεων (στα αγγλικά). Η 1η ομάδα περιλάμβανε τους όρους λέξεις «CCS, CCUS, δέσμευση και αποθήκευση διοξειδίου, δέσμευση, χρήση και αποθήκευση διοξειδίου». Η 2η ομάδα περιλάμβανε τους ακόλουθους όρους, σε ελεύθερη μετάφραση από τα αγγλικά: «κοινωνική αποδοχή, δημόσια αποδοχή, δημόσια δέσμευση, ενημέρωση του κοινού, αποδοχή, προθυμία επένδυσης, δημόσια υποστήριξη / εναντίωση / διαμαρτυρία, άποψη, επικοινωνία, “άδεια” λειτουργίας, εμπλεκόμενοι φορείς, στάση, τοπική κοινότητα, μηχανισμοί διαμοιρασμού των οφελών».



Εικόνα 3. Διαδικασία βιβλιογραφικής ανασκόπησης

[1] Ο όρος «public engagement» συνήθως αποδίδεται στα ελληνικά είτε ως «δημόσια δέσμευση», «δημόσια συμμετοχή» ή «δημόσια εμπλοκή», είτε ως «δέσμευση του κοινού», «συμμετοχή του κοινού», «εμπλοκή του κοινού».

Η αναζήτηση πραγματοποιήθηκε μέσω των διαδικτυακών πλατφορμών Scopus και Google Scholar, και αρχικά εντοπίσθηκαν περίπου 350 άρθρα, ανακοινώσεις και εκθέσεις, τα οποία να περιλαμβάνουν ένα συνδυασμό λέξεων, που να προέρχονται από τις δύο προαναφερθείσες ομάδες. Μετά από έναν αρχικό έλεγχο του υλικού, αναγνωρίσθηκαν περίπου 50 άρθρα (και λοιπά έγγραφα) τα οποία σχετίζονταν σε μεγαλύτερο βαθμό με την εξέταση της κοινωνικής αποδοχής των εγκαταστάσεων CCS, μέσω ποσοτικών κοινωνικών μελετών.

Τα άρθρα αυτά χρησιμοποιήθηκαν ώστε να εντοπισθούν οι παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν την κοινωνική αποδοχή των εγκαταστάσεων CCS, αλλά και να εντοπισθούν σχετικά ερευνητικά κενά (δηλ. ζητήματα που να μην έχουν μελετηθεί επαρκώς) στην αντίστοιχη βιβλιογραφία. Επιπλέον, τα άρθρα αυτά θα χρησιμοποιηθούν για την δημιουργία ενός πλαισίου ημι-δομημένων συνεντεύξεων, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί κατά τη φάση της ποιοτικής έρευνας που θα στοχεύει σε κυβερνητικούς εκπροσώπους και υπευθύνους υλοποίησης των έργων, αλλά και για τη χαρτογράφηση των σχετικών εμπλεκόμενων φορέων.

2.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την κοινωνική αποδοχή των υποδομών δέσμευσης, μεταφοράς και αποθήκευσης CO_2

Στην Εικόνα 4 παρουσιάζονται οι παράγοντες που βρέθηκαν να επηρεάζουν την κοινωνική αποδοχή - είτε γενική, είτε τοπική - των υποδομών δέσμευσης, μεταφοράς και αποθήκευσης CO_2. Οι αντιληπτοί κίνδυνοι και οφέλη είναι οι παράγοντες που έχουν συνδεθεί πιο συχνά με την κοινωνική αποδοχή του CCS [1][2]. Οι αντιληπτοί κίνδυνοι και οφέλη έχει βρεθεί ότι επηρεάζονται με τη σειρά τους από ένα πλήθος παραγόντων, μεταξύ των οποίων τα επίπεδα γνώσης, την εμπιστοσύνη, το ενεργειακό μείγμα της χώρας, και τους προβληματισμούς σχετικά με την βιωσιμότητα των υποδομών CCS [2][3]. Επίσης, έχει βρεθεί συσχέτιση μεταξύ του επιπέδου των αντιληπτών κινδύνων με τα αντιληπτά οφέλη [3]. Να αναφερθεί ακόμη, ότι σύμφωνα με την έρευνα των Arning et al. [4], τα αντιληπτά οφέλη και κίνδυνοι κάθε διαφορετικού σταδίου του CCS (δέσμευση, μεταφορά, αποθήκευση) μπορεί να ασκούν διαφορετική επίδραση στην τελική κοινωνική αποδοχή.

Ένας ακόμη βασικός παράγοντας που επηρεάζει την αποδοχή, και έχει μελετηθεί σε σημαντικό βαθμό σε προηγούμενες μελέτες, είναι η εμπιστοσύνη προς τους διαφορετικούς εμπλεκόμενους φορείς (ΜΚΟ, βιομηχανίες, ερευνητικούς φορείς, κυβερνητικούς φορείς). Η εμπιστοσύνη μπορεί να επηρεάζει την αποδοχή είτε άμεσα, είτε μέσω των αντιληπτών κινδύνων και οφελών [5], ενώ έχει αναφερθεί επίσης ότι η εμπιστοσύνη επηρεάζει τα αντιληπτά οφέλη και κινδύνους μέσω των θετικών και αρνητικών συναισθημάτων που μπορεί να δημιουργούνται [6][7]. Να σημειωθεί, ακόμη, ότι τα συναισθήματα μπορεί επίσης να επηρεάζουν άμεσα την αποδοχή, και όχι μόνο διαμέσου των αντιληπτών κινδύνων και οφελών [7]. Με τη σειρά της, η εμπιστοσύνη μπορεί να επηρεαστεί από τα αντιληπτά κίνητρα και ικανότητες του κάθε φορέα [8]. Επιπλέον, οι αντιληπτές ομοιότητες μεταξύ του ατόμου και του φορέα μπορεί να επηρεάζουν την εμπιστοσύνη είτε απευθείας, είτε μέσω των αντιληπτών κινήτρων και ικανοτήτων [6].

Άλλοι παράγοντες που έχουν ληφθεί υπόψη σε αρκετές περιπτώσεις, όσον αφορά είτε την άμεση, είτε την έμμεση (π.χ. μέσω των αντιληπτών κινδύνων και οφελών), επίδραση στην κοινωνική αποδοχή είναι οι γνώσεις σχετικά με το CO_2, το CCS και την κλιματική αλλαγή [1][9][10][11], οι ανησυχίες / απόψεις σχετικά με την κλιματική αλλαγή [1][9][12][13], καθώς και η περιβαλλοντική συμπεριφορά / συνείδηση [13][14][15]. Επιπλέον, η επίδραση ορισμένων παραγόντων προς την κοινωνική αποδοχή έχει μελετηθεί σε μικρότερο βαθμό, όπως η στάση έναντι της τεχνολογίας γενικότερα [13], οι αξίες που οδηγούν ένα άτομο στη ζωή του (π.χ. εγωιστικά κίνητρα, αλτρουιστικά κίνητρα) [16][17] και η σύνδεση με τον τόπο [12][13][18]. Η υφιστάμενη εμπειρία σε σχετικά ζητήματα (π.χ. μέσω σχετικής εργασίας, ή εγγύτητας σε αντίστοιχες υποδομές) είναι ένας ακόμη παράγοντας ο οποίος έχει βρεθεί να επηρεάζει την κοινωνική αποδοχή, είτε άμεσα, είτε έμμεσα μέσω της επίδρασης που μπορεί να ασκήσει στα επίπεδα γνώσης ή στους αντιληπτούς κινδύνους και οφέλη [2][13][16].

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα ερευνών που αφορούν την αποδοχή των ενεργειακών / περιβαλλοντικών έργων γενικότερα, η δικαιοσύνη (όσον αφορά τη λήψη των αποφάσεων και την κατανομή των αποτελεσμάτων) και οι δράσεις δημόσιας δέσμευσης είναι δυο ακόμη παράγοντες οι οποίοι μπορούν να επηρεάσουν την κοινωνική αποδοχή είτε άμεσα, είτε έμμεσα (π.χ. μέσω εμπιστοσύνης, αντιληπτών κινδύνων και οφελών) [2][19][20][21][22]. Παρόλα αυτά, ο ρόλος τους δεν έχει μελετηθεί επαρκώς όσον αφορά την αποδοχή του CCS. Έτσι, ναι μεν περιλαμβάνονται στο υπόδειγμα που παρουσιάζεται στην Εικόνα 4, αλλά καθώς η επίδρασή τους δεν είναι επιβεβαιωμένη (στα πλαίσια του CCS) οι συσχετίσεις τους εμφανίζονται με διακεκομμένες γραμμές.

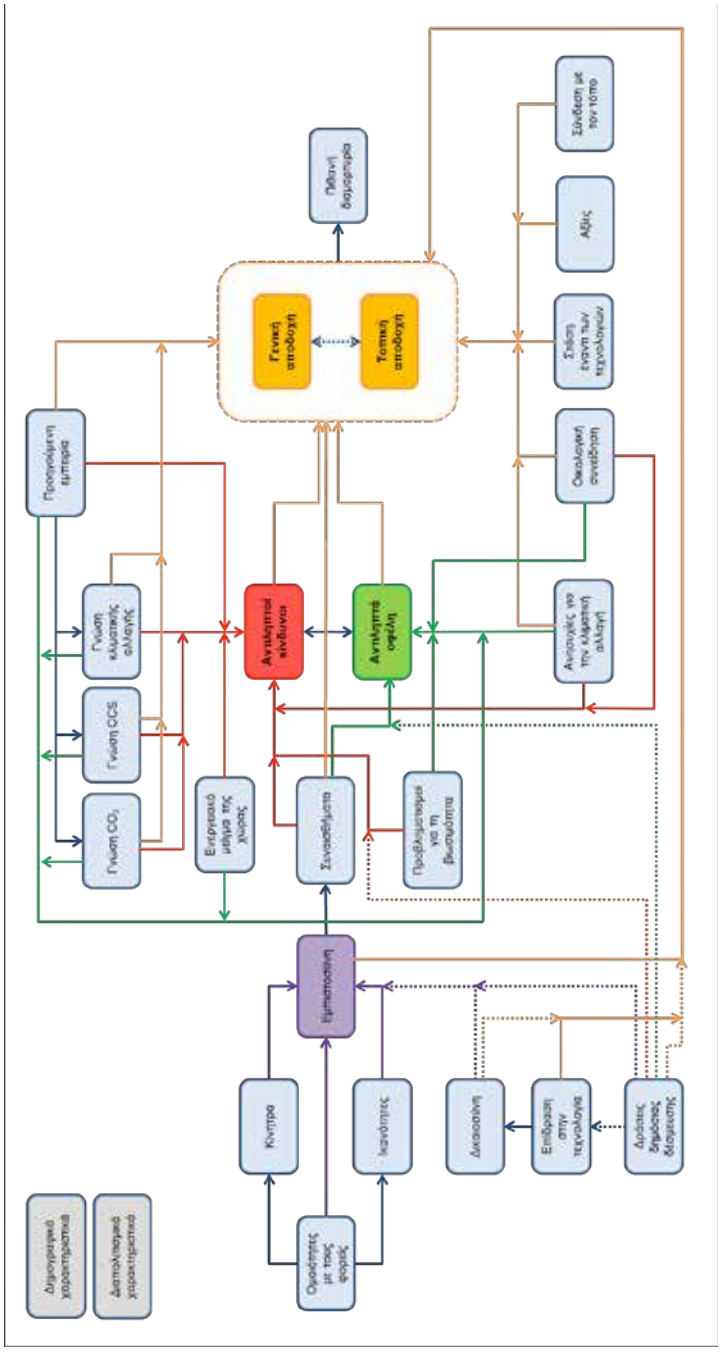
Οι κοινωνικοοικονομικοί παράγοντες και τα δημογραφικά χαρακτηριστικά (π.χ. μορφωτικό επίπεδο, ηλικία, φύλο) μπορούν να επηρεάζουν τα αντιληπτά οφέλη και κινδύνους που σχετίζονται με το CCS [10] καθώς επίσης και την αποδοχή του CCS [9][13][17]. Σε αυτό το πλαίσιο, να σημειωθεί επίσης ότι και τα διαπολιτισμικά χαρακτηριστικά τα οποία διαφέρουν μεταξύ των χωρών, μπορούν να επηρεάζουν τα αντιληπτά οφέλη και κινδύνους που σχετίζονται με το CCS. Οι Karimi και Toikka [10][11] μελέτησαν το πως τα χαρακτηριστικά αυτά μπορεί να διαφοροποιούν τις απόψεις των πολιτών σε διαφορετικές χώρες, χρησιμοποιώντας τις διαπολιτισμικές διαστάσεις του Hofstede (Hofstede's Cross-Cultural Dimensions).

Να αναφερθεί, τέλος, ότι πέρα από την εξέταση της κοινωνικής αποδοχής, είτε γενικής, είτε τοπικής, έχουν εξετασθεί σε περιορισμένο βαθμό οι παράγοντες οι οποίοι μπορούν να επηρεάσουν την ύπαρξη πιθανών διαμαρτυριών από τους τοπικούς κατοίκους. Στους παράγοντες αυτούς περιλαμβάνονται η εμπιστοσύνη, τα αντιληπτά οφέλη και οι αντιληπτοί κίνδυνοι [23][24].

2.4 Καινοτομίες της παρούσας ποσοτικής κοινωνικής έρευνας

Έχοντας πραγματοποιήσει τη βιβλιογραφική ανασκόπηση, και έχοντας καθορίσει τους παράγοντες που επιδρούν στην κοινωνική αποδοχή των υποδομών CCS, ήταν δυνατόν να εντοπισθούν τα ερευνητικά κενά σε σχέση με τα συγκεκριμένα ζητήματα, και επί αυτών να καθορισθούν τα συγκεκριμένα ερευνητικά ερωτήματα της παρούσας έρευνας. Έτσι, σε αυτό το πλαίσιο, τα καινοτόμα στοιχεία που στοχεύει να προσφέρει η παρούσα έρευνα – σε σχέση με τις αντίστοιχες υφιστάμενες έρευνες- είναι τα εξής:

- Πραγματοποίηση διακρατικής σύγκρισης, μέσω της εξέτασης της κοινωνικής αποδοχής του CCS σε 7 διαφορετικές χώρες. Να σημειωθεί ότι όσον αφορά το CCS έχουν πραγματοποιηθεί ελάχιστες έρευνες που να αφορούν περισσότερες από 1 χώρες (βλ. [13]), στοχεύοντας μάλιστα συνήθως στην μελέτη των αντιληπτών κινδύνων και οφελών, πάρα στην κοινωνική αποδοχή [10][11][25][26], ή στην εξέταση θεμάτων που αφορούν την ενημέρωση ή γενικότερες απόψεις [26][27].
- Σύγκριση των παραγόντων που επηρεάζουν τα διαφορετικά στάδια του CCS, δηλαδή ξεχωριστή ανάλυση και σύγκριση των φάσεων δέσμευσης, μεταφοράς και αποθήκευσης του CO_2. Να σημειωθεί ότι στο παρελθόν μια τέτοια ανάλυση έχει πραγματοποιηθεί σε ελάχιστες περιπτώσεις, και σε καμία περίπτωση συγκρίνοντας διαφορετικές χώρες. Οι Arning et al. [4] εξετάζουν ξεχωριστά τους αντιληπτούς κινδύνους στα διαφορετικά βήματα της διαδικασίας CCS (δέσμευση, μεταφορά, αποθήκευση) στη Γερμανία. Οι Dütschke al. [28] και Schumann al. [29] σε δύο έρευνες με κοινή βάση εξετάζουν το πως οι πολίτες αξιολογούν τις διαφορετικές επιλογές αποθήκευσης και μεταφοράς CO_2 στη Γερμανία. Επίσης, οι Guo et al. [30] εξετάζουν ξεχωριστά την αποδοχή των εγκαταστάσεων ξεχωριστά για δέσμευση, μεταφορά και αποθήκευση, χωρίς όμως να μελετούν εις βάθος τους παράγοντες που επηρεάζουν τις διαφορές μεταξύ των τριών σταδίων.
- Σύγκριση μεταξύ γενικής αποδοχής και τοπικής αποδοχής. Οι υφιστάμενες μελέτες εξετάζουν είτε την αποδοχή σε ένα γενικό κοινωνικο-πολιτικό επίπεδο, είτε την τοπική αποδοχή (βλ. [31], για ορισμό διαφορετικών επιπέδων κοινωνικής αποδοχής). Η μοναδική μελέτη που εντοπίσθηκε να λαμβάνει υπόψη τόσο την γενική, όσο και την τοπική αποδοχή, είναι αυτή των Arning et al. [4], όπου ουσιαστικά δεν πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ των δύο επιπέδων αποδοχής, αλλά η τοπική αποδοχή της επιλογής θέσης της εγκατάστασης θεωρείται προσδιοριστικός παράγοντας της γενικής αποδοχής. Έτσι, η παρούσα μελέτη στοχεύει στο να εξετάσει συγκριτικά τους παράγοντες που επηρεάζουν τα δύο επίπεδα κοινωνικής αποδοχής.
- Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη υποενότητα (2.3), ορισμένοι παράγοντες οι οποίοι έχουν βρεθεί να επηρεάζουν, είτε άμεσα είτε έμμεσα, την αποδοχή των ενεργειακών / περιβαλλοντικών έργων γενικότερα, δεν έχουν μελετηθεί επαρκώς σε σχέση με την κοινωνική αποδοχή του CCS. Η παρούσα έρευνα στοχεύει να καλύψει αυτό το κενό, μελετώντας τις επιδράσεις της δικαιοσύνης (όσον αφορά τις αποφάσεις και την κατανομή των αποτελεσμάτων) και των δράσεων δημόσιας δέσμευσης.
- Επιβεβαίωση του θεωρητικού υποδείγματος που αναπτύχθηκε και το οποίο παρουσιάζει όλες τις συσχετίσεις μεταξύ των σχετικών παραγόντων (βλ. Εικόνα 4), μέσω της άντλησης νέων εμπειρικών δεδομένων.



Εικόνα 4. Συσχετίσεις μεταξύ των παραγόντων που επηρεάζουν την κοινωνική αποδοχή του CCS

2.5 Δημιουργία ερωτηματολογίου και επόμενα βήματα

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα ανωτέρω, δημιουργήθηκε ερωτηματολόγιο το οποίο περιλαμβάνει τις ακόλουθες θεματικές ενότητες:

- Γνώση σχετικά με το CCS
- Γνώση σχετικά με την κλιματική αλλαγή και το CO_2
- Προηγούμενη σχετική εμπειρία
- Αντιληπτοί κίνδυνοι
- Αντιληπτά οφέλη
- Προβληματισμοί για τη βιωσιμότητα των εγκαταστάσεων CCS
- Εμπιστοσύνη προς τους εμπλεκόμενους φορείς
- Θετικά και αρνητικά συναισθήματα
- Προβληματισμοί σχετικά με την κλιματική αλλαγή
- Γενικότερη στάση έναντι της τεχνολογίας
- Αξίες (εγωιστικά κίνητρα, αλτρουιστικά κίνητρα)
- Ενδεχόμενη συμμετοχή σε δράσεις δημόσιας δέσμευσης
- Αντιληπτή δικαιοσύνη (αποφάσεων, κατανομής)
- Σύνδεση με τον τόπο
- Πρόθεση γενικής / τοπικής αποδοχής
- Δημογραφικά χαρακτηριστικά

Να σημειωθεί ότι μεταξύ της $1^{ης}$ (γνώση CCS) και της $2^{ης}$ ενότητας ερωτήσεων (γνώση κλιματικής αλλαγής και CO_2) υπάρχει επεξηγηματικό κείμενο το οποίο παρουσιάζει τις βασικές πληροφορίες σχετικά με το CCS. Οι πληροφορίες αυτές είναι όσο το δυνατόν πιο αντικειμενικές, και δίνονται σε εκείνο το σημείο του ερωτηματολογίου, ώστε να μην επηρεάσουν τις αρχικές απαντήσεις σχετικά με το επίπεδο ενημέρωσης για το CCS, αλλά να διευκολύνουν τους ερωτώμενους να απαντήσουν τις επακόλουθες ερωτήσεις. Οι πληροφορίες δίνονται, καθώς έχει παρατηρηθεί ότι το επίπεδο ενημέρωσης των απλών πολιτών είναι αρκετά χαμηλό όσον αφορά τη συγκεκριμένη τεχνολογία [32].

Τα επόμενα βήματα της έρευνας, τα οποία ακόμη δεν έχουν υλοποιηθεί, αφορούν αρχικά την διανομή του ερωτηματολογίου, η οποία θα πραγματοποιηθεί μέσω διαδικτυακής πλατφόρμας σε πολίτες 7 ευρωπαϊκών χωρών (όλες οι συμμετέχουσες χώρες στο έργο MOF4AIR, πλην της Ν. Κορέας). Θα ακολουθήσει η στατιστική ανάλυση των δεδομένων, τα οποία σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα της ποιοτικής έρευνας (συνεντεύξεις) θα αξιοποιηθούν για την ανάπτυξη της στρατηγικής δέσμευσης (engagement strategy) και των στοχευμένων σεναρίων δημόσιας δέσμευσης (public engagement scenarios) (βλ. Εικόνα 2).

3. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η τεχνολογία CCS, αν και μπορεί να συμβάλλει στις προσπάθειες που γίνονται σε παγκόσμιο επίπεδο για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής αντιμετωπίζει συχνά δημόσια αντίσταση ως προς την αποδοχή συγκεκριμένων έργων. Η κοινωνική αποδοχή θα πρέπει, λοιπόν, να λαμβάνεται υπόψη ως μια απαραίτητη προϋπόθεση για την περαιτέρω ανάπτυξη και διάδοση της τεχνολογίας αυτής. Σε αυτό το πλαίσιο, το ευρωπαϊκό έργο MOF4AIR, το οποίο στοχεύει στην ανάδειξη των αποδόσεων των τεχνολογιών δέσμευσης CO_2 που βασίζονται σε MOF σε μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και βιομηχανίες υψηλής έντασης ενέργειας, περιλαμβάνει συγκεκριμένες δραστηριότητες σχετικά με τη μελέτη των κοινωνικών θεμάτων που άπτονται του CCS.

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει κατά τα πρώτα βήματα των εν λόγω δραστηριοτήτων. Συγκεκριμένα, βάσει της βιβλιογραφικής ανασκόπησης που πραγματοποιήθηκε, εντοπίσθηκαν οι παράγοντες που επηρεάζουν την κοινωνική αποδοχή του CCS, καθώς και οι σχέσεις μεταξύ τους. Συνοπτικά, οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την κοινωνική

αποδοχή είναι οι αντιληπτοί κίνδυνοι και οφέλη, η εμπιστοσύνη προς τους εμπλεκόμενους φορείς, καθώς και η γνώση επί σχετικών ζητημάτων. Φυσικά, πλήθος άλλων παραγόντων βρέθηκαν να επηρεάζουν την αποδοχή, είτε άμεσα, είτε έμμεσα. Βάσει των αποτελεσμάτων της βιβλιογραφικής ανασκόπησης εντοπίσθηκαν τα κενά που υπάρχουν στην υφιστάμενη βιβλιογραφία, έτσι ώστε να αποτελέσουν αντικείμενα μελέτης της παρούσας έρευνας. Βασιζόμενοι στην βιβλιογραφική ανασκόπηση και τον καθορισμό των ελλείψεων που υπάρχουν στις έρευνες που έχουν γίνει μέχρι σήμερα, δημιουργήθηκε ερωτηματολόγιο με σκοπό την υλοποίηση ποσοτικής κοινωνικής έρευνας. Επόμενο βήμα της έρευνας είναι η διανομή του ερωτηματολογίου σε 7 ευρωπαϊκές χώρες. Τα αποτελέσματα που θα προκύψουν από τη συγκεκριμένη έρευνα, σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα που θα προκύψουν από συνεντεύξεις που θα απευθύνονται σε στοχευμένους εμπλεκόμενους φορείς θα χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία μιας στρατηγικής δέσμευσης (engagement strategy), η οποία θα οδηγήσει στην ανάπτυξη σεναρίων δημόσιας δέσμευσης (public engagement scenarios).

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Το έργο έχει λάβει χρηματοδότηση από το πρόγραμμα έρευνας και καινοτομίας της Ευρωπαϊκής Ένωσης Horizon 2020, βάσει της συμφωνίας επιχορήγησης αριθ. 837975.

Η παρούσα έρευνα αντικατοπτρίζει αποκλειστικά τις απόψεις των συγγραφέων και η Ευρωπαϊκή Ένωση δεν μπορεί να θεωρηθεί υπεύθυνη για οποιαδήποτε χρήση των πληροφοριών που περιέχονται σε αυτήν.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Kraeusel, J. and Möst, D., 2012, “Carbon Capture and Storage on its way to large-scale deployment: Social acceptance and willingness to pay in Germany”, Energy Policy, 49, pp.642-651.

[2] Selma, L., Seigo, O., Dohle, S. and Siegrist, M., 2014, “Public perception of carbon capture and storage (CCS): A review”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 38, pp.848-863.

[3] Seigo, S. L. O., Arvai, J., Dohle, S., & Siegrist, M., 2014, “Predictors of risk and benefit perception of carbon capture and storage (CCS) in regions with different stages of deployment”, International Journal of Greenhouse Gas Control, 25, 23-32.

[4] Arning, K., Offermann-van Heek, J., Linzenich, A., Kaetelhoen, A., Sternberg, A., Bardow, A., & Ziefle, M., 2019, “Same or different? Insights on public perception and acceptance of carbon capture and storage or utilization in Germany”, Energy Policy, 125, 235-249.

[5] Terwel, B. W., Harinck, F., Ellemers, N., & Daamen, D. D., 2011, “Going beyond the properties of CO2 capture and storage (CCS) technology: How trust in stakeholders affects public acceptance of CCS”, International Journal of Greenhouse Gas Control, 5(2), 181-188.

[6] Huijts, N. M., Midden, C. J., & Meijnders, A. L., 2007, “Social acceptance of carbon dioxide storage”, Energy Policy, 35(5), 2780-2789.

[7] Midden, C. J., & Huijts, N. M., 2009, “The role of trust in the affective evaluation of novel risks: The case of CO2 storage”, Risk Analysis: An International Journal, 29(5), 743-751.

[8] Terwel, B. W., Harinck, F., Ellemers, N., & Daamen, D. D., 2009, “How organizational motives and communications affect public trust in organizations: The case of carbon dioxide capture and storage”, Journal of Environmental Psychology, 29(2), 290-299.

[9] Duan, H., 2010, “The public perspective of carbon capture and storage for CO2 emission reductions in China”, Energy Policy, 38(9), 5281-5289.

[10] Karimi, F., & Toikka, A., 2014, “The relation between cultural structures and risk perception: How does social acceptance of carbon capture and storage emerge”, Energy Procedia, 63, 7087-7095.

[11] Karimi, F., & Toikka, A., 2018, “General public reactions to carbon capture and storage: Does culture matter?”, International Journal of Greenhouse Gas Control, 70, 193-201.

[12] Boyd, A. D., Hmielowski, J. D., & David, P., 2017, "Public perceptions of carbon capture and storage in Canada: Results of a national survey", International Journal of Greenhouse Gas Control, 67, 1-9.

[13] Whitmarsh, L., Xenias, D., & Jones, C. R., 2019, "Framing effects on public support for carbon capture and storage", Palgrave Communications, 5(1), 1-10.

[14] Palmgren, C. R., Morgan, M. G., Bruine de Bruin, W., & Keith, D. W., 2004, "Initial public perceptions of deep geological and oceanic disposal of carbon dioxide", Environmental Science & Technology, 38, 24, 6441–6450.

[15] Tokushige, K., Akimoto, K., & Tomoda, T., 2007, "Public perceptions on the acceptance of geological storage of carbon dioxide and information influencing the acceptance", International Journal of Greenhouse Gas Control, 1(1), 101-112.

[16] Carley, S. R., Krause, R. M., Warren, D. C., Rupp, J. A., & Graham, J. D., 2012, "Early public impressions of terrestrial carbon capture and storage in a coal-intensive state", Environmental Science & Technology, 46(13), 7086-7093.

[17] Braun, C., Merk, C., Pönitzsch, G., Rehdanz, K., & Schmidt, U., 2018, "Public perception of climate engineering and carbon capture and storage in Germany: survey evidence", Climate Policy, 18(4), 471-484.

[18] Xuan, Y., & Wang, Z., 2012, "Carbon capture and storage perceptions and acceptance: A survey of Chinese university students", International Proceedings of Computer Science Information Technology, 38(100), 1489-1499.

[19] Besley, J. C., 2010, "Public engagement and the impact of fairness perceptions on decision favorability and acceptance", Science Communication, 32(2), 256-280.

[20] Huijts, N. M., Molin, E. J., & Steg, L., 2012, "Psychological factors influencing sustainable energy technology acceptance: A review-based comprehensive framework", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(1), 525-531.

[21] Walker, C., & Baxter, J., 2017, "Procedural justice in Canadian wind energy development: a comparison of community-based and technocratic siting processes", Energy Research & Social Science, 29, 160-169.

[22] Mueller, C. E., & Keil, S. I., 2020, "Measuring perceived procedural fairness in the context of power grid expansion", International Journal of Energy Sector Management.

[23] Terwel, B. W., & Daamen, D. D., 2012, "Initial public reactions to carbon capture and storage (CCS): differentiating general and local views", Climate Policy, 12(3), 288-300.

[24] Wallquist, L., Visschers, V. H., Dohle, S., & Siegrist, M., 2012, "The role of convictions and trust for public protest potential in the case of carbon dioxide capture and storage (CCS)", Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 18(4), 919-932.

[25] Karimi, F., Toikka, A., & Hukkinen, J. I., 2016, "Comparative socio-cultural analysis of risk perception of Carbon Capture and Storage in the European Union", Energy Research & Social Science, 21, 114-122.

[26] Toma, L., Barnes, A., Revoredo-Giha, C., Tsitsoni, V., & Glenk, K., 2014, "A behavioural economics analysis of the impact of information and knowledge on CO2 capture and storage acceptance in the European Union", Procedia Economics and Finance, 14, 605-614.

[27] Pietzner, K., Schumann, D., Tvedt, S. D., Torvatn, H. Y., Næss, R., Reiner, D. M., ... & Dudu, A., 2011, "Public awareness and perceptions of carbon dioxide capture and storage (CCS): Insights from surveys administered to representative samples in six European countries", Energy Procedia, 4, 6300-6306.

[28] Dütschke, E., Wohlfarth, K., Höller, S., Viebahn, P., Schumann, D., & Pietzner, K., 2016, "Differences in the public perception of CCS in Germany depending on CO2 source, transport option and storage location", International Journal of Greenhouse Gas Control, 53, 149-159.

[29] Schumann, D., Duetschke, E., & Pietzner, K., 2014, "Public perception of CO2 offshore storage in Germany: regional differences and determinants", Energy Procedia, 63, 7096-7112.

[30] Guo, Y., Ashworth, P., Sun, Y., Yang, B., Yang, J., & Chen, J., 2019, “The influence of narrative versus statistical evidence on public perception towards CCS in China: Survey results from local residents in Shandong and Henan provinces”, International Journal of Greenhouse Gas Control, 84, pp.54-61.

[31] Wüstenhagen, R., Wolsink, M. and Bürer, M.J., 2007, “Social acceptance of renewable energy innovation: An introduction to the concept”, Energy Policy, 35(5), pp.2683-2691.

[32] de Best-Waldhober, M. and Daamen, D., 2011, “Development of CCS awareness and knowledge of the general public between 2004 and 2008”, Energy Procedia, 4, pp.6315-6321.

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΚΟΙΝΟΤΗΤΕΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ: ΕΝΗΜΕΡΩΣΗ ΤΟΥ ΚΟΙΝΟΥ, ΠΡΟΘΕΣΗ ΣΥΜΜΕΤΟΧΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΘΕΣΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ

Σ. Καρύτσας[1*], Ε. Θεοδωροπούλου[2]

[1*] Τμήμα Οικονομίας και Βιώσιμης Ανάπτυξης, Σχολή Περιβάλλοντος, Γεωγραφίας και Εφαρμοσμένων Οικονομικών, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, 176 71 Καλλιθέα, e-mail: skaryts@hua.gr; spkary@cres.gr

[2] Τμήμα Οικονομίας και Βιώσιμης Ανάπτυξης, Σχολή Περιβάλλοντος, Γεωγραφίας και Εφαρμοσμένων Οικονομικών, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο μετασχηματισμός των κοινωνιών σε βιώσιμα πρότυπα παραγωγής και κατανάλωσης αποτελεί βασική πρόκληση του τρέχοντος αιώνα. Εκτός από τη μεταβολή της συμπεριφοράς σε ατομικό επίπεδο, απαιτείται μετασχηματισμός σε συστημικό επίπεδο μέσω της συλλογικής δράσης, προκειμένου να επιλυθούν οι προκλήσεις των υφιστάμενων ενεργειακών συστημάτων, καθώς η συλλογική δράση υπήρξε ιστορικά επιτυχημένη κινητήρια δύναμη κοινωνικού μετασχηματισμού. Από την άποψη αυτή, οι κοινοτικές ενεργειακές πρωτοβουλίες μπορούν να συμβάλουν στην αποτελεσματική παραγωγή και διανομή ενέργειας, και να συνεισφέρουν στην επίτευξη των κλιματικών στόχων, μέσω της ανάθεσης νέων ρόλων στους πολίτες και τις τοπικές κοινότητες. Στη λογική αυτή, μέσα από το Νόμο 4513/2018, θεσμοθετήθηκαν πρόσφατα οι Ενεργειακές Κοινότητες στην Ελλάδα, καθορισμένες ως αστικοί συνεταιρισμοί αποκλειστικού σκοπού με στόχο την προώθηση της κοινωνικής και αλληλέγγυας οικονομίας.

Η παρούσα εργασία αποτελεί τμήμα έρευνας η οποία στοχεύει στην μελέτη των απόψεων και της συμπεριφοράς των πολιτών όσον αφορά την ενημέρωση, συμμετοχή και επένδυση στις Ενεργειακές Κοινότητες, καθώς και των σχετικών ζητημάτων τα οποία δεν έχουν διερευνηθεί στο παρελθόν. Έτσι, η έρευνα θα προσφέρει περαιτέρω εμπειρικά αποτελέσματα και θα καινοτομήσει μέσω της εξέτασης νέων ερευνητικών ερωτημάτων όσον αφορά τις κοινοτικές ενεργειακές πρωτοβουλίες.

Υπό αυτό το πρίσμα, η παρούσα εργασία παρουσιάζει τα ευρήματα που προκύπτουν από τα αρχικά στάδια της έρευνας, και συγκεκριμένα α) την αποτύπωση της υφιστάμενης κατάστασης όσον αφορά τις Ενεργειακές Κοινότητες στην Ελλάδα, β) τη βιβλιογραφική ανασκόπηση των παραγόντων που επηρεάζουν την ενημέρωση, τη συμμετοχή και την επένδυση σε κοινοτικές ενεργειακές πρωτοβουλίες, καθώς και των σχετικών εμποδίων διείσδυσης και μέτρων ενίσχυσης, και γ) την αποτύπωση των ερευνητικών ερωτημάτων, τα οποία θα αποτελέσουν τα επόμενα βήματα της έρευνας.

Τα αποτελέσματα που θα προκύψουν μέσω της έρευνας αυτής θα βοηθήσουν τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων και χάραξης πολιτικών να σχεδιάσουν αποτελεσματικές υποστηρικτικές πολιτικές προσαρμοσμένες στις εκάστοτε συνθήκες, με σκοπό την ενθάρρυνση της ενεργούς συμμετοχής και των επενδύσεων σε επίπεδο κοινότητας, και τους υπεύθυνους ανάπτυξης μιας πρωτοβουλίας να σχεδιάσουν στρατηγικές προσαρμοσμένες στους στόχους και τα οφέλη του κάθε έργου.

Λέξεις Κλειδιά: *Ενεργειακή κοινότητα, συμμετοχή, επένδυση, κίνητρα, εμπόδια*

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Μετασχηματισμός των κοινωνιών

Ο μετασχηματισμός των κοινωνιών σε βιώσιμα πρότυπα παραγωγής, κατανάλωσης και ιδιοπαραγωγής/ ιδιοκατανάλωσης αποτελεί βασική πρόκληση του τρέχοντος αιώνα [1]. Εκτός από τη μεταβολή της συμπεριφοράς σε ατομικό επίπεδο, απαιτείται μετασχηματισμός σε συστημικό επίπεδο μέσω της συλλογικής δράσης, προκειμένου να επιλυθούν οι προκλήσεις των υφιστάμενων ενεργειακών συστημάτων, καθώς η συλλογική δράση έχει υπάρξει ιστορικά επιτυχημένη κινητήρια δύναμη κοινωνικού μετασχηματισμού [2]. Από την άποψη αυτή, οι κοινοτικές ενεργειακές πρωτοβουλίες (ΚΕΠ) εμφανίζονται ως εναλλακτικές λύσεις για την παροχή συλλογικών «από κάτω προς τα πάνω» λύσεων, όσον αφορά τις τοπικές ανάγκες των κοινοτήτων, την αποτελεσματική συνολική παραγωγή και διανομή ενέργειας και την επίτευξη των κλιματικών στόχων, βοηθώντας στην αντιστροφή των σημερινών τάσεων κατανάλωσης ενέργειας και παραγωγής εκπομπών αερίων [3].

1.2. Κοινοτικές Ενεργειακές Πρωτοβουλίες στην Ευρώπη

Οι ΚΕΠ λαμβάνουν την μορφή ενός κοινωνικού κινήματος στην Ευρώπη, το οποίο υποδηλώνει τη ραγδαία αυξανόμενη ζήτηση για βιώσιμη και αυτοπαραγόμενη ενέργεια με δυνητικά σημαντικό αντίκτυπο στο ενεργειακό σύστημα [4]. Στην Ευρώπη υπάρχουν περίπου 2.800 ενεργειακοί συνεταιρισμοί, εκ των οποίων περίπου 1.000 στη Γερμανία και πάνω από 300 στην Ολλανδία [5]. Θα πρέπει πάντως να τονισθεί ότι οι ΚΕΠ εμφανίζονται με διαφορετικό αριθμό, ποσοστό επιτυχίας και στρατηγικές στην Ευρώπη [6], με ορισμένα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης να έχουν πολύ μικρό αριθμό ΚΕΠ, ενώ άλλες να έχουν έναν σημαντικά αυξανόμενο αριθμό τέτοιων πρωτοβουλιών [7]. Η ποικιλομορφία στην επιτυχία αυτών των κοινοτικών πρωτοβουλιών θα μπορούσε εν μέρει να αποδοθεί στις επικρατούσες διαρθρωτικές, στρατηγικές και βιοφυσικές συνθήκες [6][8]. Όπως αναφέρουν οι Heras-Saizarbitoria et al. [7] συγκεκριμένα για τις χώρες της νοτίου Ευρώπης, η έλλειψη ενός ευέλικτου και ευνοϊκού νομοθετικού πλαισίου, πολιτικής και ευνοϊκών όρων αποτελούν σημαντικά εμπόδια για την ανάπτυξη των ΚΕΠ.

1.3. Κοινοτικές Ενεργειακές Πρωτοβουλίες στην Ελλάδα

Στη λογική αυτή, μέσα από το Νόμο 4513/2018, θεσμοθετήθηκαν πρόσφατα οι «Ενεργειακές Κοινότητες» στην Ελλάδα. Σύμφωνα με το Άρθρο 1 του νόμου, «Η Ενεργειακή Κοινότητα (ΕΚΟΙΝ) είναι αστικός συνεταιρισμός αποκλειστικού σκοπού με στόχο την προώθηση της κοινωνικής και αλληλέγγυας οικονομίας, όπως ορίζεται στην παρ. 1 του άρθρου 2 του ν. 4430/2016 (Α΄ 205), και της καινοτομίας στον ενεργειακό τομέα, την αντιμετώπιση της ενεργειακής ένδειας και την προαγωγή της ενεργειακής αειφορίας, την παραγωγή, αποθήκευση, ιδιοκατανάλωση, διανομή και προμήθεια ενέργειας, την ενίσχυση της ενεργειακής αυτάρκειας και ασφάλειας σε νησιωτικούς δήμους, καθώς και τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας στην τελική χρήση σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο, μέσω της δραστηριοποίησης στους τομείς των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), της Συμπαραγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας Υψηλής Απόδοσης (ΣΗΘΥΑ), της ορθολογικής χρήσης ενέργειας, της ενεργειακής αποδοτικότητας, των βιώσιμων μεταφορών, της διαχείρισης της ζήτησης και της παραγωγής, διανομής και προμήθειας ενέργειας». Μέλη της ΕΚΟΙΝ μπορούν να είναι α) φυσικά πρόσωπα, β) νομικά πρόσωπα δημοσίου και ιδιωτικού δικαίου και γ) Ο.Τ.Α. α' και β' βαθμού. Τουλάχιστον το 50% συν ένα των μελών πρέπει να σχετίζονται με τον τόπο στον οποίο βρίσκεται η έδρα της ΕΚΟΙΝ, ενώ μια ΕΚΟΙΝ μπορεί να έχει είτε μη κερδοσκοπικό ή κερδοσκοπικό χαρακτήρα. Ο Νόμος 4513/2018, λοιπόν, ρυθμίζει τον ελάχιστο αριθμό μελών των ΕΚΟΙΝ, το πεδίο της δραστηριότητάς τους, το γεωγραφικό τους εύρος, την εντοπιότητα των μελών, το συνεταιριστικό κεφάλαιο, τη διανομή των πλεονασμάτων, και το ελάχιστο περιεχόμενο του καταστατικού ίδρυσής της, ενώ προβλέπει οικονομικά κίνητρα, μέτρα στήριξης, καθώς και τεχνολογικά εργαλεία [9].

Όσον αφορά την αποτύπωση της υφιστάμενης κατάστασης της αγοράς των ΕΚΟΙΝ στην Ελλάδα, σύμφωνα με την μελέτη της ELECTRA ENERGY [10], μέχρι τον Αύγουστο του 2020 είχαν καταχωρηθεί στο Γενικό Εμπορικό Μητρώο (ΓΕΜΗ) 409 Ενεργειακές Κοινότητες. Μεγαλύτερη συγκέντρωση ΕΚΟΙΝ υπάρχει στο βόρειο τμήμα της χώρας, σε σχέση με το νότιο τμήμα και τα νησιά. Σε επίπεδο Περιφερειών, στην πρώτη θέση βρίσκεται η Κεντρική Μακεδονία με 143 καταγεγραμμένες ΕΚΟΙΝ, ενώ ακολουθούν η Ανατολική Μακεδονία-Θράκη (52), η Δυτική Ελλάδα (47) και η Δυτική Μακεδονία (44). Σχετικά με το συνεταιριστικό κεφάλαιο, οι περισσότερες ΕΚΟΙΝ έχουν χαμηλότερο των 10.000€ (61%), το 35% έχει κεφάλαιο μεταξύ 10.000 και 100.000€, ενώ μόλις 4% έχει κεφάλαιο άνω των 100.000€. Όσον αφορά την ισόρροπη εκπροσώπηση των δύο φύλων, τα αποτελέσματα της έρευνας υποδεικνύουν ότι υπάρχει έλλειψη γυναικείας εκπροσώπησης, καθώς στο 93% των ΕΚΟΙΝ

συμμετέχουν λιγότερες από 2 γυναίκες στο Διοικητικό Συμβούλιο. Επιπλέον, η ίδια μελέτη [10], βάσει έρευνας ερωτηματολογίου που διεξήγαγε (η οποία όμως θα πρέπει να τονισθεί ότι βασίζεται σε ένα δείγμα μόλις 32 ΕΚΟΙΝ), αναφέρει ότι η βασική τεχνολογία την οποία χρησιμοποιούν ή σκοπεύουν να χρησιμοποιήσουν είναι οι εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών, ακολουθούμενη από την αποθήκευση ενέργειας, την αιολική ενέργεια και τη βιομάζα. Πάντως, μόλις το 9% των ΕΚΟΙΝ που συμμετείχαν στην έρευνα δήλωσαν ότι είχαν αρχίσει να παράγουν ενέργεια κατά την περίοδο υλοποίησης της συγκεκριμένης έρευνας. Όσον αφορά τη χρηματοδότηση του έργου και της λειτουργίας, η πλειονότητα των 32 ΕΚΟΙΝ δήλωσε ότι βασίζεται σε συνδυασμό εσωτερικών κεφαλαίων και δανεισμού.

Σύμφωνα με τους REScoop.eu et al. [11], τα βασικά προβλήματα που αντιμετωπίζει η ανάπτυξη των ΕΚΟΙΝ στην Ελλάδα είναι τα κενά του θεσμικού πλαισίου, η γραφειοκρατία, η έλλειψη ενημέρωσης των τοπικών κοινωνιών και η γενικότερη έλλειψη ουσιαστικής στήριξης και προώθησης τους. Τα προβλήματα αυτά έχουν οδηγήσει στην εκμετάλλευση του θεσμού από ιδιώτες επενδυτές οι οποίοι είχαν την τεχνογνωσία ή/και πρόσβαση στα απαιτούμενα κεφάλαια, εις βάρος των πραγματικών τοπικών πρωτοβουλιών. Επιπλέον, σύμφωνα με το προαναφερθέν πηγή [11], η πρόσφατη νομοθεσία (Νόμος 4759/2020) απειλεί άμεσα το μέλλον των ΕΚΟΙΝ στην Ελλάδα, μέσω της άρσης των κινήτρων για όλες τις περιπτώσεις, το οποίο σημαίνει ότι από 01/01/2022 κάθε ΕΚΟΙΝ θα πρέπει να συμμετέχει σε ανταγωνιστικές διαδικασίες, δηλαδή να ανταγωνίζεται ιδιώτες επενδυτές για τη διασφάλιση λειτουργικής ενίσχυσης των έργων ΑΠΕ (Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας).

1.4. Σκοπός της έρευνας

Η παρούσα εργασία αποτελεί τμήμα έρευνας η οποία στοχεύει στην μελέτη των απόψεων και της συμπεριφοράς των πολιτών όσον αφορά την ενημέρωση, συμμετοχή και επένδυση στις ΕΚΟΙΝ, καθώς και των σχετικών ζητημάτων (προσδιοριστικοί παράγοντες, εμπόδια, κίνητρα, δομές, κ.α.) τα οποία δεν έχουν διερευνηθεί στο παρελθόν.

Υπό αυτό το πρίσμα, η παρούσα εργασία εκθέτει τα ευρήματα που προκύπτουν από τα αρχικά στάδια της έρευνας, και συγκεκριμένα, έχοντας παρουσιάσει παραπάνω την υφιστάμενη κατάσταση όσον αφορά τις ΕΚΟΙΝ στην Ελλάδα, συνεχίζει παρουσιάζοντας α) τη βιβλιογραφική ανασκόπηση των παραγόντων που επηρεάζουν την ενημέρωση, τη συμμετοχή και την επένδυση σε ΚΕΠ, καθώς και των σχετικών εμποδίων διείσδυσης και μέτρων ενίσχυσης, και β) την αποτύπωση των ερευνητικών ερωτημάτων, τα οποία θα αποτελέσουν τα επόμενα βήματα της έρευνας.

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

2.1. Ορισμός των Κοινοτικών Ενεργειακών Πρωτοβουλιών

Για την περιγραφή του όρου «κοινοτική ενεργειακή πρωτοβουλία», πολλά άρθρα επιλέγουν έναν ορισμό ανάλογα με αυτό που εξετάζουν. Ο πιο κοινός ορισμός χαρακτηρίζει τις κοινοτικές ενεργειακές πρωτοβουλίες ως «έργα όπου οι κοινότητες (γεωγραφικές ή ενδιαφέροντος) παρουσιάζουν υψηλό βαθμό ιδιοκτησίας και ελέγχου, [και] επωφελούνται συλλογικά από τα αποτελέσματα» [12]. Οι πρωτοβουλίες αυτές έχουν αναφερθεί στη σχετική βιβλιογραφία ως κοινοτική ενέργεια [13], κοινοτικές ΑΠΕ [14], πρωτοβουλίες της τοπικής κοινότητας [15] ή τοπικές πρωτοβουλίες καθοδηγούμενες από τους πολίτες [16] και μπορούν να έχουν πολλές διαφορετικές οργανωτικές δομές, μεταξύ των οποίων τη μορφή συνεταιρισμού, τοπικών κοινωνικών επιχειρήσεων, εταιρειών ενεργειακών υπηρεσιών (ESCOs) οι οποίες ανήκουν σε τοπικούς φορείς/πολίτες, καθώς και την περίπτωση οι τοπικές αρχές να αναπτύσσουν και να διαχειρίζονται το έργο εκ μέρους της τοπικής κοινότητας [17]. Όπως αναφέρουν οι Beggio και Kusch [18], οι κοινές πτυχές που μοιράζονται αυτές οι πρωτοβουλίες είναι οι αρχές των κατευθυντήριων γραμμών της ICA [19]: α) εθελοντική και ανοιχτή ιδιότητα μέλους, β) δημοκρατικός έλεγχος των μελών, γ) οικονομική συμμετοχή των μελών, δ) αυτονομία και ανεξαρτησία, ε) εκπαίδευση, κατάρτιση και πληροφόρηση, στ) συνεργασία μεταξύ συνεταιρισμών, και ζ) μέριμνα για την τοπική κοινότητα.

Οι ΚΕΠ, σύμφωνα με αρκετούς συγγραφείς [6][20][21][22] συνδέονται στενά με τη χρήση ΑΠΕ. Είτε πρόκειται για ηλιακή ενέργεια, αιολική ενέργεια ή θέρμανση από ανανεώσιμες πηγές, αυτή η έννοια συνεπάγεται επίσης μια τάση προς μικρής κλίμακας, αποκεντρωμένες πηγές ενέργειας [6]. Αυτή η τεχνική κατηγοριοποίηση των ΚΕΠ ανταποκρίνεται σε μια περιγραφή των κοινωνικών χαρακτηριστικών πολύ πιο πολύπλευρη: Κοιτάζοντας την οργανωτική δομή, η έννοια της ΚΕΠ περιλαμβάνει τη συμμετοχική λήψη αποφάσεων [21][22], σε συνδυασμό με την συμμετοχή της κοινότητας στην ιδιοκτησία [23][24]. Επιπλέον, ένα χαρακτηριστικό των ΚΕΠ είναι η έντονη έμφαση στη γεωγραφική κατανομή της παραγωγής και της κατανάλωσης σε κοντινή απόσταση [6][20][23][25].

Βεβαίως, οι Heiskanen et.al. [26] επισημαίνουν ότι οι ΚΕΠ μπορούν να μην αναφέρονται σε μια γεωγραφική σύνδεση, όπως για παράδειγμα οι εικονικές κοινότητες εξοικονόμησης ενέργειας. Ωστόσο, οι ΚΕΠ συχνά ορίζονται και από τα αποτελέσματά τους, τα οποία εκδηλώνονται μέσω της κινητοποίησης της κοινότητας [20], της βελτίωσης της κοινότητας [22] και της αλλαγής συμπεριφοράς προς έναν πιο βιώσιμο τρόπο ζωής [21].

Βάσει, λοιπόν, των ανωτέρω, η έννοια της ΚΕΠ μπορεί να ορισθεί ως ένα ενεργειακό σύστημα α) το οποίο είναι πιο βιώσιμο ως προς τις τεχνολογικές του πτυχές, και β) το οποίο επιτρέπει περισσότερη συμμετοχή και δημοκρατικό έλεγχο. Από την άλλη πλευρά, αυτό που απορρίπτεται ως κάτι το οποίο δεν αποτελεί τμήμα της έννοιας των ΚΕΠ, είναι οι κεντρικές δομές, οι περιβαλλοντικά επιβλαβείς τεχνολογίες και η συμμετοχή χωρίς κάποια ουσιαστική δύναμη [13].

2.2. Οργανωτική δομή και συμμετέχοντες των Κοινοτικών Ενεργειακών Πρωτοβουλιών

Οι ΚΕΠ μπορούν να περιγραφούν ως ένας «πλουραλιστικός κλάδος» [12] ο οποίος περιλαμβάνει διάφορες οργανωτικές μορφές όπως ενεργειακούς συνεταιρισμούς, συλλόγους που λειτουργούν βάσει ιδιωτικού δικαίου, τοπικά μερίδια σε ενεργειακές υποδομές, και προσεγγίσεις που βασίζονται στη συμμετοχή της τοπικής αυτοδιοίκησης στην ιδιοκτησία των ενεργειακών δικτύων και των σταθμών παραγωγής ενέργειας. Κάθε μορφή εξαρτάται εν τέλει από τα εθνικά πλαίσια πολιτικής και τις διαφορετικές δομές της αγοράς ενέργειας και της συλλογικής οργάνωσης [27]. Συχνά σχηματίζονται από παράγοντες με διαφορετικό κοινωνικοοικονομικό υπόβαθρο, και έτσι η καθιέρωση ενός αποτελεσματικού μοντέλου διακυβέρνησης καθίσταται ιδιαίτερα σημαντική [28]. Σύμφωνα με τους Heras-Saizarbitoria et al. [7], οι ΚΕΠ μπορούν να κατηγοριοποιηθούν βάσει του ενεργειακού πόρου που αξιοποιούν, βάσει της πηγής της προστιθεμένης αξίας που παράγουν και βάσει του επιχειρηματικού τους μοντέλου.

Μέσω των ΚΕΠ, το ενεργειακό σύστημα μετασχηματίζεται από ένα κεντρικά συντονισμένο σύστημα τροφοδοτούμενο με ορυκτά καύσιμα, προς «από κάτω προς τα πάνω» (bottom-up) αποκεντρωμένο σύστημα χαμηλών εκπομπών άνθρακα [29][30]. Βάσει του υποδείγματος συλλογικής δράσης, μια βιώσιμη ΚΕΠ απαιτεί τη συμμετοχή πλήθους διαφορετικών φορέων, μεταξύ των οποίων επαγγελματιών, καταναλωτικών συνεταιρισμών, ακαδημαϊκών, ΜΚΟ, τοπικών φορέων και τοπικής αυτοδιοίκησης, κεντρικής κυβέρνησης, εταιρειών ανάπτυξης, επιχειρήσεων ενέργειας, τραπεζών, χρηματοδοτών κ.λπ. [31][32][33]. Πάντως, σύμφωνα με την έρευνα των Klagge et al. [34], οι περισσότερες ΚΕΠ, μπορούν να θεωρηθούν ως τοπικά καθοδηγούμενοι οργανισμοί, καθώς έχουν ως μέλη τους τοπικές αυτοδιοικήσεις, ντόπιους κατοίκους, και συνεταιριστικές τράπεζες.

2.3. Ρόλος των Κοινοτικών Ενεργειακών Πρωτοβουλιών

Ένας αυξανόμενος αριθμός καταναλωτών γίνεται συν-πάροχος, μέσω της παραγωγής, αποθήκευσης, εξοικονόμησης, εισαγωγής και εξαγωγής ενέργειας σε τοπικό επίπεδο, χάρη στις πρόσφατες εξελίξεις όπως η εφαρμογή κατάλληλων πολιτικών, η μείωση του κόστους των ΑΠΕ και των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας, η εμφάνιση τεχνολογιών πληροφοριών και επικοινωνιών (ΤΠΕ), καθώς και λόγω της αυξανόμενης περιβαλλοντικής ευαισθητοποίησης [5]. Οι εξελίξεις αυτές παρέχουν νέες ευκαιρίες για τη δημιουργία ευφυέστερων, ευέλικτων, ολοκληρωμένων τοπικών συστημάτων, τα οποία δημιουργούν αξία τόσο για ολόκληρα τα ενεργειακά συστήματα, όσο και για τους τελικούς χρήστες [3][35]. Οι ΚΕΠ δημιουργούν νέους ρόλους για τους πολίτες και τις τοπικές κοινότητες, τοποθετώντας τους στο επίκεντρο του ενεργειακού συστήματος [3]. Η αποδοχή, η υποστήριξη και η συμμετοχή των πολιτών είναι ουσιαστικής σημασίας για την επιτυχή διαχείριση των υπό εξέλιξη ενεργειακών μετασχηματισμών [36].

Όσον αφορά την αποστολή τους, οι γενικοί στόχοι των ΚΕΠ μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις διαστάσεις [7]: α) την οικονομική, σύμφωνα με την οποία οι ΚΕΠ τονίζουν την συνεταιριστική τους φύση, τις προσπάθειές τους να ενδυναμώσουν την τοπική οικονομία και να δημιουργήσουν τοπικές θέσεις εργασίας, β) την περιβαλλοντική, σύμφωνα με την οποία έχουν κεντρικό ρόλο στην προώθηση ενός νέου ενεργειακού μοντέλου και γ) την κοινωνική, κατά την οποία προωθούν συγκεκριμένες μορφές οικονομικής ανάπτυξης, βασισμένων στην ενδυνάμωση της τοπικής κοινότητας.

Οι ΚΕΠ θεωρούνται σημαντική εξέλιξη για τη μετάβαση των ενεργειακών συστημάτων χαμηλών εκπομπών άνθρακα, μέσω της ενσωμάτωσης του ενεργειακού συστήματος και της συμμετοχής της τοπικής κοινότητας [3]. Οι ΚΕΠ μπορούν να καλύψουν τις ενεργειακές απαιτήσεις μιας τοπικής κοινότητας, μέσω συμπαραγωγής υψηλής απόδοσης, τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε συνδυασμό με καινοτόμες λύσεις αποθήκευσης ενέργειας, ηλεκτρικών οχημάτων και μέτρων από την πλευράς της ζήτησης (εξοικονόμησης ενέργειας) [4][35]. Σύμφωνα με τους Klagge, et al. [34], οι

δραστηριότητες στις οποίες μπορούν να εμπλακούν οι ΚΕΠ περιλαμβάνουν ένα εύρος δραστηριοτήτων, μεταξύ των οποίων την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, τη διαχείριση ηλεκτρικών δικτύων, τη διαχείριση δικτύων θέρμανσης, την παραγωγή θερμικής ενέργειας, τις συμβουλευτικές υπηρεσίες, την ενοικίαση μονάδων, την αγορά/ διανομή/ πώληση ενέργειας, καθώς και τις δράσεις εξοικονόμησης ενέργειας.

2.4. Πολιτικές για την ανάπτυξη των Κοινοτικών Ενεργειακών Πρωτοβουλιών

Η ανάπτυξη των ΚΕΠ έχει καταστεί δυνατή χάρη σε ορισμένες τεχνολογικές εξελίξεις (μικρές μονάδες παραγωγής ενέργειας, έξυπνα δίκτυα κ.λπ.), οι οποίες επέτρεψαν την εξεύρεση λύσεων, διαφορετικών σε σχέση με αυτές του παρελθόντος οι οποίες βασίζονταν στον συγκεντρωτισμό (μεγάλοι σταθμοί παραγωγής ενέργειας, ενοποιημένο δίκτυο). Ωστόσο, ο ρόλος των πολιτικών στην ενοποίηση και περαιτέρω διευκόλυνση της ανάπτυξής τους είναι επίσης σημαντικός [37]. Παρ' όλα αυτά, είναι σχεδόν αδύνατο να φανταστούμε πολιτικές που μπορούν ταυτόχρονα να ενθαρρύνουν όλες τις πιθανές μορφές ΚΕΠ. Αναπόφευκτα θα υπάρχουν τύποι πολιτικής (κανόνες και πρότυπα, φορολογικές ελαφρύνσεις, μηχανισμοί οικονομικής στήριξης) που θα είναι πιο ευνοϊκοί για ορισμένες ΚΕΠ, σε σχέση με άλλες [37].

Όπως και να έχει, η χρήση χρηματοδοτικών εργαλείων είναι σημαντικός παράγοντας για την επιτυχία των ΚΕΠ. Άλλωστε, οι ΚΕΠ είναι πιθανόν να ωφελούνται από μηχανισμούς περιορισμού του ρίσκου, οι οποίοι κρατούν χαμηλά τα κόστη συναλλαγών για την χρηματοδότηση και λειτουργία έργων ΑΠΕ [38]. Άλλωστε, οι οργανισμοί αυτοί έχουν συνήθως περιορισμένους πόρους καθώς βασίζονται στους πόρους των μελών τους και την εξωτερική χρηματοδότηση (π.χ. τραπεζικός δανεισμός). Μεταξύ των χρηματοδοτικών κινήτρων περιλαμβάνονται οι άμεσες επιδοτήσεις και επιχορηγήσεις (feed-in tariffs, feed-in premiums), οι φοροελαφρύνσεις, οι εκπτώσεις στο φόρο εισοδήματος, τα μακροχρόνια χαμηλότοκα δάνεια και η παροχή εγγυήσεων για δάνεια [31][37][39][40].

Παρόλο που η πρωτοβουλία και η επιτυχία βασίζονται στην ίδια την κοινότητα, το πλαίσιο πολιτικής διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην παροχή των συνθηκών υπό τις οποίες μπορούν να αναπτυχθούν οι ΚΕΠ. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής πρέπει να λάβουν υπόψη τις συνέπειες των νέων κανονισμών και κινήτρων που εισάγονται στον ενεργειακό τομέα. Ενώ οι σωστές συνθήκες μπορούν να αυξήσουν τη συμμετοχή, η ύπαρξή τους ως προϋπόθεση είναι επίσης μια αδυναμία για τις ΚΕΠ, ειδικά σε αρχικά στάδια ανάπτυξης [13].

2.5. Οφέλη από των καθιέρωση των Κοινοτικών Ενεργειακών Πρωτοβουλιών

Ο Brummer [13] κατηγοριοποίησε τα οφέλη των ΚΕΠ σε 7 κατηγορίες: οικονομικά οφέλη, εκπαίδευση και αποδοχή, συμμετοχή, περιβαλλοντική προστασία και βιωσιμότητα, «οικοδόμηση» κοινότητας και αυτοπραγμάτωση, στόχοι παραγωγής ΑΠΕ, και καινοτομία, με τα συχνότερα αναφερόμενα οφέλη να είναι αυτά που ανήκουν στις κατηγορίες οικονομικά οφέλη και εκπαίδευση και αποδοχή.

Τα νοικοκυριά που αποτελούν μέρος των ΚΕΠ μπορούν να εξισορροπήσουν τις ενεργειακές τους απαιτήσεις μέσω τοπικών ανταλλαγών ενέργειας. Οι ΚΕΠ επικεντρώνονται στις κατάλληλες συνέργειες μεταξύ των διαφόρων δικτύων μεταφοράς ενέργειας καθώς και μεταξύ των τοπικών νοικοκυριών, ενώ αποσκοπούν όχι μόνο στην ιδιοπαραγωγή από την πλευρά των τοπικών κοινοτήτων, αλλά μπορούν επίσης να προσφέρουν υπηρεσίες στα ενεργειακά συστήματα, όπως η εξισορρόπηση προσφοράς/ζήτησης, δημιουργώντας πρόσθετα έσοδα για τις τοπικές κοινότητες [5]. Συμβάλλοντας στην ανάπτυξη της ενεργειακής δημοκρατία, οδηγούν τους πολίτες να γίνονται ενεργοί καταναλωτές, συμμετέχοντας σταδιακά στη λειτουργία των δικτύων διανομής, των εταιρειών παροχής ενέργειας και υπηρεσιών ενέργειας [41].

Οι ΚΕΠ μπορούν να προσφέρουν οικονομικά οφέλη, μείωση της ενεργειακής φτώχειας, κοινωνική συνοχή [17], αλλά και να αντιμετωπίσουν τα υψηλά κόστη συναλλαγής [42][43]. Σε τοπικό επίπεδο, τα οικονομικά οφέλη είναι σημαντικά, καθώς η προστιθέμενη αξία επανεπενδύεται στην τοπική κοινότητα, δημιουργούνται έσοδα για την τοπική αυτοδιοίκηση, μέσω της φορολογίας, ενισχύεται το εισόδημα των αγροτικών περιοχών [31], ενώ μπορεί επίσης να υπάρξει συμβολή στη μείωση της τιμής του ηλεκτρικού ρεύματος [44]. Μια άλλη επίπτωση των ΚΕΠ στην τοπική οικονομία είναι η δημιουργία θέσεων εργασίας απευθείας στην τοπική αγορά, ενώ μπορεί επίσης να προσλάβουν τοπικές εταιρείες ή να χρησιμοποιούν τοπικές τράπεζες [45]. Έτσι, οι ΚΕΠ συμβάλλουν στην μεγιστοποίηση της τοπική αξίας, συνεισφέροντας στην κοινωνική και οικονομική ευημερία των τοπικών κοινοτήτων. Συγκεκριμένα, οι ΚΕΠ δημιουργούν μια «κυκλική» οικονομία σε τοπικό επίπεδο, όπου επενδύονται κέρδη από ΑΠΕ για την προώθηση άλλων ενεργειακών στόχων, καθώς και για την οικοδόμηση μεταρρυθμίσεων και εξοικονόμησης ενέργειας [46].

Επιπλέον, οι ΚΕΠ συμβάλλουν στην επίτευξη των στόχων για το κλίμα, την ενέργεια και το περιβάλλον. Στοχεύουν στην επίτευξη των στόχων της ΕΕ για την κλιματική πολιτική βοηθώντας στην επίτευξη των στόχων σχετικά με τις ΑΠΕ και την ενεργειακή εξοικονόμηση [47] ενώ συντελούν στην εξοικονόμηση ενέργειας, μέσω της ενημέρωσης, της αύξησης της εμπιστοσύνης και την καθιέρωση κοινωνικών προτύπων [48].

Τα τοπικά ενεργειακά συστήματα συμβάλλουν στην αύξηση της αποδοχής και διείσδυσης των ΑΠΕ σε τοπικό επίπεδο [22][49][50][51], ενώ δημιουργούν νέους ρόλους για τις τοπικές κοινότητες [52]. Στα οφέλη των ΚΕΠ περιλαμβάνονται η μεγαλύτερη ενεργειακή αυτονομία και ασφάλεια, η ανάδειξη της αυτό-διακυβέρνησης, καθώς και η ενίσχυση των κοινοτικών αξιών (αλληλεγγύη, αυτάρκεια, αυτοδιάθεση και ενδυνάμωση μέσω τοπικής δέσμευσης) [3][53][54]. Επιπλέον, οι ΚΕΠ μπορούν να συμπληρώσουν τις εθνικές ατζέντες για τη στήριξη της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας προς τους μειονεκτούντες πληθυσμούς και να συνεισφέρουν στη μετάβαση σε αποκεντρωμένες ΑΠΕ [55]. Ως εκ τούτου, οι ΚΕΠ μπορούν να είναι ένας οδηγός για δημιουργία κοινωνικού κεφαλαίου [49][56].

2.6. Εμπόδια ανάπτυξης των Κοινοτικών Ενεργειακών Πρωτοβουλιών

Παρόλο που υπάρχουν πολλά οφέλη που συνδέονται με τη συμμετοχή των πολιτών στις ΚΕΠ, υπάρχουν επίσης αρκετά εμπόδια και προκλήσεις [4][6][49][53]. Τα κυριότερα εμπόδια για την υλοποίηση των «από κάτω προς τα πάνω» (bottom-up) ενεργειακών πρωτοβουλιών, προέρχονται από τον κεντρικό σχεδιασμό και τη ρύθμιση των υφιστάμενων ενεργειακών συστημάτων που δεν παρέχουν πάντοτε ίσους όρους ανταγωνισμού για τα τοπικά ενεργειακά συστήματα. Οι ΚΕΠ μπορούν να παρεμποδιστούν από τεχνικά εμπόδια όπως η έλλειψη εξοπλισμού, τεχνογνωσίας και εμπειρίας [53][57]. Από την άλλη, μπορεί να υπάρξουν εμπόδια οικονομικής φύσης, όπως το υψηλό αρχικό κόστος επένδυσης [58], οι μακροχρόνιες περίοδοι αποπληρωμής και η χαμηλή αναλογία κόστους/απόδοσης [59]. Άλλη κατηγορία είναι οι κυβερνητικές παρεμβάσεις, μεταξύ των οποίων τα ρυθμιστικά εμπόδια, τα γραφειοκρατικά εμπόδια και η απουσία μακροχρόνιων και σταθερών πολιτικών [7][59]. Σύμφωνα με την περίπτωση της Ισπανίας [7], παράδειγμα εμποδίου που σχετίζεται με το ρυθμιστικό πλαίσιο είναι το ότι η συνάψεις συμβάσεων απαιτούν τεχνική φερεγγυότητα και οικονομικές εγγυήσεις, τα οποία οι μικροί οργανισμοί δεν μπορούν να επιτύχουν. Στις προκλήσεις περιλαμβάνονται επίσης η συμμετοχή της κοινότητας καθώς και η δίκαιη κατανομή του κόστους και των οφελών [17]. Όπως αναφέρει και ο Brummer [13], πολλές ΚΕΠ δυσκολεύονται να συμπληρώσουν τις διοικητικές του θέσεις με άτομα τα οποία να έχουν τη θέληση να αφιερώσουν τον χρόνο και την εμπειρία τους σε μια μη-αμειβόμενη θέση. Επιπλέον, σύμφωνα με τους Herbes et al. [60], οι ΚΕΠ οι οποίες εφαρμόζουν νέα επιχειρηματικά μοντέλα μπορεί να αντιμετωπίσουν εμπόδια όπως η υψηλή αποστροφή προς τον κίνδυνο, η έλλειψη κερδοφορίας ή/και πόρων, και οι ηθικοί προβληματισμοί (περιβαλλοντικές και κλιματικές επιπτώσεις, επιπτώσεις στις χρήσεις γης, έλλειψη τοπικής στόχευσης, αντίθεση με τις προθέσεις της νομοθεσίας, σημασία οικονομικών αποδόσεων).

Παρόλο που πρόκειται για τοπικές πρωτοβουλίες, οι ΚΕΠ ενδέχεται να αντιμετωπίζουν αντίσταση από τις τοπικές κοινότητες σε περίπτωση που δεν ευθυγραμμίζονται με τα τοπικά συμφέροντα. Για παράδειγμα, ζητήματα συντονισμού και διχασμού των κίνητρων (split incentives) μπορούν να προκύψουν όταν το κόστος και το όφελος των τοπικών ενεργειακών συστημάτων δεν καταλήγουν στον ίδιο φορέα [5]. Ακόμη, το κατά πόσο μια κοινωνία είναι εξοικειωμένη με το συνεταιριστικό μοντέλο, μπορεί να παίξει το ρόλο του. Σε χώρες με παράδοση στο χώρο, οι άνθρωποι είναι εξοικειωμένοι με το νομοθετικό πλαίσιο και τα πλεονεκτήματα. Από την άλλη, σε χώρες όπου δεν υπάρχει εξοικείωση, οι πολίτες είναι λιγότερο ενημερωμένοι, ενώ προϋπάρχουσες αρνητικές εμπειρίες με το συνεταιριστικό μοντέλο μπορεί να δημιουργούν μια αρνητική άποψη, δημιουργώντας έτσι αρνητική φήμη για τους συνεταιρισμούς [40].

Σύμφωνα με τον Brummer [13], τα εμπόδια μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε 6 κατηγορίες: α) οργανωτικά ζητήματα / νομικό πλαίσιο / απαιτήσεις σχεδιασμού, β) διακρίσεις εις βάρος των μικρών κοινοτικών έργων, σε σχέση με τις μεγάλες εταιρείες και τους κατεστημένους φορείς, γ) έλλειψη θεσμικής και πολιτικής υποστήριξης, δ) σκεπτικισμός σχετικά με τις ΚΕΠ / σύνδρομο NIMBY, ε) έλλειψη πόρων / εξειδίκευσης, στ) φαινόμενο κορεσμού. Σύμφωνα με την έρευνα αυτή [13], τα συχνότερα αναφερόμενα εμπόδια είναι αυτά που ανήκουν στις κατηγορίες «οργανωτικά ζητήματα / νομικό πλαίσιο / απαιτήσεις σχεδιασμού» και «έλλειψη πόρων / εξειδίκευσης / αντοχής». Από την άλλη, ο Centgraf [61] διαχωρίζει τα εμπόδια σε εσωτερικά και εξωτερικά: στην 1η κατηγορία συμπεριλαμβάνονται εμπόδια όπως η έλλειψη πόρων, ενεργών μελών, κοινού οράματος, ενημέρωσης, επικοινωνίας και διαφάνειας, καθώς και οι υψηλές απαιτήσεις για την ίδρυση και λειτουργία ενός έργου. Στα εξωτερικά εμπόδια συμπεριλαμβάνει μεταξύ άλλων τις αυξημένες ανάγκες για ενασχόληση με νέα επιχειρηματικά μοντέλα, τις ασαφείς βραχυχρόνιες ενεργειακές πολιτικές /

αλλαγή πλαισίου πολιτικής, το επιχειρηματικό ρίσκο και την αυξημένη πίεση για να δοθεί επαγγελματικός χαρακτήρας στις ΚΕΠ.

2.7. Συμμετοχή των καταναλωτών στις Κοινοτικές Ενεργειακές Πρωτοβουλίες

Υπάρχει πλήθος βιβλιογραφικών πηγών που υποδεικνύουν τη σημασία της πιο συστηματικής και συνειδητής συμμετοχής των πολιτών στα ενεργειακά συστήματα [62][63]. Όλο και περισσότεροι καταναλωτές γίνονται συμπαραγωγοί με τη συμμετοχή τους στην παραγωγή, αποθήκευση, εξοικονόμηση, εισαγωγή και εξαγωγή ενέργειας σε τοπικό επίπεδο, χάρη στις πρόσφατες εξελίξεις, όπως η εφαρμογή των κατάλληλων πολιτικών, η μείωση του κόστους των ΑΠΕ και των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας, η ανάδυση των τεχνολογιών πληροφορίας και επικοινωνίας, καθώς και η βελτίωση της περιβαλλοντικής συνείδησης [64]. Όταν οι καταναλωτές έχουν περισσότερο έλεγχο, τείνουν να αυτο-οργανώνονται και να συνεργάζονται για να σχηματίσουν ένα τοπικό ενεργειακό σύστημα [8][49][65].

Πάντως, ο μετασχηματισμός του τελικού χρήστη είναι μια σταδιακή και χρονοβόρα διαδικασία. Τα διαφορετικά επίπεδα στα οποία μπορεί να τοποθετηθεί ο τελικός χρήστης είναι η ευαισθητοποίηση, η συμμετοχή και η διαχείριση [66]. Η ευαισθητοποίηση αναφέρεται στους πολίτες που γνωρίζουν τις εξελίξεις στο μεταβαλλόμενο ενεργειακό τοπίο, συμπεριλαμβανομένων των ενεργειακών έργων σε τοπικό επίπεδο. Οι πολίτες που γνωρίζουν αυτές τις δυνατότητες μπορούν είτε να συμμετάσχουν σε μια υπάρχουσα ΚΕΠ, είτε να οργανώσουν και να διαχειριστούν τη δική τους ΚΕΠ. Ο μετασχηματισμός του χρήστη μπορεί να επιτευχθεί μέσω της παροχής πληροφοριών, επιλογής και ενεργής συμμετοχής του, ώστε να υπάρχει η ευελιξία για να συμμετάσχει στη διαχείριση τόσο της ζήτησης, όσο και της προσφοράς. Οι τοπικές κοινότητες μετασχηματίζονται μέσω της αμφισβήτησης της παραδοσιακής τους ταυτότητας, από παθητικοί καταναλωτές σε ενεργούς πελάτες, οι οποίοι είναι όχι μόνο καταναλωτές αλλά και παραγωγοί [5].

Οι ΚΕΠ προκύπτουν λόγω των συνεχιζόμενων διαδικασιών αναδιάρθρωσης και της αλλαγής του ενεργειακού τοπίου [3]. Φυσικά, δεν θα οδηγηθούν όλοι οι τελικοί χρήστες από τη διαδικασία μετασχηματισμού, με το μερίδιο των πολιτών που επιθυμούν να εμπλακούν να συρρικνώνεται από την ευαισθητοποίηση μέχρι την ανάληψη κάποιας θέσης ευθύνης. Παρ' όλα αυτά, ο μετασχηματισμός του χρήστη έχει τη δυνατότητα να οδηγήσει και στον μετασχηματισμό του ενεργειακού συστήματος [66].

2.8. Καθοριστικοί παράγοντες για τη συμμετοχή και επένδυση σε Κοινοτικές Ενεργειακές Πρωτοβουλίες

Σε αυτή την ενότητα λαμβάνονται υπόψη δύο τύποι αποφάσεων: αφενός, οι αποφάσεις των μελών να συμμετάσχουν στις ΚΕΠ και, αφετέρου, το επίπεδο εμπλοκής τους, η οποία ορίζεται βάσει του ύψους της επένδυσης που πραγματοποιούν, και του βαθμού συμμετοχής στη διακυβέρνηση των οργανισμών. Με βάση τη θεωρία σχετικά με την επενδυτική συμπεριφορά, οι προηγούμενες έρευνες σχετικά με τις επενδυτικές αποφάσεις για ΑΠΕ υπογράμμισαν ότι αυτές δεν καθοδηγούνται αποκλειστικά από εγωιστικά κίνητρα, αλλά μπορεί να επηρεαστούν από διάφορους μη χρηματοοικονομικούς παράγοντες [67][68], συμπεριλαμβανομένων των δημογραφικών μεταβλητών, οικονομικών και τεχνικών γνώσεων, κοινωνικών ή ηθικών κανόνων συμπεριφοράς και στάσεων π.χ. έναντι του περιβάλλοντος ή των συστημάτων παραγωγής ενέργειας [69][70][71].

Αναφερόμενοι αρχικά στα εγωιστικά κίνητρα, δηλαδή την προσωπική υλική αποπληρωμή, θα πρέπει να αναφερθεί ότι η επιστροφή της επένδυσης σαφώς και επηρεάζει τα άτομα σχετικά με την απόφαση επένδυσης σε ΚΕΠ [72][73], υπό το πρίσμα παραγόντων όπως η ύπαρξη επιδοτήσεων και φορολογικών κινήτρων [74][75], η τιμή της ενέργειας και το κόστος συντήρησης των συστημάτων [76] καθώς και η μείωση δαπάνης για ενέργεια μέσω δράσεων εξοικονόμησης ενέργειας και μειωμένης κατανάλωσης [73]. Όπως αναφέρουν μάλιστα οι Holstenkamp και Kahla [72], το κίνητρο της επιστροφής της επένδυσης αυξάνει το ποσό που θα επενδύσει το κάθε άτομο στο έργο. Επιπλέον, να σημειωθεί ότι βάσει έρευνας που διεξήχθη από τον Bauwens [73], η απόδοση της επένδυσης είναι ο πιο σημαντικός καθοριστικός παράγοντας για τα μέλη μεγάλων κοινοτήτων ενδιαφέροντος, ενώ οι περιβαλλοντικοί, κοινωνικοί και άλλοι μη οικονομικοί παράγοντες τείνουν να κυριαρχούν επί των οικονομικών κινήτρων για τα μέλη μικρότερων κοινοτήτων τόπου.

Πέρα όμως από τα εγωιστικά κίνητρα, τα άτομα οδηγούνται επίσης από κοινωνικούς ή ηθικούς κανόνες συμπεριφοράς. Σε αυτό το πλαίσιο, η μελέτη των Kalkbrenner και Roosen [36] κατηγοριοποιεί τους κανόνες αυτούς σε: περιβαλλοντικούς προβληματισμούς, διαπροσωπική εμπιστοσύνη και κοινωνική αναγνώριση. Τα άτομα επιλέγουν να συμμετάσχουν σε αυτές τις πρωτοβουλίες λόγω του

ενδιαφέροντος για το περιβάλλον και την ανάπτυξη της παραγωγής ΑΠΕ. Υπό αυτήν την προοπτική, διαφορετικές μελέτες δείχνουν ότι οι περιβαλλοντικοί προβληματισμοί έχουν θετική επίδραση στην προθυμία συμμετοχής σε έργα ΚΕΠ [5][36][72][77]. Οι προβληματισμοί αυτοί μπορεί να αποτυπώνονται μέσω της ιδιοκτησίας αποκεντρωμένων ενεργειακών συστημάτων, της επιθυμίας μείωσης των εκπομπών CO_2, της περιβαλλοντική ευαισθητοποίηση, της σημασίας που αποδίδεται στην παραγωγή ΑΠΕ ή στην περιβαλλοντικά φιλική συμπεριφορά [2][36][59][73][78].

Το ζήτημα της διαπροσωπικής εμπιστοσύνης συχνά επισημαίνεται ως σημαντικό ζήτημα για τις ΚΕΠ [5][15][49][77]. Μεγάλο μέρος της βιβλιογραφίας σχετικά με την κοινοτική διαχείριση των φυσικών πόρων υποστηρίζει ότι η εμπιστοσύνη είναι απαραίτητο συστατικό για την οικοδόμηση συνεκτικών κοινοτήτων οι οποίες συνεργάζονται [79]. Εμπιστοσύνη πρέπει να υπάρχει όχι μόνο μεταξύ των μελών της κοινότητας, αλλά και μεταξύ των διαφορετικών κατηγοριών εμπλεκόμενων φορέων. Σύμφωνα με μελέτη των Goedkoop και Devine-Wright [80] πάνω σε συγκεκριμένο έργο, η έλλειψη εμπιστοσύνης επικρατούσε, με τους υπευθύνους ανάπτυξης του έργου να εκφράζουν σκεπτικισμό σχετικά με την έλλειψη ικανοτήτων και την έλλειψη αντιπροσωπευτικότητας των κοινοτικών παραγόντων, και τους φορείς της κοινότητας να βλέπουν τους υπευθύνους ανάπτυξης του έργου να οδηγούνται αποκλειστικά από το κέρδος, χρησιμοποιώντας ουσιαστικά τις κοινότητες για να αποκτήσουν τη συγκατάθεση για σχεδιασμό και ανάπτυξη του έργου.

Η κοινωνική αναγνώριση, δηλαδή η αντίληψη του ότι κανείς ανήκει σε ένα σύνολο ατόμων, παίζει επίσης ρόλο. Η σχετική βιβλιογραφία δείχνει ότι μια ισχυρή κοινωνική ταύτιση σε μια ομάδα ενθαρρύνει τις συνεργατικές συμπεριφορές [81]. Τα κοινωνικά κίνητρα περιλαμβάνουν την κοινωνική «ταύτιση» με την ΚΕΠ, την παρουσία άλλων μελών στον άμεσο κοινωνικό περίγυρο (συναδέλφους, γείτονες, φίλοι, συγγενείς κ.λπ.), τη σημασία της επιρροής ή των συμβουλών από άλλα μέλη της ΚΕΠ σχετικά με την απόφαση συμμετοχής, καθώς επίσης και την πρόθεση του να είναι κανείς μέλος μιας κοινότητας [73]. Στο πλαίσιο αυτό, πρέπει να τονισθεί ότι τα κίνητρα που επηρεάζουν μια απόφαση για ατομική επένδυση είναι διαφορετικά από αυτά που επηρεάζουν την απόφαση για μια συλλογική επένδυση, καθώς στη δεύτερη περίπτωση μπορούν να συμπεριλαμβάνονται κίνητρα όπως η ευχαρίστηση που πηγάζει από τη συμμετοχή σε μια κοινωνική ομάδα και η κοινωνική αποδοχή από την τοπική κοινότητα [72][77].

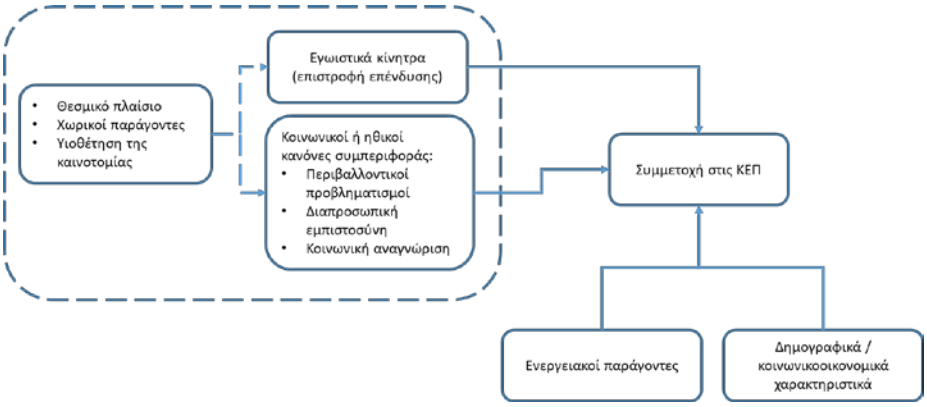
Πέραν αυτών, η σχετική σημασία των εγωιστικών κινήτρων και των συμπεριφορών που καθοδηγούνται από ηθικούς και κοινωνικούς κανόνες μπορεί να εξαρτάται από διάφορους παράγοντες [73]. Το θεσμικό πλαίσιο εντός του οποίου αλληλεπιδρούν τα μέλη των έργων ΚΕΠ είναι πιθανό να διαδραματίσει ρόλο, εκφραζόμενο μέσα από παράγοντες όπως το υφιστάμενο νομοθετικό πλαίσιο, η παροχή πληροφοριών, το ιδιοκτησιακό καθεστώς του σχήματος, η δικαιοσύνη κατά τη διανομή των αναμενόμενων οφελών, ο δημοκρατικός χαρακτήρας της συνεταιριστικής διακυβέρνησης [36][73][82]. Επίσης, χωρικοί παράγοντες (διάκριση μεταξύ κοινοτήτων τόπου και ενδιαφέροντος) [26], αλλά και η προοπτική υιοθέτησης της καινοτομίας [83] μπορούν να επηρεάσουν τα ατομικά κίνητρα για επενδύσεις και συμμετοχή σε έργα ΑΠΕ.

Επιπλέον, και καθώς αναφερόμαστε σε δραστηριότητες σχετικές με τις ΑΠΕ και την εξοικονόμηση ενέργειας, παράγοντες που σχετίζονται με την ενέργεια παίζουν επίσης τον ρόλο τους στις αποφάσεις των ατόμων σχετικά με τη συμμετοχή και την επένδυση. Η αποδοχή και οι θετικές απόψεις για τις ΑΠΕ, η ανάγκη για ενεργειακή αυτονομία της κοινότητας, η πρόθεση για συμβολή στην ενεργειακή μετάβαση και η επιθυμία για επιρροή των αποφάσεων που αφορούν τις τοπικές ενεργειακές πολιτικές μπορούν να παίξουν τον ρόλο τους [5][28][59][72][84].

Αναφορά θα πρέπει να γίνει, τέλος, στα δημογραφικά και κοινωνικοοικονομικά χαρακτηριστικά, τα οποία παίζουν επίσης σημαντικό ρόλο στην πρόθεση συμμετοχής και επένδυσης σε μια ΚΕΠ. Διαφορετικοί παράγοντες όπως η ηλικία, το φύλο η οικογενειακή κατάσταση, η εκπαίδευση, το επάγγελμα, το εισόδημα, το ιδιοκτησιακό καθεστώς της κατοικίας, το ύψος των λογαριασμών ενέργειας, η ιδιοκτησία ενός συστήματος μικροπαραγωγής βασιζόμενο στις ΑΠΕ και η περιοχή κατοικίας μπορούν να επηρεάσουν την προθυμία συμμετοχής και επένδυσης των πολιτών [2][36][76] [84][85][86]. Για παράδειγμα, σύμφωνα με τα αποτελέσματα συγκεκριμένων μελετών, τα άτομα που επενδύουν σε έργα ΚΕΠ τείνουν να είναι μεγαλύτεροι άνδρες με υψηλότερα εισοδήματα, τριτοβάθμια εκπαίδευση και υψηλότερη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας [28][77]. Οι Koirala et al. [5] τονίζουν την σημασία της ενημέρωσης και της εκπαίδευσης, καθώς εντοπίζουν ότι τόσο η εκπαίδευση, η εκπαίδευση σχετικά με την ενέργεια, και η ενημέρωση σχετικά με τις ΚΕΠ έχουν θετικό αντίκτυπο στην συμμετοχή των πολιτών. Επιπλέον, ο τόπος κατοικίας παίζει ρόλο, με τους κατοίκους αγροτικών περιοχών να έχουν περισσότερες πιθανότητες να συμμετάσχουν σε ΚΕΠ σε σχέση με τους κατοίκους των πόλεων [36]. Οι κάτοικοι αγροτικών περιοχών φαίνεται να παρακινούνται από την αύξηση της

αυτονομίας και της ανεξαρτησίας, ενώ οι κάτοικοι των αστικών περιοχών εκτιμούν την αλληλεξάρτηση και τη «σύνδεση» με άλλους ανθρώπους στην πόλη [77].

Στην Εικόνα 1 απεικονίζονται οι συσχετίσεις μεταξύ των κυρίων παραγόντων, που παρουσιάσθηκαν παραπάνω, οι οποίοι επηρεάζουν τη συμμετοχή των πολιτών στις ΚΕΠ.



Εικόνα 1. Κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν τη συμμετοχή των πολιτών στις ΚΕΠ

2.8.1. Προηγούμενες έρευνες

Παρά τη μεγάλη της σημασία, υπάρχει περιορισμένη γνώση σχετικά με την προθυμία των πολιτών να συμμετάσχουν και να επενδύσουν στις ΚΕΠ, καθώς και τους σχετικούς παράγοντες που καθορίζουν αυτήν την προθυμία.

Πολλά εμπειρικά στοιχεία για τα κίνητρα των ατόμων να συμμετάσχουν και να επενδύσουν σε πρωτοβουλίες ΚΕΠ βασίζονται σε ποιοτικά δεδομένα με μικρά δείγματα συμμετεχόντων [28][62][77] [80][84][87]. Όταν αυτά τα κίνητρα έχουν αναλυθεί ποσοτικά, η εστίαση ήταν γενικά στις προθέσεις –ή και το επίπεδο- συμμετοχής μεταξύ των μη συμμετεχόντων και όχι στα κίνητρα των πραγματικών μελών [2][5][36][65]. Οι λίγες μελέτες που αφορούν τα κίνητρα των πραγματικών μελών έχουν επικεντρωθεί στην απόφαση συμμετοχής ή μη σε έργα ΚΕΠ, αλλά συχνά παραβλέπουν το μέγεθος των επενδύσεων [88]. Οι Bauwens [82] και Holstenkamp και Kahla [72] έχουν διεξάγει τις μοναδικές μελέτες, οι οποίες αντιμετωπίζουν εμπειρικά αυτό το ζήτημα, χωρίς όμως να διερευνούν τους παράγοντες επιρροής. Από την άλλη, η μελέτη του Bauwens [73], εξετάζει τους παράγοντες που καθορίζουν το μέγεθος των επενδύσεων που πραγματοποιούν τα μέλη σε έργα των ΚΕΠ.

Το σύνολο των μελετών που παρέχουν αυτά τα εμπειρικά δεδομένα έχουν πραγματοποιηθεί σε πολύ συγκεκριμένο γεωγραφικό πλαίσιο, καθώς όλες οι μελέτες έχουν στοχεύσει σε έναν μικρό αριθμό χωρών της βόρειας και κεντρικής Ευρώπης: Γερμανία [2][28][36][72][77][87], Αυστρία [2][84][87][88], Ηνωμένο Βασίλειο [62][65][80], Ολλανδία [5][77], Βέλγιο [73][82] και Ελβετία [84].

3. ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΑ ΕΡΩΤΗΜΑΤΑ

Λαμβάνοντας υπόψη τις υφιστάμενες έρευνες σχετικά με τις ΚΕΠ, καθώς και τα κενά που υπάρχουν σε αυτές, η παρούσα έρευνα έρχεται να προτείνει τα ακόλουθα ερευνητικά ερωτήματα:

- Ποιο είναι το επίπεδο ενημέρωσης των πολιτών σχετικά με τις Ενεργειακές Κοινότητες στην Ελλάδα; Ποιοι είναι οι παράγοντες που επηρεάζουν το επίπεδο ενημέρωσης;
- Σε τι επίπεδα βρίσκεται η πρόθεση των πολιτών για συμμετοχή στις Ενεργειακές Κοινότητες στην Ελλάδα; Με ποιο τρόπο προτιμούν να συμμετάσχουν; Ποιοι είναι οι παράγοντες που επηρεάζουν αυτές τις αποφάσεις;
- Ποια είναι η πρόθεση των πολιτών να επενδύσουν στις Ενεργειακές Κοινότητες στην Ελλάδα; Ποια είναι τα χρηματοδοτικά εργαλεία τα οποία προτιμούν; Ποιοι είναι οι παράγοντες που επηρεάζουν αυτές τους τις αποφάσεις;

- Σε τι είδους δραστηριότητες προτιμούν οι πολίτες να δραστηριοποιηθούν μέσω των Ενεργειακών Κοινοτήτων στην Ελλάδα; Ποιοι είναι οι παράγοντες που επηρεάζουν τις προτιμήσεις τους;
- Ποια είναι η πρόθεση των πολιτών να συμμετέχουν και να επενδύσουν σε Ενεργειακές Κοινότητες στην Ελλάδα, στις οποίες συμμετέχουν επίσης νομικά πρόσωπα δημοσίου και ιδιωτικού δικαίου, και Ο.Τ.Α. α' και β' βαθμού; Ποιοι είναι οι παράγοντες που επηρεάζουν τις συγκεκριμένες προτιμήσεις τους;
- Υπάρχει συσχέτιση μεταξύ της πρόθεσης συμμετοχής, της πρόθεσης επένδυσης και των προτιμήσεων όσον αφορά τα χρηματοδοτικά εργαλεία, σε σχέση με το επίπεδο ενημέρωσης, το είδος δραστηριότητας και τη σύνθεση των Ενεργειακών Κοινοτήτων;
- Ποια είναι τα εμπόδια τα οποία μπορούν να επιβραδύνουν τη συμμετοχή των πολιτών στις Ενεργειακές Κοινότητες στην Ελλάδα;
- Ποιες είναι οι κατάλληλες στρατηγικές και δράσεις για την τόνωση της συμμετοχής των πολιτών στις Ενεργειακές Κοινότητες στην Ελλάδα; Ποια είναι τα κρίσιμα μαθήματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη από τις χώρες του ευρωπαϊκού νότου, στις οποίες η έλλειψη ευέλικτων και ευνοϊκών νομοθετικών πλαισίων, πολιτικών και όρων αποτελούν βασικά εμπόδια για την ανάπτυξη των ΚΕΠ;

Προκειμένου να διερευνηθούν τα ανωτέρω ερωτήματα, η παρούσα έρευνα θα ακολουθήσει τα παρακάτω βήματα: α) ποιοτική έρευνα μέσα από τη διεξαγωγή ημι-δομημένων συνεντεύξεων, β) ποσοτική έρευνα μέσω έρευνας ερωτηματολογίου και πειραμάτων επιλογής (choice experiments), και γ) αξιοποίηση των αποτελεσμάτων μέσα από τη δημιουργία σεναρίων ανάπτυξης και παρουσίασης συστάσεων στα πλαίσια της διάδοσης των Ενεργειακών Κοινοτήτων στην Ελλάδα.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία αποτελεί τμήμα έρευνας η οποία στοχεύει στην μελέτη των απόψεων και της συμπεριφοράς των πολιτών όσον αφορά την ενημέρωση, συμμετοχή και επένδυση στις Ενεργειακές Κοινότητες. Υπό αυτό το πρίσμα, η παρούσα εργασία παρουσιάζει τα ευρήματα που προκύπτουν από τα αρχικά στάδια της έρευνας, και συγκεκριμένα α) την αποτύπωση της υφιστάμενης κατάστασης όσον αφορά τις Ενεργειακές Κοινότητες στην Ελλάδα, β) τη βιβλιογραφική ανασκόπηση των παραγόντων που επηρεάζουν την ενημέρωση, τη συμμετοχή και την επένδυση σε κοινοτικές ενεργειακές πρωτοβουλίες, καθώς και των σχετικών εμποδίων διείσδυσης και μέτρων ενίσχυσης, και γ) την αποτύπωση των ερευνητικών ερωτημάτων, τα οποία θα αποτελέσουν τα επόμενα βήματα της έρευνας. Μέσω της διερεύνησης αυτών των ερωτημάτων, θα επιτευχθεί τόσο η παροχή νέων εμπειρικών δεδομένων σε ένα τομέα που έχει ερευνηθεί μέχρι στιγμής σε μικρό βαθμό, όσο και η έρευνα καινοτόμων θεμάτων πάνω στις ΚΕΠ. Συγκεκριμένα, μέσω της εξέτασης των ελληνικών ΕΚΟΙΝ, θα προκύψουν νέα εμπειρικά αποτελέσματα σχετικά με την πρόθεση και το επίπεδο συμμετοχής και επένδυσης των πολιτών σε ΚΕΠ, καθώς και τα εμπόδια που μπορεί να προκύψουν. Από την άλλη, θέματα που θα εξετασθούν για πρώτη φορά στο πλαίσιο των ΚΕΠ αφορούν το επίπεδο ενημέρωσης των πολιτών, τα χρηματοδοτικά εργαλεία που προτιμούν, τα είδη των δραστηριοτήτων στα οποία επιθυμούν να δραστηριοποιηθούν, οι προτιμήσεις τους σχετικά με τη σύνθεση των ΕΚΟΙΝ, καθώς και οι συσχετίσεις που μπορεί να υπάρχουν μεταξύ των υπό διερεύνηση θεμάτων.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα έρευνα συγχρηματοδοτείται από την Ελλάδα και την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού, Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση», στο πλαίσιο της Πράξης «Ενίσχυση Μεταδιδακτόρων ερευνητών/ερευνητριών - Β΄ Κύκλος» (MIS-5033021), που υλοποιεί το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών (ΙΚΥ).

Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο

Επιχειρησιακό Πρόγραμμα
Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού, Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση
Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης

ΕΣΠΑ 2014-2020

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Liedtke, C., Baedeker, C., Hasselkuß, M., Rohn, H. and Grinewitschus, V., 2015, "User-integrated innovation in Sustainable LivingLabs: an experimental infrastructure for researching and developing sustainable product service systems", Journal of Cleaner Production, 97, pp.106-116.

[2] Bamberg, S., Rees, J. and Seebauer, S., 2015, "Collective climate action: Determinants of participation intention in community-based pro-environmental initiatives", Journal of Environmental Psychology, 43, pp.155-165.

[3] Koirala, B.P., Koliou, E., Friege, J., Hakvoort, R.A. and Herder, P.M., 2016, "Energetic communities for community energy: A review of key issues and trends shaping integrated community energy systems", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 56, pp.722-744.

[4] Avelino, F., Bosman, R., Frantzeskaki, N., Akerboom, S., Boontje, P., Hoffman, J., Paradies, G., Pel, B., Scholten, D. and Wittmayer, J., 2014, "The (self-) governance of community energy: Challenges & prospects", DRIFT: Rotterdam, The Netherlands.

[5] Koirala, B.P., Araghi, Y., Kroesen, M., Ghorbani, A., Hakvoort, R.A. and Herder, P.M., 2018, "Trust, awareness, and independence: Insights from a socio-psychological factor analysis of citizen knowledge and participation in community energy systems", Energy Research & Social Science, 38, pp.33-40.

[6] Oteman, M., Wiering, M. and Helderman, J.K., 2014, "The institutional space of community initiatives for renewable energy: a comparative case study of the Netherlands, Germany and Denmark", Energy, Sustainability and Society, 4(1), pp.1-17.

[7] Heras-Saizarbitoria, I., Sáez, L., Allur, E. and Morandeira, J., 2018, "The emergence of renewable energy cooperatives in Spain: A review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 94, pp.1036-1043.

[8] Wirth, S., 2014, "Communities matter: Institutional preconditions for community renewable energy", Energy Policy, 70, pp.236-246.

[9] Heinrich Böll Stiftung, 2019, "ΧΤΙΖΟΝΤΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΚΟΙΝΟΤΗΤΕΣ – Η ενέργεια στα χέρια των πολιτών", Θεσσαλονίκη.

[10] ELECTRA ENERGY, 2020, "Χαρτογράφηση των Ενεργειακών Κοινοτήτων στην Ελλάδα", Παραδοτέο 1.1, 07.12.2020

[11] REScoop.eu, Greenpeace, WWF Ελλάς and Electra Energy, 2021, "Ανάπτυξη των ενεργειακών κοινοτήτων στην Ελλάδα: Προκλήσεις και προτάσεις", Φεβρουάριος 2021.

[12] Seyfang, G., Park, J.J. and Smith, A., 2013, "A thousand flowers blooming? An examination of community energy in the UK", Energy Policy, 61, pp.977-989.

[13] Brummer, V., 2018, "Community energy–benefits and barriers: A comparative literature review of Community Energy in the UK, Germany and the USA, the benefits it provides for society and the barriers it faces", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 94, pp.187-196.

[14] Ruggiero, S., Onkila, T. and Kuittinen, V., 2014, "Realizing the social acceptance of community renewable energy: A process-outcome analysis of stakeholder influence", Energy Research & Social Science, 4, pp.53-63.

[15] Van Der Schoor, T. and Scholtens, B., 2015, "Power to the people: Local community initiatives and the transition to sustainable energy", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 43, pp.666-675.

[16] Yalçın-Riollet, M., Garabuau-Moussaoui, I. and Szuba, M., 2014, "Energy autonomy in Le Mené: A French case of grassroots innovation", Energy Policy, 69, pp.347-355.

[17] Walker, G., Simcock, N. and Smith, S.J., 2012, Community Energy Systems, International Encyclopedia of Housing and Home, 1st ed., Smith, SJ, Ed., pp.194-198.

[18] Beggio, G., and Kusch, S., 2015, "Renewable energy cooperatives: main features and success factors in collectively implementing energy transition" QUAESTI – Proceedings of the 3rd virtual multidisciplinary conference.

[19] International Co-operative Alliance (ICA), n.d., Available from: http://ica.coop/en/whats-co-op/co-operative-identity-values-principles.

[20] Hoffman, S.M. and High-Pippert, A., 2010, "From private lives to collective action: Recruitment and participation incentives for a community energy program", Energy Policy, 38(12), pp.7567-7574.

[21] Hoppe, T., Graf, A., Warbroek, B., Lammers, I. and Lepping, I., 2015, "Local governments supporting local energy initiatives: Lessons from the best practices of Saerbeck (Germany) and Lochem (The Netherlands)", Sustainability, 7(2), pp.1900-1931.

[22] Romero-Rubio, C. and de Andrés Díaz, J.R., 2015, "Sustainable energy communities: a study contrasting Spain and Germany" Energy Policy, 85, pp.397-409.

[23] Nolden, C., 2013, "Governing community energy—Feed-in tariffs and the development of community wind energy schemes in the United Kingdom and Germany", Energy Policy, 63, pp.543-552.

[24] Haggett, C. and Aitken, M., 2015, "Grassroots energy innovations: The role of community ownership and investment", Current Sustainable/Renewable Energy Reports, 2(3), pp.98-104.

[25] Allen, J., Sheate, W.R. and Diaz-Chavez, R., 2012, "Community-based renewable energy in the Lake District National Park–local drivers, enablers, barriers and solutions", Local Environment, 17(3), pp.261-280.

[26] Heiskanen, E., Johnson, M., Robinson, S., Vadovics, E. and Saastamoinen, M., 2010, "Low-carbon communities as a context for individual behavioural change", Energy Policy, 38(12), pp.7586-7595.

[27] Becker, S., Kunze, C. and Vancea, M., 2017, "Community energy and social entrepreneurship: Addressing purpose, organisation and embeddedness of renewable energy projects", Journal of Cleaner Production, 147, pp.25-36.

[28] Yildiz, Ö., Rommel, J., Debor, S., Holstenkamp, L., Mey, F., Müller, J.R., Radtke, J. and Rognli, J., 2015, "Renewable energy cooperatives as gatekeepers or facilitators? Recent developments in Germany and a multidisciplinary research agenda", Energy Research & Social Science, 6, pp.59-73.

[29] Bouffard, F. and Kirschen, D.S., 2008, "Centralised and distributed electricity systems", Energy Policy, 36(12), pp.4504-4508.

[30] Beermann, J. and Tews, K., 2017, "Decentralised laboratories in the German energy transition. Why local renewable energy initiatives must reinvent themselves", Journal of Cleaner Production, 169, pp.125-134.

[31] Li, L.W., Birmele, J., Schaich, H. and Konold, W., 2013, "Transitioning to community-owned renewable energy: Lessons from Germany" Procedia Environmental Sciences, 17, pp.719-728.

[32] Allen, S.R., Hammond, G.P. and McManus, M.C., 2008, "Prospects for and barriers to domestic micro-generation: A United Kingdom perspective", Applied Energy, 85(6), pp.528-544.

[33] Verbong, G.P. and Geels, F.W., 2010, "Exploring sustainability transitions in the electricity sector with socio-technical pathways", Technological Forecasting and Social Change, 77(8), pp.1214-1221.

[34] Klagge, B. and Meister, T., 2018, "Energy cooperatives in Germany–an example of successful alternative economies?", Local Environment, 23(7), pp.697-716.

[35] Mendes, G., Ioakimidis, C. and Ferrão, P., 2011, "On the planning and analysis of Integrated Community Energy Systems: A review and survey of available tools" Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15(9), pp.4836-4854.

[36] Kalkbrenner, B.J. and Roosen, J., 2016, "Citizens' willingness to participate in local renewable energy projects: The role of community and trust in Germany", Energy Research & Social Science, 13, pp.60-70.

[37] Moroni, S., Alberti, V., Antoniucci, V. and Bisello, A., 2019, "Energy communities in the transition to a low-carbon future: A taxonomical approach and some policy dilemmas", Journal of environmental management, 236, pp.45-53.

[38] Mitchell, C., Bauknecht, D. and Connor, P.M., 2006, "Effectiveness through risk reduction: a comparison of the renewable obligation in England and Wales and the feed-in system in Germany", Energy Policy, 34(3), pp.297-305.

[39] Sørensen, H.C., Larsen, J.H., Olsen, F.A., Svenson, J. and Hansen, S.R., 2000, "Middelgrunden 40 MW offshore wind farm, a prestudy for the Danish offshore 750 mw wind program", In The Tenth International Offshore and Polar Engineering Conference, International Society of Offshore and Polar Engineers.

[40] Bauwens, T., Gotchev, B. and Holstenkamp, L., 2016, "What drives the development of community energy in Europe? The case of wind power cooperatives", Energy Research & Social Science, 13, pp.136-147.

[41] Roberts, J., Bodman, F. and Rybski, R., 2014, "Community power: model legal frameworks for citizen-owned renewable energy", Client Earth Energy, 1, pp.271-295.

[42] Yildiz, Ö., 2014, "Financing renewable energy infrastructures via financial citizen participation–The case of Germany" Renewable Energy, 68, pp.677-685.

[43] Salm, S., Hille, S.L. and Wüstenhagen, R., 2016, "What are retail investors' risk-return preferences towards renewable energy projects? A choice experiment in Germany", Energy Policy, 97, pp.310-320.

[44] Huybrechts, B. and Mertens de Wilmars, S., 2011, "Renewable Energy Source Cooperatives (REScoops): Assets, Obstacles and Diffusion Strategies", Proceedings of the 3rd EMES research conference on social enterprise. EMES European Research Network, 2-5 July, Roskilde, Denmark.

[45] Community Power, 2016, "Friends of the Earth and REScoop. The benefits of community ownership of renewable energy".

[46] Creupelandt, D. and Vansintjan, D., 2014, Deliverable2. 3. REScoop—Mobilizing European Citizens to Invest in Sustainable Energy. H2020-EE-2014-4-PDA-649767.

[47] Soeiro, S. and Dias, M.F., 2020, "Energy cooperatives in southern European countries: Are they relevant for sustainability targets?", Energy Reports, 6, pp.448-453.

[48] Coenen, F.H.J.M., Hoppe, T., Chalkiadakis, G., Tsoutsos, T. and Akasiadis, C., 2017, "Exploring energy saving policy measures by renewable energy supplying cooperatives (REScoops)", In Proceedings of the ECEEE.

[49] Walker, G., Devine-Wright, P., Hunter, S., High, H. and Evans, B., 2010, "Trust and community: Exploring the meanings, contexts and dynamics of community renewable energy", Energy Policy, 38(6), pp.2655-2663.

[50] Warren, C.R. and McFadyen, M., 2010, "Does community ownership affect public attitudes to wind energy? A case study from south-west Scotland", Land Use Policy, 27(2), pp.204-213.

[51] Bauwens, T. and Devine-Wright, P., 2018, "Positive energies? An empirical study of community energy participation and attitudes to renewable energy", Energy Policy, 118, pp.612-625.

[52] Howard, M.W., 2014, "The Integrated Grid: Realizing the Full Value of Central and Distributed Energy Resources", The ICER Chronicle Edition 2, July 2014, 1, p.32.

[53] Walker, G., 2008, "What are the barriers and incentives for community-owned means of energy production and use?", Energy Policy, 36(12), pp.4401-4405.

[54] Ortiz, W., Dienst, C. and Terrapon-Pfaff, J., 2012, "Introducing modern energy services into developing countries: the role of local community socio-economic structures", Sustainability, 4(3), pp.341-358.

[55] Madriz-Vargas, R., Bruce, A. and Watt, M., 2018, "The future of Community Renewable Energy for electricity access in rural Central America", Energy Research & Social Science, 35, pp.118-131.

[56] Fafchamps, M., 2006, "Development and social capital", The Journal of Development Studies, 42(7), pp.1180-1198.

[57] Mignon, I. and Rüdinger, A., 2016, "The impact of systemic factors on the deployment of cooperative projects within renewable electricity production – An international comparison", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 65, pp.478-488.

[58] Watson, J., Sauter, R., Bahaj, A.S., James, P.A.B., Myers, L.E. and Wing, R., 2006, "Unlocking the Power House: Policy and system change for domestic micro-generation in the UK".

[59] Boon, F.P. and Dieperink, C., 2014, "Local civil society based renewable energy organisations in the Netherlands: Exploring the factors that stimulate their emergence and development", Energy Policy, 69, pp.297-307.

[60] Herbes, C., Brummer, V., Rognli, J., Blazejewski, S. and Gericke, N., 2017, "Responding to policy change: New business models for renewable energy cooperatives – Barriers perceived by cooperatives' members", Energy Policy, 109, pp.82-95.

[61] Centgraf, S., 2018, “Supporting civic engagement in German energy cooperatives–Transdisciplinary research based on the reflection of individual needs”, Energy Research & Social Science, 44, pp.112-121.

[62] Bomberg, E. and McEwen, N., 2012, “Mobilizing community energy”, Energy Policy, 51, pp.435-444.

[63] Bauwens, T., 2013, “What roles for energy cooperatives in the diffusion of distributed generation technologies?”, Available at SSRN 2382596.

[64] Geelen, D., Reinders, A. and Keyson, D., 2013, “Empowering the end-user in smart grids: Recommendations for the design of products and services”, Energy Policy, 61, pp.151-161.

[65] Rogers, J.C., Simmons, E.A., Convery, I. and Weatherall, A., 2008, “Public perceptions of opportunities for community-based renewable energy projects”, Energy Policy, 36(11), pp.4217-4226.

[66] Jullien, C., Serkine, P., Miller, M., Bubeck, S. and Fahl, U., 2016, “End-users: The trigger to shape the European Energy System”, Insight Energy.

[67] Masini, A. and Menichetti, E., 2012, “The impact of behavioural factors in the renewable energy investment decision making process: Conceptual framework and empirical findings”, Energy Policy, 40, pp.28-38.

[68] Masini, A. and Menichetti, E., 2013, “Investment decisions in the renewable energy sector: An analysis of non-financial drivers”, Technological Forecasting and Social Change, 80(3), pp.510-524.

[69] Nilsson, J., 2008, “Investment with a conscience: Examining the impact of pro-social attitudes and perceived financial performance on socially responsible investment behaviour”, Journal of Business Ethics, 83(2), pp.307-325.

[70] Ameli, N. and Brandt, N., 2015, “Determinants of households’ investment in energy efficiency and renewables: evidence from the OECD survey on household environmental behaviour and attitudes”, Environmental Research Letters, 10(4), p.044015.

[71] Gamel, J., Menrad, K. and Decker, T., 2016, “Is it really all about the return on investment? Exploring private wind energy investors' preferences”, Energy Research & Social Science, 14, pp.22-32.

[72] Holstenkamp, L. and Kahla, F., 2016, “What are community energy companies trying to accomplish? An empirical investigation of investment motives in the German case”, Energy Policy, 97, pp.112-122.

[73] Bauwens, T., 2019, “Analyzing the determinants of the size of investments by community renewable energy members: Findings and policy implications from Flanders”, Energy Policy, 129, pp.841-852.

[74] Bolinger, M.A., 2005, “Making European-style community wind power development work in the US”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 9(6), pp.556-575.

[75] Breukers, S. and Wolsink, M., 2007, “Wind power implementation in changing institutional landscapes: An international comparison”, Energy Policy, 35(5), pp.2737-2750.

[76] Sardianou, E. and Genoudi, P., 2013, “Which factors affect the willingness of consumers to adopt renewable energies?”, Renewable Energy, 57, pp.1-4.

[77] Dóci, G. and Vasileiadou, E., 2015, ““Let’ s do it ourselves” Individual motivations for investing in renewables at community level”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 49, pp.41-50.

[78] Noppers, E.H., Keizer, K., Bockarjova, M. and Steg, L., 2015, “The adoption of sustainable innovations: The role of instrumental, environmental, and symbolic attributes for earlier and later adopters”, Journal of Environmental Psychology, 44, pp.74-84.

[79] Ostrom, E. and Walker, J. eds., 2003, Trust and reciprocity: Interdisciplinary lessons for experimental research, Russell Sage Foundation.

[80] Goedkoop, F. and Devine-Wright, P., 2016, “Partnership or placation? The role of trust and justice in the shared ownership of renewable energy projects”, Energy Research & Social Science, 17, pp.135-146.

[81] Tyler, T.R. and Blader, S.L., 2001, “Identity and cooperative behavior in groups”, Group Processes & Intergroup Relations, 4(3), pp.207-226.

[82] Bauwens, T., 2016, “Explaining the diversity of motivations behind community renewable energy”, Energy Policy, 93, pp.278-290.

[83] Bergek, A., Berggren, C., Magnusson, T. and Hobday, M., 2013, “Technological discontinuities and the challenge for incumbent firms: Destruction, disruption or creative accumulation?”, Research Policy, 42(6-7), pp.1210-1224.

[84] Broughel, A.E. and Hampl, N., 2018, “Community financing of renewable energy projects in Austria and Switzerland: Profiles of potential investors”, Energy Policy, 123, pp.722-736.

[85] Fraune, C., 2015, “Gender matters: Women, renewable energy, and citizen participation in Germany”, Energy Research & Social Science, 7, pp.55-65.

[86] Höfer, H.H. and Rommel, J., 2015, “Internal governance and member investment behavior in energy cooperatives: An experimental approach”, Utilities Policy, 36, pp.52-56.

[87] Schreuer, A., 2012, “Collective citizen ownership of green electricity plants. Country case studies Austria and Germany”, WP3 Report within the project “Energy cooperatives and local ownership in the field of renewable energy technologies as social innovation processes in the energy system”.

[88] Fleiß, E., Hatzl, S., Seebauer, S. and Posch, A., 2017, “Money, not morale: The impact of desires and beliefs on private investment in photovoltaic citizen participation initiatives”, Journal of Cleaner Production, 141, pp.920-927.

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΜΕΤΑΒΑΣΗ ΚΑΙ Η ΔΙΑΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΧΩΡΟΥ: ΤΟ ΕΙΔΙΚΟ ΧΩΡΟΤΑΞΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΩΝ ΑΠΕ ΚΑΙ Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΚΕΝΤΡΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ

Μιλτιάδης Τόσκας-Τάσιος [1*], Ελισάβετ Θωίδου [2]

[1] Υποψ. Διδάκτορας, Τμήμα Μηχανικών Χωροταξίας και Ανάπτυξης ΑΠΘ
[2] Αναπλ. Καθηγήτρια, Τμήμα Μηχανικών Χωροταξίας και Ανάπτυξης ΑΠΘ
* *54124,* Θεσσαλονίκη, Ελλάδα, email: milttosk@plandevel.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η κλιματική αλλαγή σε συνδυασμό με την αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο θέτει στο επίκεντρο την ανάγκη της ενεργειακής μετάβασης, η οποία σε μεγάλο βαθμό αφορά τη μετάβαση σε συστήματα ανανεώσιμης ενέργειας. Ενώ η αύξηση της παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ κινείται σε σωστή κατεύθυνση για τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής, η εγκατάσταση ΑΠΕ έρχεται συχνά αντιμέτωπη με προβλήματα που αφορούν τη χωροθέτησή τους, καθώς μπορεί να έχει αρνητικές επιπτώσεις στη γη, το τοπίο, τη φύση και το ευρύτερο περιβάλλον. Τα προηγούμενα χρόνια, οι συζητήσεις σχετικά με την ενεργειακή μετάβαση επικεντρώνονταν στη χρονική διάσταση βάσει των επιδιωκόμενων ενεργειακών στόχων, αμελώντας συχνά τόσο τον τρόπο με τον οποίο η ενεργειακή μετάβαση διαμορφώνει τον χώρο όσο και το πως η παράμετρος του χώρου επηρεάζει τα ενεργειακά συστήματα. Σήμερα, με την εξάπλωση των ΑΠΕ, δεδομένης και της έκκλησης για παγκόσμια απαλλαγή από τον άνθρακα, αναδεικνύεται η χωρική διάσταση της ενεργειακής μετάβασης, όπως φαίνεται με τα προβλήματα που αφορούν τη χωροθέτηση των ΑΠΕ. Τα πολύ διαφορετικά χαρακτηριστικά των ΑΠΕ από τα ορυκτά καύσιμα συνδέονται με τις χωρικές διαστάσεις της ενεργειακής μετάβασης, δηλαδή τη ζήτηση για γη και τις συγκρούσεις των δραστηριοτήτων πάνω στη γη προκειμένου να χωροθετηθούν οι ΑΠΕ. Αν και οι απαιτήσεις σε γη για παραγωγή ενέργειας είναι μικρές (περίπου 2% της συνολικής έκτασης της γης παγκοσμίως) η χωρική διάσταση είναι σημαντική τόσο λόγω των πιθανών δυσμενών επιπτώσεων στο έδαφος, το τοπίο και το περιβάλλον, όσο και λόγω των πιθανών συγκρούσεων με άλλες χρήσεις. Έτσι, το ζήτημα της χρήσης και της πληρότητας της γης και γενικότερα η σχέση με τη χωρική διάσταση των ΑΠΕ, αποτελούν ουσιώδη κριτήρια για την ορθή εφαρμογή τους. Το θέμα αυτό έχει πρόσφατα αποκτήσει εξέχουσα θέση σε παγκόσμιο επίπεδο. Στην Ελλάδα, οι κατευθύνσεις για τη χωρική οργάνωση των ΑΠΕ παρέχονται από τον χωροταξικό σχεδιασμό με το Ειδικό Χωροταξικό Πλαίσιο των ΑΠΕ σε εθνικό επίπεδο καθώς και με τα Περιφερειακά Χωροταξικά Πλαίσια.

Στην παρούσα εισήγηση, επιδιώκεται η ανάλυση τόσο των χωρικών διαστάσεων της ενεργειακής μετάβασης όσο και του τρόπου με τον οποίο αυτές αντιμετωπίζονται μέσω του χωροταξικού σχεδιασμού στην Ελλάδα. Ειδικότερα διερευνάται πως αντιμετωπίζεται στο Ειδικό Χωροταξικό Πλαίσιο των ΑΠΕ η έννοια της ενεργειακής μετάβασης καθώς και τα χωρικά χαρακτηριστικά των ΑΠΕ. Στη συνέχεια, η εισήγηση εστιάζει στην περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας και εξετάζει πως εμφανίζεται η ενεργειακή μετάβαση και πως τα δύο σχέδια, το Ειδικό Χωροταξικό των ΑΠΕ και το Περιφερειακό Χωροταξικό Πλαίσιο, αντιμετωπίζουν τα χωρικά χαρακτηριστικά των ΑΠΕ και τα συνδέουν με τα χαρακτηριστικά χωρικής οργάνωσης της περιοχής.

Λέξεις Κλειδιά: Ενεργειακή Μετάβαση, Χωροταξικός Σχεδιασμός, Ειδικό Χωροταξικό Πλαίσιο των ΑΠΕ, Περιφερειακό Χωροταξικό Πλαίσιο

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Από την εμφάνισή του ο χωροταξικός σχεδιασμός συνδέθηκε με την κατανομή των ανθρωπίνων δραστηριοτήτων στον χώρο και τη σχέση της με τους φυσικούς πόρους και το περιβάλλον [1]. Σύμφωνα με τη μελέτη "The EU Compendium of Spatial Planning Systems and Policies" «ο χωρικός σχεδιασμός αναφέρεται στις μεθόδους που χρησιμοποιούνται πρωτίστως από τον δημόσιο τομέα για να επηρεάσουν τη μελλοντική κατανομή των δραστηριοτήτων στον χώρο. Αναλαμβάνεται με στόχο τη δημιουργία μιας πιο ορθολογικής οργάνωσης των χρήσεων γης και των συνδέσεων μεταξύ τους, την εξισορρόπηση των απαιτήσεων για ανάπτυξη με την ανάγκη προστασίας του περιβάλλοντος και την επίτευξη κοινωνικών και οικονομικών στόχων» [2]. Δεδομένου βέβαια ότι πολλές δραστηριότητες ανταγωνίζονται για γη, η χωροταξία παίζει ένα ρόλο ρυθμιστή και διαιτητή ανάμεσα σε ανταγωνιστικές πιέσεις, αλλά και ρόλο προστάτη της κληρονομιάς τόσο του φυσικού όσο και του ανθρωπογενούς περιβάλλοντος. Κατά συνέπεια, η γη και το περιβάλλον είναι κατά κύριο λόγο το αντικείμενο του χωροταξικού σχεδιασμού [3].

Σε αυτήν τη διαδικασία λαμβάνουν μέρος σημαντικές ανθρώπινες δραστηριότητες που αφορούν την παραγωγή (γεωργία, βιομηχανία, δασοκομία, τουρισμός), την κατοικία, τις μεταφορές, τις επικοινωνίες, την παραγωγή ενέργειας, την αναψυχή, που αποτυπώνονται στον χώρο ως χρήσεις γης και δίκτυα. Δεδομένου ότι τα ενεργειακά συστήματα αποτελούν βασικές υποδομές για την παραγωγική διαδικασία και την ποιότητα ζωής, είναι επίσης ένα σημαντικό ζήτημα που αφορά τον χωροταξικό σχεδιασμό. Τα πλαίσια και οι συγκεκριμένες επιλογές για την παραγωγή, διανομή, και κατανάλωση ενέργειας τίθενται είτε οργανωμένα κατά τη διαδικασία σχεδιασμού ή προκύπτουν κατά περίπτωση χωρίς σχεδιασμό και συχνά με αρνητικές επιπτώσεις στην ενεργειακή αποδοτικότητα αλλά και το περιβάλλον [4].

Από την πλευρά της κατανάλωσης ενέργειας, η εξασφάλιση στέγασης και τροφής, η εργασία και η αναψυχή, οι μεταφορές και οι επικοινωνίες αποτελούν θεμελιώδεις χωρικές λειτουργίες [5]. Οι λειτουργίες αυτές πραγματοποιούνται στον χώρο σε συγκεκριμένες εδαφικές συγκεντρώσεις (οικισμοί, βιομηχανικές περιοχές κ.α.) που συνδέονται μεταξύ τους με δίκτυα (μεταφορών, διανομής ενέργειας) επί των οποίων πραγματοποιούνται συγκεκριμένες ροές. Σε όλες αυτές τις λειτουργίες, η ενέργεια αποτελεί την κινητήρια δύναμη. Συνεπώς, κάθε δραστηριότητα από τις παραπάνω απαιτεί και καταναλώνει μεγάλα ποσά ενέργειας.

Από την πλευρά της παραγωγής ενέργειας, έχει αναδειχθεί η αναγκαιότητα της μετάβασης στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) ως αναπόφευκτη αλλά και αναγκαία συνθήκη για τη βιώσιμη ανάπτυξη [6,7]. Τόσο η μείωση του αποθέματος των ορυκτών καυσίμων όσο και οι περιβαλλοντικές τους επιπτώσεις επιτάσσουν αυτήν τη μετάβαση, καθώς η στροφή της τεχνολογίας στην ανεύρεση και εκμετάλλευση πηγών ενέργειας όπως η ηλιακή, αιολική, γεωθερμική, θα επιφέρει σημαντικά οφέλη προς τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής [8]. Οι χωρικές διαστάσεις έχουν και εδώ καθοριστική σημασία, καθώς η εγκατάσταση των ΑΠΕ αποτελεί ένα σύνθετο ζήτημα που απασχολεί τις σύγχρονες κοινωνίες. Παρόλο που η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας δεν είναι απαλλαγμένη από αντιπαραθέσεις, αποτελεί τη βάση για κάθε βιώσιμο ενεργειακό σύστημα [9]. Αν και οι τεχνολογίες ορυκτών καυσίμων έχουν επίσης χωρικό αποτύπωμα, οι ΑΠΕ απαιτούν τη διάθεση μεγάλων εκτάσεων γης [10,11]. Συνολικά η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες τεχνολογίες συνεπάγεται τη χρήση μεγαλύτερων εκτάσεων γης ανά μονάδα παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας σε σχέση με τις παραδοσιακές μορφές ενέργειας [12]. Έτσι, το ζήτημα της χρήσης της γης και γενικότερα η σχέση με τη χωρική διάσταση των ΑΠΕ, αποτελούν ουσιώδη κριτήρια για την ορθή εφαρμογή τους αλλά και σημαντικό ζήτημα για τη χωρική οργάνωση και το περιβάλλον.

Στην παρούσα εργασία, η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τη διερεύνηση αυτού του ζητήματος περιλαμβάνει τη διερεύνηση της διαθέσιμης βιβλιογραφίας με σκοπό τον καθορισμό βασικών εννοιών και τον προσδιορισμό του τρόπου με τον οποίο ο χωροταξικός σχεδιασμός συνδέεται με την ενεργειακή μετάβαση. Η βιβλιογραφική ανάλυση περιλάμβανε συλλογή σχετικών εργασιών και λεπτομερή ανασκόπηση και ανάλυση τους. Η αναζήτηση πραγματοποιήθηκε με βάση λέξεις-κλειδιά σε έγγραφα συνεδρίων, άρθρα περιοδικών από επιστημονικές βάσεις δεδομένων καθώς και σχετικά βιβλία. Στη συνέχεια μελετήθηκαν κείμενα που αφορούν το Ελληνικό σύστημα χωρικού σχεδιασμού αλλά και τον ρόλο του στην ενεργειακή μετάβαση, ιδιαίτερα στην περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας. Το υπόλοιπο της παρούσας εισήγησης, χωρίζεται σε 4 ενότητες. Στην ενότητα 2 διερευνάται η έννοια της ενεργειακής μετάβασης και εξετάζονται οι χωρικές της διαστάσεις. Στη συνέχεια, η ενότητα 3 εστιάζει στη σύνδεση του χωροταξικού σχεδιασμού με την ενεργειακή μετάβαση ενώ αναλύεται και η

χωροταξική προσέγγιση στην ανάπτυξη των ΑΠΕ τόσο σε χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ) όσο και στην Ελλάδα. Στην ενότητα 4 εστιάζουμε στην ενεργειακή μετάβαση που συντελείται στην περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας καθώς και στα χωροταξικά πλαίσια που διέπουν την ενεργειακή μετάβαση στην υπό μελέτη περιφέρεια. Τέλος εξάγονται και παρουσιάζονται ορισμένα συμπεράσματα στην ενότητα 5.

2. Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΜΕΤΑΒΑΣΗΣ ΚΑΙ ΟΙ ΧΩΡΙΚΕΣ ΤΗΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ

Σύμφωνα με σχετική μελέτη [13], η έννοια της ενεργειακής μετάβασης χρησιμοποιείται σήμερα ευρέως στις μελέτες για την ενέργεια και έχει ενσωματωθεί στις εθνικές ενεργειακές πολιτικές ορισμένων χωρών. Σε ορισμένες περιοχές του παγκόσμιου Νότου, η ενεργειακή μετάβαση συνεπάγεται σημαντική αύξηση της διαθεσιμότητας και της οικονομικής προσιτότητας των σύγχρονων ενεργειακών υπηρεσιών και σε ορισμένες ιδιαίτερες περιστάσεις, αυτό μπορεί να σημαίνει αύξηση της χρήσης άνθρακα [14,13]. Στις «μεταβατικές οικονομίες» της Κεντρικής Ευρώπης και της πρώην Σοβιετικής Ένωσης, η ενεργειακή μετάβαση διαμορφώνεται κυρίως ως «απελευθέρωση» του ενεργειακού τομέα, με βασικές αλλαγές στη δομή της ιδιοκτησίας και τον ρόλο του ανταγωνισμού [15,13]. Από την άλλη, σε περιοχές όπως το Ηνωμένο Βασίλειο, η ενεργειακή μετάβαση ορίζεται εντός της κυβερνητικής πολιτικής ως κίνηση προς ένα μέλλον «ασφαλούς και χαμηλής εκπομπής άνθρακα» [16,13].

Όσον αφορά την ΕΕ., τον Νοέμβριο του 2018 η Ευρωπαϊκή Επιτροπή [17] παρουσίασε την αναλυτική βάση για την ανάπτυξη μιας μακροπρόθεσμης στρατηγικής της ΕΕ για το κλίμα και την ενεργειακή πολιτική με σκοπό την επίτευξη "κλιματικής ουδετερότητας" στην Ευρώπη μέχρι το 2050. Αυτό απαιτεί έναν σαρωτικό μετασχηματισμό του ενεργειακού συστήματος, που θα περιλαμβάνει πλήρη επανασχεδιασμό των τομέων της ενέργειας, των κτιρίων, των μεταφορών και του βιομηχανικού κλάδου. Το 2030 είναι ένα σημαντικό ορόσημο για την Ευρωπαϊκή ενεργειακή μετάβαση, η οποία τελικά στοχεύει στην επίτευξη μιας οικονομίας ουδέτερης ως προς τον άνθρακα.

Ωστόσο, για πολύ καιρό, από την ανακάλυψη του πετρελαίου και του φυσικού αερίου, η χωρική διάσταση των πηγών ενέργειας ήταν υποτιμημένη. Πολλές από τις δραστηριότητες που αφορούν τη χρήση των συγκεκριμένων πόρων πραγματοποιούνται υπόγεια ή σε σημεία που δεν είναι σε άμεση επαφή με την πλειοψηφία των ανθρώπων. [18,19]. Με την εισαγωγή τεχνολογιών όπως οι ανεμογεννήτριες, οι ηλιακοί συλλέκτες και οι εγκαταστάσεις βιομάζας, η παραγωγή ενέργειας καταλαμβάνει ολοένα και περισσότερη γη. Επιπρόσθετα, δεδομένου ότι οι νέες τεχνολογίες είναι καταλληλότερες για αποκεντρωμένη παραγωγή ενέργειας, τα σημεία παραγωγής πιθανόν να διασκορπιστούν στον χώρο, αλλάζοντας και τον τρόπο με τον οποίο οι περιοχές και οι άνθρωποι θα επηρεαστούν από αυτά. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχουν λοιπόν πολύ διαφορετικά χαρακτηριστικά από τα ορυκτά καύσιμα. Αυτά τα διαφορετικά χαρακτηριστικά συνδέονται στενά με τις χωρικές διαστάσεις της ενεργειακής μετάβασης, δηλαδή τη ζήτηση για γη και τις συγκρούσεις των δραστηριοτήτων πάνω στη γη προκειμένου να χωροθετηθούν οι ΑΠΕ [5].

Η ενεργειακή μετάβαση ως μέρος του μετριασμού και της προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή, έχει τεράστιες χωρικές και κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις. Η στροφή προς τις ΑΠΕ και η ανεξαρτητοποίηση από τις συμβατικές πηγές ενέργειας είναι επιβεβλημένη ανάγκη, ωστόσο χωρίς τον σωστό σχεδιασμό μπορεί να εξελιχθεί σε μια κατάσταση με αρνητικές επιπτώσεις για τη γη, το τοπίο, τη φύση και το ευρύτερο περιβάλλον, κάτι που έχει επιπτώσεις στη γεωργία, τη διατροφή και γενικότερα στις υπηρεσίες οικοσυστημάτων.

Επιπρόσθετα, μέσα από μία σύντομη επισκόπηση των 17 στόχων της βιώσιμης ανάπτυξης, αναδεικνύεται [20] ότι η ενέργεια και η γη εντάσσονται βαθιά στους στόχους αυτούς και θα επηρεαστούν σημαντικά από την υλοποίησή τους. Στην ίδια μελέτη, αναδεικνύεται ότι σε σύγκριση με άλλες χρήσεις γης (γεωργία, δασοκομία, εξορύξεις, αστικοποίηση), οι απαιτήσεις σε γη για παραγωγή ενέργειας είναι μικρές καθώς κυμαίνονται σε ποσοστό περίπου 2% της συνολικής έκτασης της γης παγκοσμίως. Ωστόσο, δεδομένης της έκκλησης για παγκόσμια απαλλαγή από τον άνθρακα από τη Συμφωνία του Παρισιού, η ανανεώσιμη ενέργεια θα συνεχίσει να επεκτείνεται με ταχύτερο ρυθμό, με αποτέλεσμα σημαντικές επιπτώσεις στη χρήση γης στο άμεσο μέλλον [20].

Συνεπώς, η μετάβαση στις ΑΠΕ θα αυξήσει την πίεση στον ανταγωνισμό για τη γη, γεγονός που έχει αναγνωριστεί ως δυνητική ανησυχία όχι μόνο για τη διατήρηση των φυσικών οικοσυστημάτων, των υπηρεσιών τους και της βιοποικιλότητας, αλλά και λόγω του ανταγωνισμού με τη χρήση γης για την κάλυψη των βασικών ανθρώπινων αναγκών [21]. Η εκτεταμένη ανάπτυξη τέτοιων χρήσεων θα έχει σαν αποτέλεσμα τον ολοένα και μεγαλύτερο περιορισμό του πρωτογενή τομέα ως χρήση γης και τη μετατροπή μεγάλων εκτάσεων σε φωτοβολταικά ή αιολικά πάρκα καθώς και σε καλλιέργειες για την

παραγωγή βιοκαυσίμων. Χώρες όπως η Ιταλία, η Γαλλία, η Πορτογαλία, η Ισπανία και η Ελλάδα χάνουν εύφορα εδάφη για παραγωγή ενέργειας για χάρη του αστικού ιστού καθώς και άλλων οικονομικών δραστηριοτήτων, ενώ το κεντρικό, ανατολικό και βόρειο τμήμα της Ευρώπης διατηρεί καλύτερα τη γη [22].

Όπως αναφέρει και το Ειδικό Χωροταξικό Πλαίσιο των ΑΠΕ [23], «αν και τα έργα ΑΠΕ μπορεί να χαρακτηριστούν κατ' αρχήν ως δραστηριότητες φιλικές προς το περιβάλλον, εν τούτοις δεν στερούνται παντελώς επιπτώσεων σε αυτό. Για την πρόληψη, την άμβλυνση και την αποτροπή των επιπτώσεων αυτών απαιτείται η καθιέρωση σαφών κανόνων χωροθέτησης των έργων Α.Π.Ε., ώστε αφενός να μειωθούν οι αβεβαιότητες και οι συγκρούσεις χρήσεων γης που συχνά αναφύονται επί του πεδίου και αφετέρου να ικανοποιηθούν οι ευρύτερες ανάγκες προστασίας του περιβάλλοντος και η αειφόρος ανάπτυξη των περιοχών υποδοχής τους».

3. ΧΩΡΟΤΑΞΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΜΕΤΑΒΑΣΗ

Ο χωροταξικός σχεδιασμός αν και παρουσιάζει διαφορές από χώρα σε χώρα αλλα και στα διαφορετικά του επίπεδα (εθνικό, περιφερειακό, τοπικό) έχει την «αρμοδιότητα» να αποφασίζει για τη γη και να καθορίζει τη χρήση της, αποτελώντας έναν από τους σημαντικότερους θεσμούς στην οργάνωση των βασικών αναγκών όπως η διατροφή, η στέγαση, η εργασία, καθορίζοντας σε μεγάλο βαθμό τις συνθήκες για την καθημερινή ζωή [9].

Όπως ήδη έχει αναφερθεί, η ενέργεια και η χρήση γης συνδέονται. Αφενός, η παραγωγή και η κατανάλωση ενέργειας έχουν επιπτώσεις στη χρήση γης και αφετέρου, το πώς σχεδιάζεται και οργανώνεται η χρήση γης, καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την κατανάλωση ενέργειας [12,9]. Η χρήση γης μπορεί λοιπόν να θεωρηθεί ως ένας πολύ σημαντικός παράγοντας για την αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας [9,24] ενώ εκτιμάται ότι περισσότερο από το ήμισυ της ζήτησης ενέργειας στον ανεπτυγμένο κόσμο μπορεί να αποδοθεί στην υπάρχουσα διαμόρφωση των χρήσεων γης [9,25].

Συνεπώς ο ιδιαίτερος ρόλος που οι θεσμοί χωροταξικού σχεδιασμού μπορούν να διαδραματίσουν, είναι η εξασφάλιση βιώσιμης χρήσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, δηλαδή η αποφυγή οποιασδήποτε κατάχρησης της γης, του ύδατος, του αέρα. Ο χωροταξικός σχεδιασμός πρέπει να σέβεται και να συνυπολογίζει τα όρια της βιώσιμης χρήσης των πόρων και να εξασφαλίζει ότι δεν θα προκληθούν μη αναστρέψιμες ζημιές από τη χρήση ΑΠΕ [9].

3.1. Χωροταξική προσέγγιση των ΑΠΕ στην ΕΥΡΩΠΗ

Η μετάβαση προς συστήματα ανανεώσιμης ενέργειας καθοδηγείται από διαφορετικές προσεγγίσεις σε ολόκληρο τον κόσμο, οι οποίες πολλές φορές επικαιροποιούνται, ανανεώνονται ή/και μεταβάλλονται, στο πέρασμα των χρόνων. Στην παρούσα εισήγηση αναφέρονται τρία χαρακτηριστικά παραδείγματα χωρών που πρωτοστατούν στην ενεργειακή μετάβαση. Αν και στις διάφορες χώρες της ΕΕ. εντοπίζεται διαφορετική διοικητική δομή, αποτελεί κοινή κατεύθυνση η έμφαση στον τοπικό σχεδιασμό. Τα χαμηλότερα επίπεδα σχεδιασμού έχουν την ευθύνη και την αρμοδιότητα των χωροταξικών τους επιλογών και των σχετικών κριτηρίων χωροθέτησης ΑΠΕ, ενώ κυρίαρχος είναι ο ρόλος των τοπικών κοινωνιών μέσω διαβουλεύσεων [26]. Πολλές χώρες έχουν θέσει εθνικούς ενεργειακούς στόχους για τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής ενώ έχουν εισαχθεί διαφορετικές προσεγγίσεις ενεργειακού σχεδιασμού για την επίτευξη αυτών των στόχων.

Στη Δανία, η επίτευξη των εθνικών στόχων για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας οδηγεί σε πολιτικές σε τοπικό επίπεδο. Οι δήμοι έχουν αναλάβει τα καθήκοντα και την αρμοδιότητα χωρικού σχεδιασμού και ρύθμισης των χρήσεων γης, τόσο σε αστικές όσο και σε αγροτικές περιοχές, ενώ στο επίπεδο του ενεργειακού σχεδιασμού, σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν τα δημοτικά σχέδια, τα οποία επικαιροποιούνται κάθε τέσσερα χρόνια, με βάση κατευθυντήριες γραμμές από τον εθνικό οργανισμό ενέργειας και την εθνική στρατηγική για την ενέργεια [27]. Το σύστημα σχεδιασμού της Δανίας χαρακτηρίζεται από αποκεντρωμένη κατανομή καθηκόντων με σημαντικές αρμοδιότητες να ανατίθενται στους δήμους. Αν και το περιφερειακό επίπεδο έχασε το μεγαλύτερο μέρος της επιρροής του μετά την κατάργηση των κομητειών, οι περιφερειακές αρχές είναι υπεύθυνες για την προετοιμασία των σχεδίων περιφερειακής ανάπτυξης για την υποστήριξη των στρατηγικών χωρικής ανάπτυξης σε δημοτικό επίπεδο [28]. Όσον αφορά την αιολική ενέργεια που είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη στη Δανία, οι ανεμογεννήτριες μπορούν να δημιουργηθούν μόνο σε συγκεκριμένες περιοχές που επιλέγονται από τους δήμους και αξιολογούν ένα ευρύ φάσμα επιπτώσεων στο τοπίο, συμπεριλαμβανομένης της διατήρησης της φύσης, ακολουθώντας και τις εθνικές απαιτήσεις για αποστάσεις από γειτονικές εγκαταστάσεις, δρόμους, σιδηροδρόμους, προστατευόμενες περιοχές, οικισμούς κ.α. [29].

Στη Σουηδία, αν και το Κοινοβούλιο και η κυβέρνηση καθοδηγούν τον χωροταξικό σχεδιασμό ρυθμίζοντας το πλαίσιό του μέσω της νομοθεσίας και της χάραξης πολιτικής, και έμμεσα μέσω πρωτοβουλιών όπως επενδυτικά προγράμματα που έχουν συνέπειες για τον σχεδιασμό, το σημαντικό καθήκον του σχεδιασμού για τη βιώσιμη χωρική ανάπτυξη και τις χρήσεις γης ανήκει σε μεγάλο βαθμό στις τοπικές αρχές, τις περιφέρειες ή τους δήμους. Υπάρχουν επίσης αρκετοί σχετικοί νόμοι με επιπτώσεις στον χωροταξικό σχεδιασμό, με σημαντικότερο τον περιβαλλοντικό κώδικα. Υπάρχουν τρεις τύποι χωρικών σχεδίων στη χώρα, το περιφερειακό, το δημοτικό και το τοπικό, με τους δήμους να έχουν πολύ ισχυρό ρόλο. Ο σχεδιασμός διέπεται βέβαια από τις κατευθύνσεις της εθνικής νομοθεσίας και του θεσπισμένου περιβαλλοντικού κώδικα που ορίζει συγκεκριμένους περιορισμούς χρήσεων γης [30]**.** Κάθε δήμος εγκρίνει ένα χωρικό σχέδιο και ανά τετραετία οι δημοτικές αρχές εξετάζουν αν παραμένει ενημερωμένο. Οι Σουηδικοί δήμοι, οι οποίοι διαθέτουν μεγάλη αυτονομία στον σχεδιασμό της χρήσης γης, εκτός από τα ενεργειακά σχέδια που οφείλουν να έχουν σχετικά με την προμήθεια, τη διανομή και τη χρήση της ενέργειας, έχουν στραφεί πλέον σε σχέδια για τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής [31]. Στη Σουηδία, οι στρατηγικές για την επέκταση της αιολικής ενέργειας καθοδηγούνται από τους στόχους για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και από περιοχές εθνικού ενδιαφέροντος για την αιολική ενέργεια [32,33], ενώ αφήνονται σημαντικά περιθώρια για τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων σε δημοτικό επίπεδο. Σε σχέση με τη Δανία και τη Γερμανία, υπάρχει μεγαλύτερη ανεξαρτησία στο δημοτικό επίπεδο [34,35]. Από το 2008 οι δήμοι έχουν λάβει ρητό δικαίωμα αρνησικυρίας (βέτο) όσον αφορά την αιολική ενέργεια. Συνεπώς, κανένα νέο σχέδιο αιολικής ενέργειας δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί χωρίς τη συγκατάθεση του δήμου [36]**.**

Στη Γερμανία, η ενεργειακή μετάβαση (Energiewende) ενσωματώνεται σε ένα σύστημα πολλαπλών επιπέδων. Διαθέτει σημαντική εθνική στρατηγική και κανονιστικό πλαίσιο για την προστασία του κλίματος και την προώθηση των ΑΠΕ ενώ η διαδικασία μετάβασης συνοδεύεται από μια τάση αποκέντρωσης. Η Γερμανική ομοσπονδιακή ενεργειακή στρατηγική είναι παράλληλη με 16 διαφορετικές στρατηγικές των ομόσπονδων κρατιδίων, στις οποίες βέβαια υποστηρίζεται η ομοσπονδιακή ενεργειακή μετάβαση, με το κάθε κρατίδιο να θέτει διαφορετικές προτεραιότητες λόγω των διαφορετικών γεωγραφικών και κλιματικών συνθηκών, του φυσικού περιβάλλοντος, των χωρικών δομών κ.α. [37]. Τα ομόσπονδα κρατίδια βρίσκονται μεταξύ εθνικού και τοπικού επιπέδου διαδραματίζοντας βασικό ρόλο στην ενεργειακή μετάβαση, καθώς συνδιευθύνουν τον ρυθμό ανάπτυξης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μέσω ειδικών στόχων [37]. Κάποια κρατίδια στα χωροταξικά τους σχέδια έχουν θεσπίσει περιοχές αλλά και ελάχιστη έκταση γης για εγκαταστάσεις αιολικής ενέργειας [36]. Τα κρατίδια είναι υπεύθυνα για τις αδειοδοτήσεις/εγκρίσεις δίνοντας κατευθυντήριες γραμμές για τον σχεδιασμό στα κατώτερα επίπεδα διακυβέρνησης. Στη συνέχεια οι διάφοροι δήμοι μεταφράζουν αυτές τις κατευθυντήριες γραμμές σε χωρικά σαφείς περιοχές προτεραιότητας για αιολική ενέργεια. Στη Γερμανία οι περιοχές προστασίας τοπίου καθορίζονται από τα ομόσπονδα κρατίδια, ενώ, για παράδειγμα, οι περιοχές προστασίας της φύσης ή τα εθνικά πάρκα εμπίπτουν στην αρμοδιότητα της εθνικής κυβέρνησης [36]. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι στη Γερμανία ήδη από το 2012 πάνω από 40% των ΑΠΕ προέρχονταν από ενεργειακές εγκαταστάσεις κοινοτήτων πολιτών, ενώ το μερίδιο των παραδοσιακών εταιρειών ενέργειας, ήταν ελαφρώς πάνω από το 20%, γεγονός που αποδεικνύει ότι η κοινωνία συμμετέχει ενεργά στην ενεργειακή μετάβαση [38]**.**

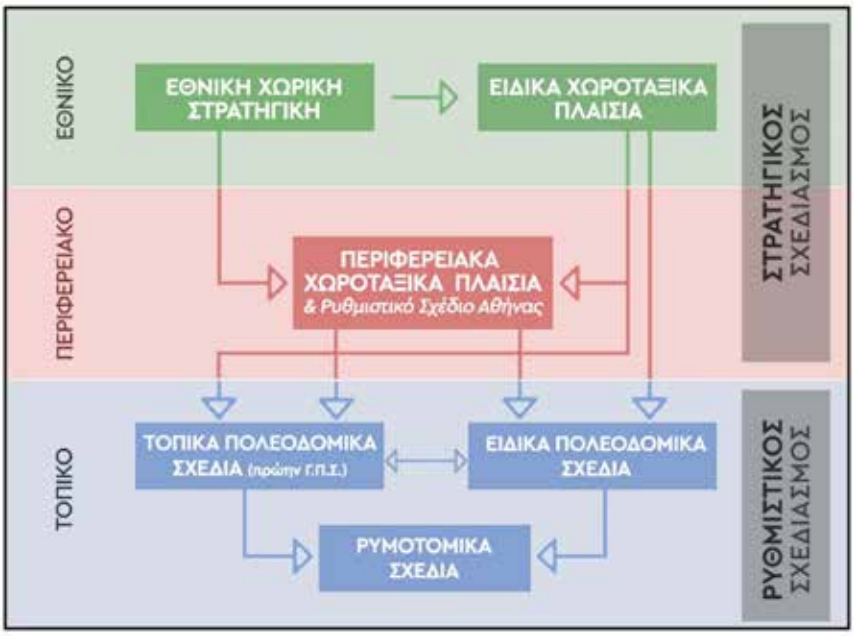
Συνοψίζοντας, παρά τις διαφορετικές διοικητικές δομές άρα και διαφορετικές προσεγγίσεις στις χώρες της ΕΕ, εντοπίζεται ήδη από την υποστηρικτική μελέτη για το Ειδικό Πλαίσιο Χωροταξικού Σχεδιασμού και Αειφόρου Ανάπτυξης για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας [39] ότι οι χώρες με ισχυρή και μακρόχρονη παράδοση στον χωροταξικό σχεδιασμό εντάσσουν στα τοπικά χωροταξικά τους σχέδια τις περιοχές εγκατάστασης ΑΠΕ. Τα σχέδια αυτά αποφασίζονται μετά από εκτεταμένη δημόσια διαβούλευση σε τοπικό επίπεδο για την ενίσχυση της κοινωνικής αποδοχής, ενώ όπως διαπιστώνεται, το τοπικό επίπεδο σχεδιασμού έχει τον καθοριστικό ρόλο για τη σημειακή χωροθέτηση εγκαταστάσεων ΑΠΕ, ακολουθώντας βασικές αρχές του υπερκείμενου σχεδιασμού.

3.2. Χωρικός Σχεδιασμός και ΑΠΕ στην Ελλάδα

Ο χωρικός σχεδιασμός στην Ελλάδα διαρθρώνεται σε τρία επίπεδα, εθνικό, περιφερειακό και τοπικό, ακολουθώντας ένα ιεραρχημένο πλαίσιο (εικόνα 1). Ο χωροταξικός σχεδιασμός, ο οποίος εκπονείται σε εθνική ή περιφερειακή κλίμακα με τη μορφή πλαισίων, είναι κυρίως στρατηγικού χαρακτήρα και περιλαμβάνει κατευθύνσεις (και όπου απαιτείται ρυθμίσεις) ενώ ο πολεοδομικός σχεδιασμός περιλαμβάνει κυρίως ρυθμίσεις.

Στην εικόνα 1 απεικονίζεται η δομή του τρέχοντος συστήματος χωρικού σχεδιασμού καθώς και η αλληλεπίδραση μεταξύ των διαφορετικών επιπέδων όπως προκύπτει από την ισχύουσα νομοθεσία για τον χωρικό σχεδιασμό [40]. Η Εθνική Χωρική Στρατηγική, αποτελεί κείμενο πολιτικής που παρέχει

τις κατευθυντήριες αρχές σχεδιασμού για ολόκληρη τη χώρα. Είναι ένα κείμενο βασικών αρχών πολιτικής για την ανάπτυξη και τον σχεδιασμό του χώρου, καθώς και για τον συντονισμό των διαφόρων πολιτικών με χωρικές συνέπειες, χωρίς βέβαια δεσμευτικό χαρακτήρα. Οι βασικοί άξονες και στόχοι της Εθνικής Χωρικής Στρατηγικής λαμβάνονται υπόψη κατά την κατάρτιση των Ειδικών και Περιφερειακών Χωροταξικών Πλαισίων [40].



Εικόνα 1. Επίπεδα και Χαρακτήρας τρέχοντος συστήματος Σχεδιασμού
Πηγή: Νόμος 4759/2020 (Ιδία επεξεργασία)

Στο ίδιο επίπεδο βρίσκονται τα Ειδικά Χωροταξικά Πλαίσια τα οποία περιλαμβάνουν κυρίως κατευθύνσεις (και όπου απαιτείται ρυθμίσεις) για ένα ευρύ φάσμα τομεακών πολιτικών, σχετικά με τις σημαντικότερες οικονομικές δραστηριότητες της χώρας. Συγκεκριμένα αφορούν «τη χωρική διάρθρωση και δομή του οικιστικού δικτύου της χώρας, τη χωρική διάρθρωση τομέων ή κλάδων παραγωγικών δραστηριοτήτων και τομέων ανάπτυξης εθνικής σημασίας, τη χωρική διάρθρωση δικτύων και υπηρεσιών τεχνικής και διοικητικής υποδομής, τη διαμόρφωση πολιτικής γης, την προστασία του πολιτιστικού και φυσικού τοπίου, τη χωρική ανάπτυξη και οργάνωση περιοχών του εθνικού χώρου που έχουν ιδιαίτερη σημασία από χωροταξική, περιβαλλοντική, αναπτυξιακή ή κοινωνική άποψη καθώς και την προώθηση σχεδίων, προγραμμάτων ή έργων χωρικής ανάπτυξης μείζονος σημασίας ή και διακρατικής ή διαπεριφερειακής εμβέλειας» [40].

Όσον αφορά τα Περιφερειακά Χωροταξικά Πλαίσια, αυτά παρέχουν «τις κατευθύνσεις (και όπου απαιτείται ρυθμίσεις) χωρικής ανάπτυξης και οργάνωσης σε περιφερειακό επίπεδο σχετικά με την αποτίμηση, ανάδειξη και αξιοποίηση των ιδιαίτερων αναπτυξιακών και γενικότερα χωρικών χαρακτηριστικών κάθε περιφέρειας, τη χωρική διάρθρωση τομέων, κλάδων, δικτύων και υποδομών, το πρότυπο χωρικής οργάνωσης, τη δομή του οικιστικού δικτύου, την οικιστική ανάπτυξη, την ανάδειξη και προστασία της φυσικής και πολιτιστικής κληρονομιάς, τον προσδιορισμό ενεργών παρεμβάσεων και προγραμμάτων χωροταξικού και αστικού χαρακτήρα καθώς και την προστασία του πολιτιστικού και φυσικού περιβάλλοντος και του τοπίου». Κατά την κατάρτισή τους, τα Περιφερειακά Χωροταξικά Πλαίσια λαμβάνουν υπόψη την Εθνική Χωρική Στρατηγική, ενώ δεσμεύονται από τις ρυθμίσεις και εναρμονίζονται προς τις κατευθύνσεις των Ειδικών Χωροταξικών Πλαισίων [40].

Τέλος, στο τοπικό επίπεδο τίθενται κανόνες και όροι για τη χρήση, τη δόμηση και την εν γένει εκμετάλλευση του εδάφους στον αστικό χώρο και την ύπαιθρο ενώ προβλέπεται η εναρμόνιση των

σχετικών σχεδίων ρυθμιστικού χαρακτήρα με τις προτεραιότητες των εγκεκριμένων Χωροταξικών Πλαισίων εθνικού και περιφερειακού επιπέδου [40].

Προκειμένου να μελετηθεί πως ο χωροταξικός σχεδιασμός αντιμετωπίζει τις ΑΠΕ, εστιάζουμε στο Ειδικό Χωροταξικό Πλαίσιο για τις ΑΠΕ το οποίο θεσπίστηκε το 2008 με Υπουργική Απόφαση [23] και έχει ως βασικό στόχο να θέσει κατευθύνσεις χωροθέτησης, να καθιερώσει κανόνες και κριτήρια που θα επιτρέπουν τη δημιουργία βιώσιμων εγκαταστάσεων ΑΠΕ και θα επιτρέπουν την αρμονική ένταξη τους στο φυσικό και ανθρωπογενές περιβάλλον και τέλος να συμβάλει στην επίτευξη των εθνικών και Ευρωπαϊκών στόχων. Με τα παραπάνω επιδιώκεται να παρασχεθεί, εκτός των άλλων, ένα σαφές πλαίσιο στις αδειοδοτούσες αρχές και τις ενδιαφερόμενες επιχειρήσεις, ώστε να προσανατολιστούν σε καταρχήν κατάλληλες από χωροταξικής απόψεως περιοχές εγκατάστασης και να περιορίσουν έτσι τις αβεβαιότητες και τις συγκρούσεις χρήσεων γης που συχνά αναφύονται επί του πεδίου. Σε αυτή την κατεύθυνση και προκειμένου να επιτευχθεί η μείωση των συγκρούσεων χρήσεων γης που προκύπτουν με τη χωροθέτηση ΑΠΕ, το Ειδικό Χωροταξικό Πλαίσιο ορίζει τις βασικές κατευθύνσεις, τους κανόνες αλλά και τους περιορισμούς για τη χωροθέτηση έργων ΑΠΕ στο σύνολο του εθνικού χώρου. Οι κανόνες αφορούν τη χωροθέτηση αιολικών εγκαταστάσεων, υδροηλεκτρικών έργων καθώς και εγκαταστάσεων αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας, της γεωθερμίας αλλά και της ενέργειας από βιομάζα ή βιοαέριο. Οι σχετικές ρυθμίσεις που προβλέπει το Ειδικό Χωροταξικό Πλαίσιο αφορούν περιοχές και ζώνες αποκλεισμού, ενώ ιδιαίτερα για την αιολική ενέργεια παρατηρείται διαχωρισμός του εθνικού χώρου σε περιοχές προτεραιότητας ή καταλληλότητας, καθορίζονται κριτήρια σχετικά με τη φέρουσα ικανότητα μιας περιοχής, ορίζονται ελάχιστες και μέγιστες αποστάσεις από χρήσεις γης, δραστηριότητες, υποδομές, καθώς και κριτήρια ένταξης στο τοπίο [23].

Κατά την επεξεργασία του συγκεκριμένου Πλαισίου παρατηρείται πως σε ορισμένες περιπτώσεις αναπτύσσονται κατευθύνσεις με κανονιστικό χαρακτήρα οι οποίες δεν αφήνουν τα απαραίτητα περιθώρια στον υποκείμενο σχεδιασμό, είτε περιφερειακό είτε τοπικό, να θέσει επιπλέον κριτήρια, ή να περιορίσει άλλα, ανάλογα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά αλλά και τις ανάγκες της εκάστοτε περιοχής. Στις περιπτώσεις αυτές είναι πιθανόν να περιορίζονται και οι δυνατότητες συμμετοχής των τοπικών κοινωνιών στις αποφάσεις που αφορούν το μέλλον της περιοχής τους, τη στιγμή μάλιστα που πληθώρα μελετών [41–45] αναδεικνύει ολοένα και πιο εμφατικά ότι η συμμετοχή των πολιτών τόσο στη διαδικασία λήψης αποφάσεων όσο και στην τοπική ενεργειακή μετάβαση μέσα από πρωτοβουλίες των ίδιων των τοπικών κοινοτήτων, συμβάλλουν και στη μεγαλύτερη κοινωνική αποδοχή έργων ΑΠΕ αλλά και στην καλύτερη προστασία του φυσικού και πολιτιστικού περιβάλλοντος.

Όσον αφορά την αιολική ενέργεια, στην οποία δίνεται μεγάλη έμφαση από το Ειδικό Χωροταξικό Πλαίσιο, ο διαχωρισμός των περιοχών σε περιοχές αιολικής προτεραιότητας και περιοχές αιολικής καταλληλόλητας ενδέχεται να επιβαρύνει ορισμένες περιοχές, ενώ σύμφωνα με τη WWF [46], η φέρουσα ικανότητα, η οποία αναφέρεται αποκλειστικά για τις αιολικές εγκαταστάσεις, θα πρέπει να ορίζει συνολικά τη δυνατότητα διείσδυσης έργων ΑΠΕ σε μία περιοχή σε όλες τις μορφές, είτε αναφερόμαστε σε αιολική ενέργεια είτε σε ηλιακή, βιομάζα, ή μικρά υδροηλεκτρικά.

Τέλος, ένα επιπλέον ζήτημα που προκύπτει από την ανάλυση του Ειδικού Χωροταξικού Πλαισίου, αφορά τη δυνατότητα παρεκκλίσεων για τα συνοδευτικά έργα καθώς αιολικά και φωτοβολταϊκά πάρκα προϋποθέτουν συχνά τη διάνοιξη νέων δρόμων που διεισδύουν σε φυσικά οικοσυστήματα. Συνεπώς, οι επιπτώσεις τους μπορεί να επεκτείνονται πολύ πέρα απ' το φυσικό τους αποτύπωμα, δημιουργώντας δυσμενείς πιέσεις, περαιτέρω αλλαγές σε χρήσεις γης και αξιοσημείωτες επιπτώσεις στη βιοποικιλότητα και το φυσικό περιβάλλον [47].

Στον υποκείμενο σχεδιασμό, περιφερειακό και τοπικό, διακρίνεται η κατεύθυνση ένταξης της ενεργειακής μετάβασης σε πλαίσια και σχέδια, ενώ ήδη από τις προδιαγραφές των μελετών αξιολόγησης, αναθεώρησης και εξειδίκευσης των θεσμοθετημένων Περιφερειακών Πλαισίων δίνεται έμφαση στο ζήτημα της κλιματικής αλλαγής αλλά και των ΑΠΕ [48]. Στην ενότητα 4, διερευνάται περαιτέρω η χωροταξική προσέγγιση των ΑΠΕ μέσα από το πρόσφατο Περιφερειακό Χωροταξικό Πλαίσιο της Κεντρικής Μακεδονίας. Τέλος, στο σύνολο των διαφορετικών πλαισίων και σχεδίων αναγνωρίζεται η σχέση του συστήματος χωρικού σχεδιασμού με την ενεργειακή μετάβαση, η οποία λαμβάνεται υπόψη μέσα από τη συμπερίληψη πολιτικών, κατευθύνσεων, στόχων και κανόνων που σχετίζονται άμεσα ή έμμεσα με την μετάβαση στην ανανεώσιμη ενέργεια.

4. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΜΕΤΑΒΑΣΗ ΚΑΙ ΑΠΕ ΣΤΑ ΧΩΡΟΤΑΞΙΚΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ

Έχοντας αναλύσει εν συντομία το θεσμικό πλαίσιο για τον χωροταξικό σχεδιασμό, τα επίπεδα σχεδιασμού και τη σχέση τους με την ενεργειακή μετάβαση, η παρούσα εισήγηση εστιάζει τη συζήτηση γύρω από την τρέχουσα ενεργειακή μετάβαση στην Κεντρική Μακεδονία, καθώς και τη σχέση της με το Ειδικό Χωροταξικό για τις ΑΠΕ και το πρόσφατο οικείο Περιφερειακό Χωροταξικό Πλαίσιο.

4.1. Στοιχεία για τις ΑΠΕ στην περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας

Στο σημείο αυτό παρουσιάζονται ορισμένα στοιχεία για την τρέχουσα αλλά και την προβλεπόμενη ενεργειακή μετάβαση η οποία έχει προκύψει κυρίως ως αποτέλεσμα των κατευθύνσεων που θέτει το Ειδικό Χωροταξικό Πλαίσιο, το οποίο έχει παρουσιασθεί και συζητηθεί εν συντομία στην ενότητα 3.

Με βάση πρόσφατη μελέτη [47] για την αιολική ενέργεια, αναδεικνύεται ότι οι αιτήσεις για αιολικές εγκαταστάσεις στο σύνολο του εθνικού χώρου, υπερβαίνουν κατά 502% τον εθνικό στόχο ηλεκτροπαραγωγής από ανεμογεννήτριες, ο οποίος είναι 7,05 GW για το 2030. Ακόμη οι σταθμοί για τους οποίους έχουν ήδη εκδοθεί άδειες εγκατάστασης ή βρίσκονται στο τελικό στάδιο της άδειας παραγωγής (και πρόκειται να ξεκινήσουν τη λειτουργία τους το επόμενο διάστημα), έχουν συνολική ισχύ 8,83 GW, υπερκαλύπτοντας ήδη, κατά 125% τον εθνικό στόχο του 2030.

Πίνακας 1. Αιτήσεις για αιολικές και φ/β εγκαταστάσεις στην Κεντρική Μακεδονία
Πηγή: ΡΑΕ, 2021 [50] (ιδία επεξεργασία)

ΕΙΔΟΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	ΑΔΕΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	ΑΔΕΙΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	ΑΔΕΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	ΣΕ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ	ΣΥΝΟΛΟ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΣ	ΕΘΝΙΚΟΣ ΣΤΟΧΟΣ 2030	ΠΟΣΟΣΤΟ ΕΠΙ ΤΟΥ ΕΘΝΙΚΟΥ ΣΤΟΧΟΥ
ΑΙΟΛΙΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ	105,1 MW	46,8 MW	1,103 GW	912,86 MW	2,168 GW	7,05 GW	30,75%
Φ/Β ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ >1.0 MW	90,56 MW	11,64 MW	1,826 GW	6,448 GW	8,376 GW	7,66 GW	109,35%

Στην υπό μελέτη περιφέρεια, διακρίνεται ιδιαίτερο επενδυτικό ενδιαφέρον και μία αξιοσημείωτη στροφή στις ΑΠΕ σε επίπεδο τόσο φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων όσο και αιολικών, ακόμα και αν καμία περιοχή της περιφέρειας δεν χαρακτηρίζεται ως περιοχή αιολικής προτεραιότητας.

Οι πίνακες 1 και 2 συνοψίζουν την κατάσταση που έχει διαμορφωθεί στην Κεντρική Μακεδονία μέχρι τον Φεβρουάριο του 2021 με βάση δεδομένα από τη Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας [50]. Ο μεγάλος αριθμός αιτήσεων που βρίσκονται στα 4 διαφορετικά στάδια, παρουσιάζεται προκειμένου να γίνει κατανοητή η ραγδαία στροφή στις ΑΠΕ, ενώ συγκρίνεται με τον εθνικό στόχο, όπως αυτός προκύπτει από το Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα [51]. Σε μία μόνο εκ των δεκατριών περιφερειών της χώρας, αυτή της Κεντρικής Μακεδονίας, διαπιστώνεται ότι οι αιτήσεις για αιολικές εγκαταστάσεις αγγίζουν περίπου το 31% του εθνικού στόχου, ενώ οι αιτήσεις για Φ/Β εγκαταστάσεις υπερβαίνουν κατά 109% τον εθνικό στόχο των 7,66 GW (πίνακας 1).

Πίνακας 2. Κατανομή των αιτήσεων για αιολικές εγκαταστάσεις ανά Νομό
Πηγή: ΡΑΕ, 2021 [50] (ιδία επεξεργασία)

ΝΟΜΟΣ	ΑΔΕΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	ΑΔΕΙΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	ΑΔΕΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	ΣΕ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ	ΣΥΝΟΛΟ
ΗΜΑΘΙΑ	36 MW	--	173,1 MW	29,4 MW	238,5 MW
ΘΕΣ/ΚΗ	--	--	30 MW	197,25 MW	227,25 MW
ΚΙΛΚΙΣ	10 MW	6,6 MW	544,05 MW	292,10 MW	**852,75 MW**
ΠΕΛΛΑ	--	--	14 MW		14 MW
ΠΙΕΡΙΑ	--	--	21,6 MW	29,40 MW	51 MW
ΣΕΡΡΕΣ	59,10 MW	40,2 MW	188,1 MW	209,30 MW	**496,7 MW**
ΧΑΛΚΙΔΙΚΗ	--	--	132 MW	--	132 MW

Εκτός από την εμφανή ραγδαία επέκταση των ΑΠΕ, η οποία σε συνδυασμό με την έλλειψη ολοκληρωμένου σχεδιασμού, μπορεί να έχει σημαντικές επιπτώσεις στον χώρο, τη γη, το τοπίο, τη βιοποικιλότητα, παρατηρείται μία χωρικά ανομοιόμορφη και μη δίκαιη κατανομή των συγκεκριμένων αιτήσεων στους νομούς και δήμους της περιφέρειας, κυρίως όσον αφορά την αιολική ενέργεια (πίνακας 2) με πιθανές χωρικές επιπτώσεις που αξίζει να μελετηθούν, όπως η επίπτωση στο τοπίο ή η υποβάθμιση συγκεκριμένων περιοχών και η αφαίρεση ζωτικού χώρου από άλλες παραγωγικές δραστηριότητες στις περιοχές αυτές. Συνεπώς αναδεικνύεται ο ρόλος που οφείλει να παίξει ο χωροταξικός σχεδιασμός, τόσο στην ορθή ανάπτυξη των ΑΠΕ όσο και ως ρυθμιστής και προστάτης της γης, του φυσικού και ανθρωπογενούς περιβάλλοντος.

4.2. Προβλέψεις των Χωροταξικών Πλαισίων για την ενεργειακή μετάβαση στην Κεντρική Μακεδονία

Εκκινώντας από το Ειδικό Χωροταξικό Πλαίσιο για τις ΑΠΕ [23], αξίζει να σημειωθεί ότι αποτελεί την πρώτη ουσιαστική προσπάθεια, σε εθνικό βέβαια επίπεδο, για την ανάδειξη της κρισιμότητας του ζητήματος της χωροθέτησης ΑΠΕ, γεγονός που κάνει εμφανή τη σημασία της διάστασης του χώρου στη διαδικασία της τρέχουσας και μελλοντικής ενεργειακής μετάβασης. Αποτελεί μάλιστα κομβικής σημασίας γεγονός τόσο η αναγνώριση των επιπτώσεων των ΑΠΕ στη γη, το τοπίο, το φυσικό περιβάλλον και τις παραγωγικές δραστηριότητες όσο και η προσπάθεια για την άμβλυνση αυτών θεσπίζοντας βασικές κατευθύνσεις, κανόνες, περιορισμούς, και ρυθμίσεις.

Όσον αφορά την Κεντρική Μακεδονία, η τρέχουσα ενεργειακή μετάβαση διαπερνάται και καθοδηγείται από τις γενικές κατευθύνσεις του Ειδικού Χωροταξικού Πλαισίου, στο οποίο δεν υπάρχουν εξειδικευμένες κατευθύνσεις ανά περιφέρεια, με εξαίρεση τον διαχωρισμό σε περιοχές προτεραιότητας και καταλληλότητας για την αιολική ενέργεια. Ο υποκείμενος σχεδιασμός, οφείλει να εναρμονίζεται με τις κατευθύνσεις του Ειδικού Χωροταξικού, τις οποίες οφείλει και να εξειδικεύει.

Στο πρόσφατο (2020) Περιφερειακό Χωροταξικό Πλαίσιο της Κεντρικής Μακεδονίας [49] εντοπίζεται με σαφήνεια η συμπερίληψη της ενεργειακής μετάβασης, μέσα και από την ενσωμάτωση στοιχείων της Εθνικής Στρατηγικής για την Προσαρμογή στην Κλιματική Αλλαγή και του Εθνικού Σχεδίου για την Ενέργεια και το Κλίμα. Όπως διαφαίνεται, λαμβάνεται σε ικανοποιητικό βαθμό υπόψη η χωρική διάσταση της ενεργειακής μετάβασης καθώς και οι επιπτώσεις της στο περιβάλλον και τις παραγωγικές δραστηριότητες, ενώ είναι σημαντική η κατεύθυνση της εκμετάλλευσης ΑΠΕ προς όφελος της τοπικής ανάπτυξης και υπό τους όρους πλήρους διατήρησης της βιοποικιλότητας και του τοπίου.

Σε αυτό το πλαίσιο δίνεται έμφαση στην αξιοποίηση του αιολικού δυναμικού ενώ προτείνεται να διερευνηθεί, στο πλαίσιο της ανάδρασης προς τον υπερκείμενο σχεδιασμό και συγκεκριμένα προς το Ειδικό Χωροταξικό Πλαίσιο για τις ΑΠΕ, ο καθορισμός περιοχών αιολικής προτεραιότητας σε συγκεκριμένες δημοτικές ενότητες, χωρίς βέβαια να είναι σαφή τα κριτήρια επιλογής αυτών των περιοχών. Επιπρόσθετα, λόγω της διαθεσιμότητας υπερπληθώρας περιοχών κατάλληλων για την εγκατάσταση αυτόνομων μονάδων Φ/Β, δίνεται κατεύθυνση χωροθέτησής τους εκτός περιοχών που μπορούν να αξιοποιηθούν καλύτερα με άλλες χρήσεις, ενώ η εγκατάσταση Φ/Β και αιολικών πάρκων προτείνεται να αποφεύγεται εντός ζωνών προστασίας του αγροτικού τοπίου, εντός των εθνικών πάρκων και, γενικότερα, περιοχών προστασίας (Natura 2000 και δασικές περιοχές), χωρίς βέβαια να γίνεται αναφορά στις αναγκαίες συνοδευτικές εγκαταστάσεις. Τέλος, η χωροθέτηση εγκαταστάσεων αξιοποίησης ηλιακής ενέργειας θεωρείται σκόπιμο να λαμβάνει σοβαρά υπόψη τις επιπτώσεις στο τοπίο και τις ενδεχόμενες παρενέργειες σε άλλους τομείς για τους οποίους το τοπίο έχει ιδιαίτερη σημασία. Στο πλαίσιο αυτό, δίνεται «αρνητική χωροταξική κατεύθυνση, για εγκατάσταση έργων ηλιακής ενέργειας στις περιοχές που περιλαμβάνονται στην ΕΑΖ Τουρισμού καθώς και στις σημαντικές ζώνες τοπίου», τις ζώνες δηλαδή που αφορούν τα ήδη υποβαθμισμένα τοπία ή τοπία διεθνούς, εθνικής και περιφερειακής αξίας, όπως το τοπίο του Ολύμπου, η παράκτια Χαλκιδική, εθνικοί δρυμοί και πάρκα, η ζώνη ελιάς, οι δρόμοι του κρασιού κ.α. [49].

Κατά την επεξεργασία του συγκεκριμένου Πλαισίου και αναγνωρίζοντας την προσπάθεια προώθησης επιπρόσθετων κατευθύνσεων και περιορισμών για τις ΑΠΕ, γίνεται εμφανές ότι η κατανόηση των χαρακτηριστικών και των αναγκών κάθε περιοχής αποτελεί προνόμιο του υποκείμενου σχεδιασμού. Ταυτόχρονα, διαφαίνεται η αναγκαιότητα επέκτασης των περιορισμών και των κριτηρίων στην χωροθέτηση ΑΠΕ σε περιοχές της περιφέρειας, μέσα από μία σειρά προτάσεων και κατευθύνσεων, χωρίς όμως δεσμευτικό χαρακτήρα, καθώς όπως ήδη έχει αναφερθεί, τα κριτήρια χωροθέτησης των ΑΠΕ καθορίζονται σε εθνικό επίπεδο μέσω του Ειδικού Χωροταξικού Πλαισίου. Σαφώς και εδώ δεν υπάρχει η αναγκαία εξειδίκευση ή κάποια πρόταση χωροθέτησης ΑΠΕ σύμφωνα με τη φέρουσα ικανότητα αλλά και τα χαρακτηριστικά κάθε περιοχής, δήμου ή δημοτικής ενότητας, ωστόσο αυτό είναι

εφικτό μόνο στο αμέσως επόμενο επίπεδο, εκείνο του τοπικού σχεδιασμού, το οποίο καλείται να εναρμονιστεί με τις κατευθύνσεις τόσο του νέου Περιφερειακού Χωροταξικού Πλαισίου όσο και του θεσπισμένου Ειδικού Χωροταξικού Πλαισίου. Επίσης διαπιστώνεται ότι ο σχεδιασμός στο τοπικό επίπεδο (Γενικά Πολεοδομικά Σχέδια – νυν Τοπικά Πολεοδομικά Σχέδια) για μεγάλο ποσοστό των δημοτικών ενοτήτων της Περιφέρειας είτε δεν είναι πρόσφατός και προηγείται του Ειδικού Χωροταξικού Πλαισίου και γενικότερα χρήζει αναθεώρησης, είτε, ακόμα και αν υφίσταται δεν πραγματοποιεί εξειδικεύσεις ή προτάσεις στην κατεύθυνση της αναγκαίας ενεργειακής μετάβασης. Εξάλλου τα ζητήματα χωροθέτησης των ΑΠΕ δεν είναι βέβαιο κατά πόσο μπορούν να αντιμετωπίζονται σε επίπεδο ΓΠΣ που είναι στην ουσία ρυθμιστικού χαρακτήρα σχεδιασμός.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εισήγηση τέθηκε και διερευνήθηκε το κρίσιμο ζήτημα της ενεργειακής μετάβασης, καθώς και οι χωρικές της διαστάσεις τόσο σε γενικό επίπεδο όσο και σε ειδικό, μέσα από τα πλαίσια και τα σχέδια που αφορούν την περιφέρεια της Κ. Μακεδονίας. Είναι σαφής η αυξανόμενη αναγνώριση τόσο του πως η ενεργειακή μετάβαση επηρεάζει τον χώρο όσο και το πως η παράμετρος του χώρου επηρεάζει τα ενεργειακά συστήματα.

Όσον αφορά την ενεργειακή μετάβαση και τη σχέση της με τον χωρικό σχεδιασμό, εντοπίζεται στη χώρα μας, σε σύγκριση με συστήματα χωρικού σχεδιασμού άλλων χωρών, η περιορισμένη συμμετοχή του τοπικού σχεδιασμού, με το εθνικό επίπεδο να κατέχει το σύνολο σχεδόν των αρμοδιοτήτων γύρω από τον καθορισμό των κριτηρίων και των περιορισμών για την χωροθέτηση ΑΠΕ, γεγονός που ενδεχομένως υπαγορεύεται από τα χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης δραστηριότητας αλλά πιθανόν περιορίζει και τη συμμετοχή-εμπλοκή των τοπικών κοινωνιών στην τοπική ενεργειακή μετάβαση.

Επίσης, η διερεύνηση γύρω από το Περιφερειακό Χωροταξικό Πλαίσιο της Κ Μακεδονίας, ανέδειξε τη χρησιμότητα του υποκείμενου σχεδιασμού, τόσο περιφερειακού όσο και τοπικού, στην αναγκαία αλλα και ταυτόχρονα ορθή ανάπτυξη των ΑΠΕ ώστε αφενός να ενισχυθεί η τρέχουσα ενεργειακή μετάβαση και αφετέρου να μειωθούν πιθανές συγκρούσεις χρήσεων γης και να ικανοποιηθεί η ανάγκη καλύτερης προστασία της γης, του τοπίου και του ευρύτερου φυσικού και κοινωνικο-οικονομικού περιβάλλοντος.

Συνοψίζοντας, η πρόκληση της κλιματικής αλλαγής καθώς και η συνεχής συνειδητοποίηση των περιορισμών στη χωροθέτηση ΑΠΕ επιβεβαιώνουν ότι οι στόχοι για το κλίμα και την ενέργεια πρέπει να αποτελούν αναπόσπαστο μέρος των χωρικών πολιτικών σε όλα τα επίπεδα σχεδιασμού. Αν και προς το παρόν ο χωρικός σχεδιασμός που συνδέεται με το θέμα της ενέργειας ακολουθεί κυρίως τις ανάγκες που θέτει η ενεργειακή πολιτική, είναι αναγκαία η μελέτη και της αντίστροφης σχέσης, του τρόπου δηλαδή με τον οποίο η πολιτική για το κλίμα και την ενέργεια θα συμβάλει στους στόχους του χωρικού σχεδιασμού.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Ε. Θωίδου, “Χωροταξικός σχεδιασμός για τις περιφέρειες: εξέλιξη, ευρωπαϊκές διαστάσεις και η Ελληνική εμπειρία,” in *Χώρου ζητήματα: Θεωρίες και μεθοδολογίες για τον σχεδιασμό και την ανάπτυξη*, Εκδόσεις ΖΗΤΗ, 2015, pp. 51–82.

[2] European Commision, *The EU Compendium of Spatial Planning Systems and Policies*. 1997.

[3] Λ. Βασενχόβεν, *Χωροταξικός Σχεδιασμός: Διδακτικό Εγχειρίδιο*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Αρχιτεκτόνων, 2004.

[4] G. Stoeglehner, N. Niemetz, and K. Kettl, “Spatial dimensions of sustainable energy systems : new visions for integrated spatial and energy planning,” *Energy. Sustain. Soc.*, vol. 1, no. 2, pp. 1–9, 2011, doi: 10.1186/2192-0567-1-2.

[5] G. Stoeglehner, G. Neugebauer, S. Erker, and M. Narodoslawsky, *Integrated spatial and energy planning : supporting climate protection and the energy turn with means of spatial planning*. SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology, 2016.

[6] United Nations, “Report of the Conference of the Parties on its 21st session, held in Paris from 30 November to 13 December 2015. Addendum Part two: Action taken by the Conference of the Parties at its twenty-first session,” United Nations Framework Convention on Climate Change, 2015.

[7] IPCC, “Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,” Geneva, Switzerland, 2014. doi: 10.1017/CBO9781139177245.003.

[8] I. V Yentekakis, *Ατμοσφαιρική Ρύπανση, επιπτώσεις, έλεγχος και εναλλακτικές τεχνολογίες*, 2η Έκδοση. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 2010.

[9] P. Wächter, “The Impacts of Spatial Planning on Degrowth,” *Sustainability*, vol. 5, no. 3, pp. 1067–1079, 2013, doi: 10.3390/su5031067.

[10] M. Pasqualetti and S. Stremke, “Energy landscapes in a crowded world: A first typology of origins and expressions,” *Energy Res. Soc. Sci.*, vol. 36, no. October 2017, pp. 94–105, 2018, doi: 10.1016/j.erss.2017.09.030.

[11] P. Picchi, M. van Lierop, D. Geneletti, and S. Stremke, “Advancing the relationship between renewable energy and ecosystem services for landscape planning and design: A literature review,” *Ecosyst. Serv.*, vol. 35, no. February 2018, pp. 241–259, 2019, doi: 10.1016/j.ecoser.2018.12.010.

[12] G. Walker, “Energy , land use and renewables A changing agenda,” *Land use policy*, vol. 12, no. 1, pp. 3–6, 1995, doi: https://doi.org/10.1016/0264-8377(95)90069-E.

[13] G. Bridge, S. Bouzarovski, M. Bradshaw, and N. Eyre, “Geographies of energy transition: Space, place and the low-carbon economy,” *Energy Policy*, vol. 53, pp. 331–340, 2013, doi: 10.1016/j.enpol.2012.10.066.

[14] M. J. Bradshaw, “Global energy dilemmas : a geographical perspective Linked references are available on JSTOR for this article : Global energy dilemmas : a geographical perspective,” *Geogr. J.*, vol. 176, no. 4, pp. 275–290, 2010, doi: 10.1111/j.1475-4959.2010.00375.x.

[15] S. Bouzarovski, “East-Central Europe’s changing energy landscapes: A place for geography,” *Area*, vol. 41, no. 4, pp. 452–463, 2009, doi: 10.1111/j.1475-4762.2009.00885.x.

[16] T. J. Foxon, G. P. Hammond, P. J. Pearson, J. Burgess, and T. Hargreaves, “Transition pathways for a UK Low carbon energy system,” 2009.

[17] European Commission, “The Commission calls for a climate neutral Europe by 2050,” Press release, Brussels, 2018.

[18] K. J. Noorman and G. (viaf)51925304 De Roo, *Energielandschappen - de 3de generatie : over regionale kansen op het raakvlak van energie en ruimte*. Assen : Provincie Drenthe, 2011.

[19] H. Gordijn, F. Verwest, A. van Hoorn, S. Langeweg, and I. Heemskerk, *Energie is ruimte*. Ruimtelijk Planbureau, Den Haag (Netherlands), 2003.

[20] U. R. Fritsche *et al.*, “Energy and Land Use,” 2017. [Online]. Available: http://www.iinas.org/tl_files/iinas/downloads/land/IINAS_2017_UNCCD-IRENA_Energy-Land_paper.pdf.

[21] I. Capellán-Pérez, C. de Castro, and I. Arto, “Assessing vulnerabilities and limits in the transition to renewable energies: Land requirements under 100% solar energy scenarios,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 77, no. May, pp. 760–782, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.03.137.

[22] C. Baranzelli, C. Perpiña Castillo, A. Lopes Barbosa, F. Batista E Silva, C. Jacobs-Crisioni, and C. Lavalle, “Land allocation and suitability analysis for the production of food, feed and energy crops in the period 2010 - 2050 EU Reference Scenario 2013 LUISA platform – Updated Configuration 2014,” 2015. doi: 10.2788/93483.

[23] Εφημερίς της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας, “Έγκριση ειδικού πλαισίου χωροταξικού σχεδιασμού και αειφόρου ανάπτυξης για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας,” Εθνικό Τυπογραφείο, Αθήνα, 2008.

[24] M. J. Pasqualetti, “The Land Use Focus of Energy Impacts,” in *Energy and Land Use Planning*, New Brunswick, NJ, USA.: Transaction Publishers, 1990, pp. 99–136.

[25] S. E. Owens, “Land-Use Planning for Energy Efficiency,” *Appl. Energy*, vol. 43, pp. 81–114, 1992.

[26] Α. Γουργιώτης and Γ. Τσιλιμίγκας, "Ο ρόλος του χωροταξικού σχεδιασμού στην ανάπτυξη των ΑΠΕ," in *Τεχνικά Χρονικά: Επιστημονική Εκδοση ΤΕΕ*, vol. 1, no. 1, 2011, pp. 1–10.

[27] L. Krog and K. Sperling, "A comprehensive framework for strategic energy planning based on Danish and international insights," *Energy Strateg. Rev.*, vol. 24, no. February, pp. 83–93, 2019, doi: 10.1016/j.esr.2019.02.005.

[28] D. Galland and S. Enemark, "The Danish National Spatial Planning Framework. Draft version," *Plan. States Nation / States A Transatl. Explor.*, no. October, 2012, [Online]. Available: http://www.ucd.ie/t4cms/Galland__Enemark_The_Danish_National_Spatial_Strategy.pdf.

[29] F. Hvelplund, P. A. Østergaard, and N. I. Meyer, "Incentives and barriers for wind power expansion and system integration in Denmark," *Energy Policy*, vol. 107, no. May, pp. 573–584, 2017, doi: 10.1016/j.enpol.2017.05.009.

[30] C. Persson, "Deliberation or doctrine? Land use and spatial planning for sustainable development in sweden," *Land use policy*, vol. 34, pp. 301–313, 2013, doi: 10.1016/j.landusepol.2013.04.007.

[31] V. Wretling, U. Gunnarsson-Östling, C. Hörnberg, and B. Balfors, "Strategic municipal energy planning in Sweden – Examining current energy planning practice and its influence on comprehensive planning," *Energy Policy*, vol. 113, no. September 2017, pp. 688–700, 2018, doi: 10.1016/j.enpol.2017.11.006.

[32] Energimyndigheten, "Riksintresse vindbruk 2013," vol. 0, no. 202100, pp. 0–33, 2013.

[33] S. H. Siyal, U. Mörtberg, D. Mentis, M. Welsch, I. Babelon, and M. Howells, "Wind energy assessment considering geographic and environmental restrictions in Sweden: A GIS-based approach," *Energy*, vol. 83, no. 2015, pp. 447–461, 2015, doi: 10.1016/j.energy.2015.02.044.

[34] M. Pettersson, "Renewable Energy Development and the Function of Law," Luleå University of Technology, 2008.

[35] K. Ek, L. Persson, M. Johansson, and Å. Waldo, "Location of Swedish wind power-Random or not? A quantitative analysis of differences in installed wind power capacity across Swedish municipalities," *Energy Policy*, vol. 58, pp. 135–141, 2013, doi: 10.1016/j.enpol.2013.02.044.

[36] T. Lauf, K. Ek, E. Gawel, P. Lehmann, and P. Söderholm, "The regional heterogeneity of wind power deployment: an empirical investigation of land-use policies in Germany and Sweden," *J. Environ. Plan. Manag.*, vol. 63, no. 4, pp. 751–778, 2020, doi: 10.1080/09640568.2019.1613221.

[37] D. Ohlhorst, "Germany's energy transition policy between national targets and decentralized responsibilities," *J. Integr. Environ. Sci.*, vol. 12, no. 4, pp. 303–322, 2015, doi: 10.1080/1943815X.2015.1125373.

[38] T. Haas, "Comparing energy transitions in Germany and Spain using a political economy perspective," *Environ. Innov. Soc. Transitions*, vol. 31, no. October 2017, pp. 200–210, 2019, doi: 10.1016/j.eist.2018.11.004.

[39] Γ. Ασημακόπουλος - ΕΚΟΤΕΧΝΙΚΑ, "ΥΠΟΣΤΗΡΙΚΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ: «Ειδικό Πλαίσιο Χωροταξικού Σχεδιασμού και Αειφόρου Ανάπτυξης για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας»," 2007.

[40] Εφημερίς της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας, *ΝΟΜΟΣ ΥΠ' ΑΡΙΘΜ. 4759: Εκσυγχρονισμός της Χωροταξικής και Πολεοδομικής Νομοθεσίας και άλλες διατάξεις*. 2020, pp. 11665–11819.

[41] D. Süsser, M. Döring, and B. M. W. Ratter, "Harvesting energy: Place and local entrepreneurship in community-based renewable energy transition," *Energy Policy*, vol. 101, no. October 2015, pp. 332–341, 2017, doi: 10.1016/j.enpol.2016.10.018.

[42] K. Langer, T. Decker, and K. Menrad, "Public participation in wind energy projects located in Germany: Which form of participation is the key to acceptance?," *Renew. Energy*, vol. 112, pp. 63–73, 2017, doi: 10.1016/j.renene.2017.05.021.

[43] S. Batel, "Research on the social acceptance of renewable energy technologies: Past, present and future," *Energy Res. Soc. Sci.*, vol. 68, no. December 2019, p. 101544, 2020, doi: 10.1016/j.erss.2020.101544.

[44] J. Flacke and C. De Boer, “An interactive planning support tool for addressing social acceptance of renewable energy projects in the Netherlands,” *ISPRS Int. J. Geo-Information*, vol. 6, no. 10, 2017, doi: 10.3390/ijgi6100313.

[45] D. Bidwell, “Thinking through participation in renewable energy decisions,” *Nat. Energy*, vol. 1, no. May, 2016, doi: 10.1038/nenergy.2016.51.

[46] WWF Ελλάς, “Σχολιασμός του Ειδικού Πλαισίου Χωροταξικού Σχεδιασμού και Αειφόρου Ανάπτυξης για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας,” pp. 1–11, 2008.

[47] V. Kati, C. Kassara, Z. Vrontisi, and A. Moustakas, “The biodiversity-wind energy-land use nexus in a global biodiversity hotspot,” *Sci. Total Environ.*, vol. 768, p. 144471, 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144471.

[48] Εφημερίς της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας, *Έγκριση προδιαγραφών για τη σύνταξη των Περιφερειακών Πλαισίων Χωροταξικού Σχεδιασμού και Αειφόρου Ανάπτυξης (προδιαγραφές αξιολόγησης − αναθεώρησης − εξειδίκευσης Περιφερειακών Πλαισίων)*. 2011.

[49] Εφημερίς της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας, *Έγκριση αναθεώρησης του Περιφερειακού Χωροταξικού Πλαισίου της Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας και Περιβαλλοντική Έγκριση αυτού*. 2020.

[50] Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας - ΡΑΕ (2021). Γεωοπληροφοριακός Χάρτης. https://geo.rae.gr/ (Πρόσβαση 03.02.2021).

[51] Εφημερίς της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας, *Κύρωση Του Εθνικού Σχεδίου Για Την Ενέργεια Και Το Κλίμα (ΕΣΕΚ)*. 2019, pp. 55455–55926.

Η ΤΟΠΙΚΗ ΑΥΤΟΔΙΟΙΚΗΣΗ ΜΟΧΛΟΣ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΕΥΡΩΠΑΪΚΩΝ ΚΑΙ ΕΘΝΙΚΩΝ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΔΙΚΑΙΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΜΕΤΑΒΑΣΗΣ

Δ. Μπουλογιώργου[1]*, Φ. Μαρκόπουλος[2], Π. Κτενίδης[1], Ι.Κ. Καλδέλλης[1]

[1*]Εργαστήριο Ήπιων Μορφών Ενέργειας & Προστασίας Περιβάλλοντος,
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής
[2]Δήμος Ιλίου, Κάλχου 48-50 13122 Ίλιον Τ.Θ. 41046, Αθήνα 12201,
dboulogiorgou@uniwa.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η Ενεργειακή Φτώχεια (ΕΦ) αποτελεί ένα μεγάλο κοινωνικό πρόβλημα και μια μεγάλη πρόκληση τόσο για την ηγεσία της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ) όσο και των κρατών μελών στο πλαίσιο μιας δίκαιης Ενεργειακής Μετάβασης (ΕΜ) σε καθαρότερες ενεργειακές λύσεις. Δυστυχώς, τα Ενεργειακά Φτωχά νοικοκυριά δεν μπορούν να έχουν πρόσβαση σε βασικές ενεργειακές υπηρεσίες με συνέπεια σχεδόν 34 εκατομμύρια Ευρωπαίων να μην είναι σε θέση να διατηρήσουν τα σπίτια τους σε ανεκτή θερμοκρασία το χειμώνα του 2018. Αντίστοιχα, ποσοστό 32.5% των Ελλήνων, το 2019, δήλωσαν ότι πλήρωσαν εκπρόθεσμα τους ενεργειακούς τους λογαριασμούς λόγω της οικονομικής τους κατάστασης.

Στα Εθνικά Σχέδια για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ), που συνέταξαν τα κράτη μέλη της ΕΕ, όφειλαν να προβλέπουν τη δημιουργία σχεδίου δράσης για την αντιμετώπιση της ΕΦ καθώς και δράσεις για τον προσδιορισμό του αριθμού των νοικοκυριών που ζουν σε συνθήκες ΕΦ. Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή, με την από τις 14 Οκτωβρίου 2020 σύστασή της για την ΕΦ, καθιστά σαφή τη στρατηγική υλοποίησης των πολιτικών της ΕΕ σε κάθε κράτος μέλος, ενώ επισημαίνεται ιδιαίτερα ο σημαντικός ρόλος των τοπικών και περιφερειακών αρχών και της κοινωνίας των πολιτών για την επιτυχή έκβαση της αντιμετώπισης του φαινομένου της ΕΦ. Επιπλέον, επισημαίνεται η ανάγκη καταγραφής των ενεργειακά φτωχών νοικοκυριών ώστε να αξιοποιηθούν στο μέγιστο τα ευρωπαϊκά χρηματοδοτικά προγράμματα, συμπεριλαμβανομένων των προγραμμάτων της πολιτικής συνοχής για την αντιμετώπιση της ΕΦ.

Τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας σχετικά με την ΕΦ προκύπτουν από τη δυναμική της συν-εξέλιξης (co-evolution) που συνθέτει και αξιοποιεί το μοντέλο της Τετραπλής Έλικας μεταξύ της ερευνητικής ομάδας του Εργαστηρίου Ήπιων Μορφών Ενέργειας και Προστασίας Περιβάλλοντος (του Πα.Δ.Α.), του Δήμου Ιλίου, της τοπικής κοινωνίας των πολιτών και των εμπλεκόμενων επιχειρήσεων (πάροχοι, διαχειριστές) του τομέα της ενέργειας, με στόχο τη βιώσιμη στρατηγική υλοποίησης των αναγκαίων ευρωπαϊκών πολιτικών σε εθνικό και τοπικό επίπεδο για τη μείωση και τελικά την εξάλειψη της ΕΦ.

Αποτέλεσμα της έρευνας είναι οι προδιαγραφές και η δημιουργία Μητρώου Ενεργειακά Ευάλωτων Νοικοκυριών (ΕΕΝ) και η επιτόπια καταγραφή του φαινομένου για τη στοχευμένη δράση ανάσχεσής του, βάσει των καταγεγραμμένων αναγκών της τοπικής κοινωνίας και στην παρούσα εφαρμογή του Δήμου Ιλίου. Ακολουθεί η αποτύπωση των βασικών ενεργειακών αναγκών των ΕΕΝ και η ανάλογη κατανομή δημόσιων πόρων για την ενεργειακή αναβάθμιση των κατοικιών τους. Τέλος προτείνεται και τεκμηριώνεται η παραγωγή και διαχείριση της ενέργειας από την τοπική αυτοδιοίκηση στο πλαίσιο μιας ενεργειακής κοινότητας με σκοπό τη διανομή των ωφελειών της απελευθέρωσης της αγοράς της ενέργειας ειδικά σε αυτούς που το έχουν περισσότερο ανάγκη.

Λέξεις Κλειδιά: *Ενεργειακή Φτώχεια, Ενεργειακά Ευάλωτα Νοικοκυριά, Τοπική Αυτοδιοίκηση, Τετραπλή Έλικα, Ενεργειακή Πολιτική*

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ενεργειακή Φτώχεια (Ενεργειακή Ένδεια & Ενεργειακή Πενία) είναι η κατάσταση που βιώνει ένα νοικοκυριό όταν δεν έχει πρόσβαση στις πλέον βασικές υπηρεσίες ενέργειας για επαρκή θέρμανση, μαγείρεμα, φωτισμό και τη χρήση οικιακών συσκευών. Για όσους βιώνουν τη φτώχεια αυτό θα σήμαινε «***να διαλέξουν ανάμεσα στη θέρμανση ή το φαγητό***». Η ΕΦ προκαλείται από ένα πολυσύνθετο συνδυασμό παραγόντων. Τρεις από τους σημαντικότερους παράγοντες είναι:

- το ανεπαρκές εισόδημα των νοικοκυριών
- το υψηλό κόστος ενέργειας και
- η αυξημένη κατανάλωση ενέργειας (kWh ανά m^2) που σχετίζεται με την έλλειψη ενεργειακής αποδοτικότητας των κτιρίων και των ηλεκτρικών οικιακών συσκευών [1].

Το φαινόμενο της Ενεργειακής Φτώχειας (ΕΦ) απασχολεί έντονα τη σύγχρονη κοινωνία λόγω της έκτασης του, των συνεπειών του στην ποιότητα ζωής των πολιτών, της αδυναμίας αντιμετώπισης των αιτιών που το προκαλούν και της μέχρι σήμερα στρατηγικής διάθεσης των πόρων που προσανατολίζεται κυρίως σε επιδοματικές πολιτικές και ανακουφιστικές πρακτικές. Δυσκολία υπάρχει και στην αποτελεσματική εφαρμογή της κοινωνικής πολιτικής με αποτέλεσμα το γράμμα του νόμου να μην ικανοποιεί το «κοινό περί δικαίου αίσθημα» [2].

Ο μέσος όρος των νοικοκυριών που αδυνατούν να εξοφλήσουν εγκαίρως λογαριασμούς κοινής ωφέλειας μειώθηκε από 9% σε 7% κατά την περίοδο 2010-2017, αλλά εξακολουθούν να παρατηρούνται τεράστιες αποκλίσεις μεταξύ των κρατών μελών της ΕΕ των 28. Το 2019, ποσοστό 32.5% των Ελλήνων δήλωσαν ότι πλήρωσαν εκπρόθεσμα τους ενεργειακούς τους λογαριασμούς λόγω οικονομικών περιορισμών [3]. Πανελλαδικά σύμφωνα με στοιχεία του Διαχειριστή Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΔΕΔΔΗΕ) και της Ρυθμιστικής Αρχής Ενέργειας (ΡΑΕ) σχετικά με τις εντολές αποκοπών έχουν εκτελεστεί 227.418 αποκοπές το έτος 2019 και εκκρεμούν 21.928, γεγονός που μαρτυρά το μέγεθος του προβλήματος της ΕΦ στη χώρα μας.

Παρά το γεγονός ότι δεν υφίσταται κοινός ορισμός της ΕΦ τόσο σε ευρωπαϊκό, όσο και σε εθνικό επίπεδο, το Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ) στο πλαίσιο του «Παρατηρητηρίου της Ενεργειακής Φτώχειας» χρησιμοποιεί ως δείκτη για την ποσοτικοποίηση του φαινομένου της ενεργειακής ένδειας το ποσοστό των νοικοκυριών που αδυνατούν να καλύψουν το 80% των ελάχιστων ενεργειακών αναγκών τους. Το φαινόμενο της ΕΦ έχει ενταθεί τα τελευταία χρόνια κυρίως λόγω των επιπτώσεων της οικονομικής ύφεσης, γεγονός που καταγράφεται στο πλαίσιο «Έρευνας Εισοδήματος και Συνθηκών Διαβίωσης των Νοικοκυριών» της Ελληνικής Στατιστικής Υπηρεσίας (ΕΛΣΤΑΤ) [4].

Το δικαίωμα σε καθαρή και προσιτή ενέργεια, το οποίο περιλαμβάνεται μεταξύ των δεκαεπτά (17) Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης [5], θα πρέπει να διασφαλίζεται σε κάθε ευρωπαίο πολίτη. Το ζητούμενο σε ευρωπαϊκό επίπεδο είναι μια δίκαιη ενεργειακή και κλιματική μετάβαση κατά την οποία «δεν θα μείνει κανείς πίσω» και θα έχει ως σημείο εκκίνησης την εξάλειψη της ενεργειακής φτώχειας. Η (ηλεκτρική) ενέργεια παρέχει υπηρεσίες ζωτικής σημασίας και ορίζεται ως Υπηρεσία Κοινής Ωφέλειας (ΥΚΩ). Η πρόσβαση των ευάλωτων πολιτών σε βασικές ενεργειακές υπηρεσίες αποτελεί το βασικό πυλώνα της δίκαιης ΕΜ [6]. Η ΕΕ μέσω της Συνθήκης για τη Λειτουργία της Ευρωπαϊκής Ένωσης εγγυάται τη διανομή υποχρεώσεων «καθολικής υπηρεσίας[1]» για τις συγκεκριμένες υπηρεσίες.

Για το σχεδιασμό και την εφαρμογή λύσεων καταπολέμησης του φαινομένου της ΕΦ, απαιτείται η ευρύτερη συνεργασία ερευνητικών και επιχειρηματικών φορέων, της τοπικής αυτοδιοίκησης και της τοπικής κοινωνίας. Το πρώτο βήμα στη κοινή δράση των εμπλεκόμενων φορέων είναι η δημιουργία Μητρώου ΕΕΝ. Η διαδικασία δημιουργίας του Μητρώου αρχικά ορίζει τα στοιχεία που καταγράφονται ενώ στη συνέχεια η επεξεργασία τους θα έχει ως αποτέλεσμα την αξιολόγηση της έκτασης και του χαρακτήρα του φαινομένου σε τοπικό επίπεδο. Η συλλογή των στοιχείων πραγματοποιείται με επιτόπιες επισκέψεις σε ΕΕΝ και καταγραφή των τεχνικών και των κοινωνικών παραμέτρων του φαινομένου. Η συνέργεια που έχει σχηματιστεί, δημιουργεί δίαυλο επικοινωνίας μεταξύ των εμπλεκόμενων φορέων [7]. Με τον τρόπο αυτό διασφαλίζεται η ολοκληρωμένη αντιμετώπιση του φαινομένου και η εύρυθμη υλοποίηση της συνεργασίας μεταξύ των εμπλεκόμενων φορέων για το σχεδιασμό και την επιτυχή εφαρμογή των προτεινόμενων λύσεων, ενθαρρύνεται η συμμετοχή όλων και καλλιεργούνται νέες ιδέες κοινά αποδεκτές που οδηγούν σε αποτελεσματική αντιμετώπιση του φαινομένου της ΕΦ.

[1] Σύμφωνα με την **Οδηγία 2002/22/ΕΕ** του Συμβουλίου του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου, η Καθολική Υπηρεσία συνίσταται στην παροχή καθορισμένης στοιχειώδους δέσμης υπηρεσιών καθορισμένης ποιότητας, σε όλους τους τελικούς χρήστες, σε προσιτή τιμή.

Στην παρούσα έρευνα συμπεριλαμβάνεται έρευνα πεδίου και μελετώνται οι δυναμικές που αναπτύσσονται στη συνέργεια που σχεδιάστηκε και σχηματίστηκε σε τοπικό επίπεδο με σκοπό την αντιμετώπιση του φαινομένου της ΕΦ και την αποτελεσματικότητα του ερευνητικού έργου τόσο σε επίπεδο σχεδιασμού όσο και εφαρμογής των ερευνητικών μελετών [8]. Συμμετέχοντες στη συνέργεια είναι το ΗΜΕ & ΠΡΟΠΕ του Πα.Δ.Α, ο Δήμος Ιλίου, ο διαχειριστής ηλεκτρικής ενέργειας ΔΔΕΔΗΕ Α.Ε, η ΔΕΗ Α.Ε και τα ΕΕΝ του Δήμου Ιλίου. Σκοπός είναι η δημιουργία Μητρώου ΕΕΝ με στόχο τη χρήση του ως εργαλείο για την αντιμετώπιση του φαινομένου της ΕΦ. Δείκτες που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της δράσης είναι:

- ο αριθμός των ωφελούμενων ΕΕΝ
- ο εμπλουτισμός των αρχείων της τεχνικής υπηρεσίας του Δήμου σχετικά με την κατάσταση του κτιριακού αποθέματος της περιοχής
- οι τεχνικές λύσεις που υποστηρίζουν την εξασφάλιση βασικών ενεργειακών αναγκών σε ευάλωτα νοικοκυριά
- η καταγραφή των δυσκολιών που παρουσιάστηκαν σε ρυθμιστικό, νομικό, κοινωνικό, τεχνολογικό και επίπεδο διακυβέρνησης
- οι λύσεις που εφαρμόστηκαν και τέλος
- ο αριθμός των μέτρων που δρομολογήθηκαν και των πολιτικών που επηρεάστηκαν προς την κατεύθυνση επίλυσης του φαινομένου.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Σε αυτή την έρευνα εξετάζουμε το φαινόμενο της ΕΦ πολυεπίπεδα και συνδυαστικά. Για το σκοπό αυτό ξεκινάμε με διερεύνηση του θεσμικού και ρυθμιστικού πλαισίου που αφορά την καταγραφή και την αντιμετώπιση του φαινομένου της ΕΦ, τόσο σε Ευρωπαϊκό όσο σε Εθνικό και τοπικό επίπεδο. Ακολούθως, αποτυπώνουμε τους εμπλεκόμενους φορείς και τις μεταξύ τους σχέσεις. Στη συνέχεια ερευνούμε τις επιρροές που εμφανίζονται μεταξύ των εμπλεκόμενων φορέων και τον τρόπο επικοινωνίας μεταξύ τους. Στην επόμενη φάση μελετάμε τη διαδικασία εφαρμογής των πολιτικών, η οποία περιγράφεται λόγω της ροής των πολιτικών από πάνω προς τα κάτω (top down). Αντίστοιχα μελετάμε και την αντίστροφη διαδικασία μεταφοράς πολιτικών από κάτω προς τα επάνω (bottom up), δηλαδή πως οι πολίτες και ο τρίτος τομέας[2] μπορούν να επηρεάσουν τις πολιτικές αποφάσεις κυρίως μέσα από τη διαδικασία της διαβούλευσης. Στόχος είναι η ανάλυση της δυναμικής στο σύστημα που διαμορφώνεται με σκοπό τη διευκόλυνση της επικοινωνίας και της ροής της γνώσης. Αυτή η εξέλιξη θα έχει σαν αποτέλεσμα την εύρυθμη συνεργασία μεταξύ των εμπλεκόμενων φορέων και τον αποτελεσματικό σχεδιασμό και εφαρμογή των πολιτικών για την αντιμετώπιση του φαινομένου της ΕΦ.

Προτείνεται και διερευνάται η αντιμετώπιση του φαινομένου της ΕΦ σε τοπικό επίπεδο με τη δημιουργία συνεργειών όλων των βασικών εμπλεκόμενων φορέων. Βασικός φορέας των συνεργειών η τοπική αυτοδιοίκηση, που λειτουργεί ως μοχλός αξιοποίησης του νομικού, ρυθμιστικού και οργανωτικού πλαισίου και της διάθεσης πόρων σε Ευρωπαϊκό και Εθνικό επίπεδο. Αυτή η ιδιότητα της τοπικής αυτοδιοίκησης αναπτύσσεται λόγω της εγγύτητας με την τοπική κοινωνία αλλά και της γνώσης των τοπικών συνθηκών σε κοινωνικό, τεχνολογικό αλλά και διοικητικό επίπεδο.

Η διάδοση της γνώσης και η εφαρμογή νέων τεχνολογιών υποστηρίζουν τόσο την τεχνολογική όσο και την κοινωνική καινοτομία διαδραματίζοντας κυρίαρχο ρόλο στη διαμόρφωση και εφαρμογή πολιτικών για την εξασφάλιση πρόσβασης των ευάλωτων πολιτών σε βασικές ενεργειακές υπηρεσίες. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται ένας μηχανισμός που δρα στο κοινωνικο-τεχνικό περιβάλλον της σύγχρονης ΕΜ, με πρόσβαση συνδυαστικά στην καθημερινότητα των ΕΕΝ, στην έρευνα και την πολιτική και απώτερο σκοπό να διασφαλίσει το δίκαιο χαρακτήρα της ΕΜ.

Τέλος, πραγματοποιείται συστηματική καταγραφή, κατηγοριοποίηση και ανάλυση των δεδομένων με τη μήτρα λογικού πλαισίου «Logframe» μέσω της Προσέγγισης Λογικού Πλαισίου (LFA). Καταρτίζονται και χρησιμοποιούνται ερωτηματολόγια στο πλαίσιο της έρευνας πεδίου, με επιτόπιες επισκέψεις, συνεντεύξεις και συναντήσεις εργασίας με όλους τους εμπλεκόμενους φορείς.

[2] Ανάμεσά στο Κράτος και στην αγορά έχει αρχίσει να αναπτύσσεται σε πολλές οικονομίες ένας τρίτος τομέας, ο επονομαζόμενος τομέας της κοινωνικής οικονομίας.

2.1 Το πλαίσιο πολιτικής (Ευρώπη - Ελλάδα)

Στην παρούσα έρευνα εξετάστηκε αρχικά το υφιστάμενο πλαίσιο πολιτικής αντιμετώπισης του φαινομένου της Ενεργειακής Φτώχειας σε ευρωπαϊκό, εθνικό και τοπικό/περιφερειακό επίπεδο.

Σε επίπεδο ΕΕ καταγράφηκαν:

- οι οδηγίες 2003/54/ΕΚ [9] και 2009/72/ΕΚ [10] που αφορούν τη ρύθμιση της αγοράς φυσικού αερίου και ηλεκτρικής ενέργειας, όπου επισημαίνεται ότι πρέπει να ληφθούν μέτρα για την προστασία των πολιτών από τη διακοπή παροχής ηλεκτρικής ενέργειας και την αδυναμία πληρωμής των λογαριασμών, αναλόγως των εθνικών συνθηκών
- το τρίτο ενεργειακό πακέτο, όπου περιέχονται μέτρα για την προστασία των καταναλωτών και υπέρ των κοινωνικά αδυνάτων
- η οδηγία για την ενεργειακή απόδοση 2012/27/ΕΚ [11] EED και η οδηγία για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων 2010/31/ΕΚ [12] EPBD, στις οποίες περιλαμβάνονται μέτρα μετριασμού της Ενεργειακής Φτώχειας και το Καθεστώτος Υποχρέωσης (Obligation schemes), που αφορά στις εταιρείες διανομής και πώλησης ενέργειας. Συγκεκριμένα μέτρα που πρέπει να λάβουν οι εταιρείες ώστε να βοηθήσουν τους τελικούς καταναλωτές να βελτιώσουν την ενεργειακή απόδοση των νοικοκυριών τους.
- το πακέτο καθαρής ενέργειας για όλους με ειδικές προβλέψεις για ενεργειακά φτωχά και ευπαθή νοικοκυριά (Clean Energy for all) [13].
- η οδηγία 2018/844/ΕΚ, αναθεώρηση των οδηγιών EED & EPBD [14] και
- το παρατηρητήριο της ΕΕ για την Ενεργειακή Φτώχεια (EPOV) [15] που παρέχει πληροφορίες σχετικά με το σχεδιασμό πρακτικών πολιτικών αντιμετώπισης της ενεργειακής φτώχειας στους δήμους σε τρία στάδια:
    i. λίστα μέτρων (επιλογή της καταλληλότερης πολιτικής λαμβάνοντας υπόψη της ιδιαιτερότητες της περιοχής και τις δυνατότητες χρηματοδότησης)
    ii. διερεύνηση μέτρου λαμβάνοντας υπόψη τους ωφελούμενους στους οποίους εστιάζουν τα μέτρα και σε όλους τους εμπλεκόμενους φορείς και
    iii. καθορισμός μέτρων

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή στις 14/10/2020 εξέδωσε σύσταση προς τα κράτη μέλη που αφορά την αντιμετώπιση της ΕΦ [6]. Στο οικείο ΕΣΕΚ, τα κράτη μέλη πρέπει να εκτιμούν τον αριθμό των νοικοκυριών που πλήττονται από την ενεργειακή φτώχεια. Επιπλέον, εξετάζεται το ερώτημα πώς μπορούν να ενσωματωθούν οι γενικευμένες διατάξεις που συμπεριλαμβάνονται στις ευρωπαϊκές οδηγίες στο εθνικό δίκαιο.

Σε εθνικό επίπεδο καταγράφονται μια σειρά από παρεμβάσεις όπως:

- το χρηματοδοτικό πρόγραμμα: Εξοικονομώ κατ' οίκον,
- το Κοινωνικό Οικιακό Τιμολόγιο και
- το επίδομα Πετρελαίου Θέρμανσης

Στο ΕΣΕΚ αναφέρεται πως η στρατηγική καταπολέμησης της ΕΦ θα εξειδικευτεί και αποτυπωθεί στο Σχέδιο Δράσης για την καταπολέμηση της ΕΦ με προγραμματισμό ολοκλήρωσης το πρώτο εξάμηνο του έτους 2020. Η δράση κατάρτιση σχεδίου για την καταπολέμηση του φαινομένου της ΕΦ συμπεριλαμβάνεται στο Πρόγραμμα «Δράσεις για την προώθηση του έργου της Γ.Γ. Ενέργειας & Ορυκτών πρώτων υλών σε θέματα Ενεργειακού Σχεδιασμού, ΑΠΕ, ΣΗΘΥΑ, ΕΞΕ και ΑΦΘ που προέρχονται από ενεργειακή χρήση και εκπόνηση αντίστοιχων Σχεδίων Δράσης στο πλαίσιο των σχετικών οδηγιών της Ε.Ε.» με κωδικό ΟΠΣ (MIS) 5021536, που έχει αναλάβει το Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ) [16]. Το σχέδιο δράσης σύμφωνα με το ΕΣΕΚ θα περιλαμβάνει τόσο τον ορισμό των νοικοκυριών, τα οποία θα χαρακτηρίζονται από ενεργειακή ένδεια μέσω συγκεκριμένων ποσοτικών κριτηρίων, όσο και μια ειδική διαδικασία παρακολούθησης και αξιολόγησης της εξέλιξης της έντασης του φαινομένου. Ποσοτικός στόχος είναι να υπάρξει μείωση κατά τουλάχιστον 50% των σχετικών δεικτών αποτύπωσης της ενεργειακής ένδειας μέχρι το έτος 2025 και μέχρι το έτος 2030 αυτό το ποσοστό να έχει μειωθεί κατά 75% σε σχέση με το έτος 2016 και να είναι αρκετά χαμηλότερα από το μέσο όρο στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Στο ΕΣΕΚ [17] περιγράφονται τα εξής μέτρα που αφορούν αποκλειστικά την εξάλειψη της ΕΦ (βλέπε Πίνακα 1):

Σε τοπικό/περιφερειακό επίπεδο:

- η κάλυψη ενεργειακών χρεών των πολιτών από Δήμους με το πρόγραμμα «Ηλεκτρικό ρεύμα για όλους» [18] και

- ο νόμος για τις ΕΚ: πρόβλεψη για παροχή δωρεάν ενέργειας σε φτωχά νοικοκυριά μέσω της δημιουργίας ενεργειακών κοινοτήτων.

Ο ρόλος των τοπικών και περιφερειακών αρχών σύμφωνα με τη γνωμοδότηση αριθμός (2019/C 404/10) της Ευρωπαϊκής Επιτροπής των Περιφερειών κρίνεται ιδιαίτερα σημαντικός για την αντιμετώπιση του φαινομένου της ΕΦ. Στη γνωμοδότηση τονίζεται ότι οι τοπικές και περιφερειακές αρχές βρίσκονται στην πρώτη γραμμή του σύνθετου αγώνα κατά της ΕΦ [19].

Πίνακας 1: ΕΣΕΚ Στοχευμένα μέτρα πολιτικής με σκοπό την εξάλειψη του φαινομένου της ενεργειακής ένδειας των ενεργειακά ευάλωτων νοικοκυριών

Αρίθμηση	Όνομα μέτρου πολιτικής	Επηρεαζόμενος τομέας	Κατηγορία μέτρου
M15	Πρόβλεψη αυτόματης μετάπτωσης ευάλωτων οικιακών πελατών στο καθεστώς της «Καθολικής Υπηρεσίας».	Οικιακός τομέας	Κανονιστικό μέτρο
M16	Διερεύνηση εισαγωγής «ενεργειακής κάρτας».	Οικιακός τομέας	Οικονομικό μέτρο
M17	Ενεργειακή αναβάθμιση κτιρίων κατοικίας ενεργειακά ευάλωτων νοικοκυριών και προώθηση εγκατάστασης σταθμών ΑΠΕ για κάλυψη των ενεργειακών αναγκών τους	Οικιακός τομέας	Οικονομικό μέτρο
M18	Παροχή κινήτρων σε υφιστάμενους μηχανισμούς για δράσεις σε ευάλωτα νοικοκυριά	Οικιακός τομέας	Οικονομικό μέτρο

Από την παραπάνω έρευνα προκύπτει ότι το πρόβλημα της αντιμετώπισης της ΕΦ έχει αναγνωριστεί τόσο σε Ευρωπαϊκό όσο και σε Εθνικό επίπεδο. Έχει γίνει σαφής η ανάγκη συμμετοχής της Τοπικής Αυτοδιοίκησης ως μέρος της λύσης και όχι ως αποδέκτης πολιτικών [20]. Παρ όλα αυτά διαπιστώνουμε δυσκολίες στην εφαρμογή των σχεδιασμένων πολιτικών και τη δυσκολία διάχυσης του πνεύματος του νομοθέτη στις πρωτοβάθμιες μονάδες διοίκησης με έλλειμα στη εύρυθμη λειτουργία ενός πολυεπίπεδου μοντέλου διακυβέρνησης (multi-level governance model) [21], που θα διευκολύνει την εύρυθμη λειτουργία μεταξύ διαφορετικών κυβερνητικών επιπέδων και την επιτυχημένη εφαρμογή των σχεδιασμένων πολιτικών.

2.2 Ο Δήμος ως μοχλός ενεργειακής μετάβασης, έρευνα για το ρόλο της Τοπικής Αυτοδιοίκησης στη Δίκαιη Ενεργειακή Μετάβαση

Η πολυπλοκότητα του εγχειρήματος και η διασπαρμένη και πολλές φορές χωρίς τις απαραίτητες ρυθμιστικές συνδέσεις κεντρική κρατική πολιτική δημιουργούν ιδιαίτερες συνθήκες στο στάδιο της υλοποίησης της έρευνας για την καταπολέμηση της ΕΦ. Σκοπός του έργου είναι η ολοκληρωμένη καταγραφή των συνθηκών στέγασης των ΕΕΝ και η δημιουργία Μητρώου ΕΕΝ. Το Μητρώο ΕΕΝ στο Δήμο Ιλίου δημιουργείται και εξυπηρετεί εκτός από το σκοπό της καταγραφής των ΕΕΝ, την τοποθέτηση έξυπνων μετρητών στα νοικοκυριά του Δήμου Ιλίου, που βιώνουν το φαινόμενο της ΕΦ. Ο Δήμος Ιλίου έχει αποφασίσει να αναλάβει την εξόφληση λογαριασμών ηλεκτρικού ρεύματος που αφορούν στην κάλυψη των βασικών ενεργειακών αναγκών αυτών των νοικοκυριών περιορίζοντας ταυτόχρονα τον κίνδυνο της εκμετάλλευσης του μέτρου για σπατάλη ενέργειας.

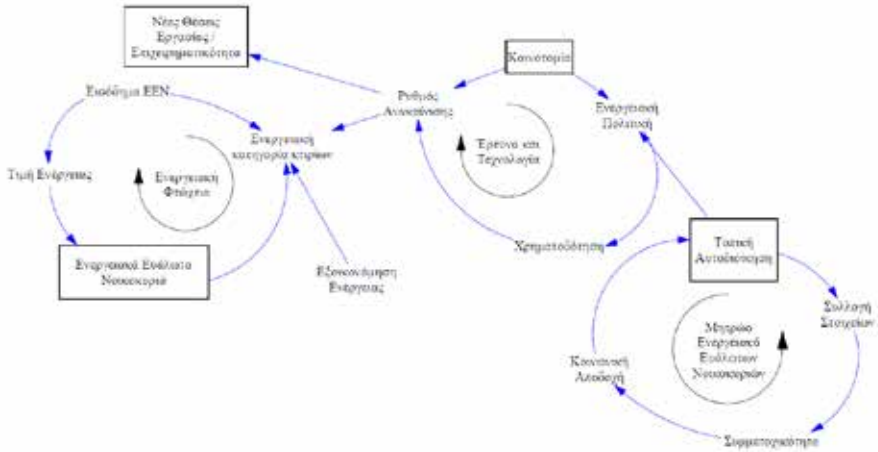
Στο πλαίσιο αυτό εξετάστηκαν οι ενέργειες που έχει δρομολογήσει ο Δήμος Ιλίου σχετικά με την καταπολέμηση του φαινομένου της ΕΦ και κάλυψης των βασικών αναγκών ευάλωτων νοικοκυριών σε συνάρτηση με τις δυσκολίες που αντιμετώπισε κατά την πορεία εκτέλεσης των σχεδιασμένων ενεργειών. Πιο συγκεκριμένα, ο Δήμος Ιλίου διαθέτει δομές παροχής βασικών αγαθών κοινωνικού παντοπωλείου, κοινωνικού συσσιτίου και κοινωνικού φαρμακείου. Το 2012 υπόγραψε το Σύμφωνο των Δημαρχών, διαθέτει Σχέδιο Δράσης για την Αειφόρο Ενέργεια (ΣΔΑΕ) και με την υπ΄ αριθμόν απόφαση 216/2012 δηλώνει την πρόθεση του να αναλάβει τα έξοδα του ηλεκτρικού ρεύματος για όλες τις οικογένειες που βρίσκονται κάτω από το όριο της φτώχειας. Το 2019 συμμετέχει με δράσεις στην Ευρωπαϊκή Εβδομάδα Κινητικότητας ξεκινά τις διαδικασίες για τη σύνταξη Σχεδίου Βιώσιμης Αστικής Κινητικότητας (ΣΒΑΚ) και με την υπ΄ αριθμόν 004/2019 επικαιροποιεί την πρόθεση του Δήμου να αντιμετωπίσει το φαινόμενο της ΕΦ. [22]

Στο πλαίσιο εκπόνησης της δράσης εξετάζονται τα στοιχεία που διαθέτει ο Δήμος για τα ΕΕΝ στην επικράτεια του, καταγράφονται οι εμπλεκόμενοι φορείς, οι αρμοδιότητες του κάθε φορέα που άπτονται της υλοποίησης του έργου, οι δράσεις και οι διαδικασίες που απαιτούν συνεργασία μεταξύ των φορέων.

Είναι πολύ σημαντικό να αποτυπωθεί με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια ένα Σχέδιο Δράσης, που θα αποτελέσει ουσιαστικά οδηγό υλοποίησης και βάση για τη δημιουργία σχετικού προτύπου.

Στα εθνικά / περιφερειακά συστήματα καινοτομίας, εμπλέκονται τέσσερις κύριοι αλληλοεπιδρώντες παράγοντες, γεγονός που οδηγεί στην έννοια του πλαισίου Καινοτομίας της Τετραπλής Έλικας (ΚΤΕ) - Quadruple Innovation Helix framework-(QIH) [23]. Η πανεπιστημιακή κοινότητα και η βιομηχανία αλληλοεπιδρούν και συνεργάζονται ενώ η κυβέρνηση συντονίζει και διευκολύνει την εφαρμογή πολιτικών επιλογών. Ταυτόχρονα, η κοινωνία των πολιτών αποτελεί την τέταρτη έλικα που αλληλοεπιδρά με τις παραπάνω έλικες (αλληλοεπιδρώντες παράγοντες) μέσω διαβούλευσης με τους λοιπούς εμπλεκόμενους. Το συνεργατικό σχήμα που δημιουργήθηκε στο πλαίσιο ΚΤΕ, στη δράση αντιμετώπισης της ΕΦ στο Δήμο Ιλίου, εφαρμόζει την επιστήμη και την τεχνολογία προάγοντας την καινοτομία στην καθημερινότητα των πολιτών και εισάγοντας στη διαβίωση τους όρους όπως η Δίκαιη Ενεργειακή Μετάβαση, η Εξοικονόμηση Ενέργειας και παροχή Υπηρεσιών Κοινής Ωφέλειας σε ΕΕΝ.

Στην έκθεση « Selecting Indicators to Measure Energy Poverty» [24] αναφέρεται ότι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν ή προκαλούν την ΕΦ είναι η ενεργειακή κατάσταση των κατοικιών, οι εφαρμοζόμενες πολιτικές και τέλος οι κοινωνικό-οικονομικοί παράγοντες και τα δημογραφικά στοιχεία. Λαμβάνοντας υπόψη αυτούς τους παράγοντες διαμορφώθηκε μοντέλο που αναπαριστά ένα σύνθετο, δυναμικό, κοινωνικό-τεχνικό, κοινωνικό-οικονομικό και κοινωνικό-πολιτικό σύστημα. Στην Εικόνα 1 αναπαρίσταται η απεικόνιση ενός μοντέλου αλληλεπίδρασης παραγόντων, όπως οι θέσεις εργασίας, οι τιμές ενέργειας, η χρηματοδότηση της ανακαίνισης των κτηρίων κ.λπ., με στόχο την αντιμετώπιση της ενεργειακής φτώχειας με καινοτόμες λύσεις σε τοπικό επίπεδο.



Εικόνα 1: Δυναμικές του Τεχνο-κοινωνικού συστήματος της Ενεργειακής Μετάβασης

Ξεκινώντας με προτεραιότητα τη συλλογή στοιχείων τα οποία είναι ικανά να οδηγήσουν στη διαμόρφωση λειτουργικού Μητρώου ΕΕΝ αντιμετώπισης του φαινομένου της ΕΦ ακολουθήσαμε για την εξέλιξη του μοντέλου συλλογή των δεδομένων που αφορούν τις ιδιαίτερες τοπικές συνθήκες και τους εμπλεκόμενους φορείς με σταδιακή ανάλυση τους. Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα του προηγούμενου σταδίου ανάλυσης με μια σπειροειδή μορφή[3] προσέγγισης οδηγούμαστε σε προσαρμοσμένες αποφάσεις ανά στάδιο και διαμόρφωση της λύσης, λαμβάνοντας υπόψη τις ανάγκες της τοπικής κοινωνίας. Στο πλαίσιο αυτό διερευνήθηκαν τα στοιχεία που διαθέτουν οι φορείς που εμπλέκονται, στη συλλογή των δεδομένων, στη διαχείριση τους και εν τέλει στην υλοποίηση των προτεινόμενων δράσεων [25] [26] [27].

Κατά τη διάρκεια σχεδιασμού της υλοποίησης του προγράμματος του Δήμου Ιλίου διενεργήθηκαν τουλάχιστον δέκα (10) συναντήσεις εργασίας. Η πρώτη συνάντηση εργασίας έγινε στις 25/10/2019, μεταξύ στελεχών του Δήμου Ιλίου, ερευνητών του Εργαστηρίου ΗΜΕ & ΠΡΟΠΕ Πα.Δ.Α και στελεχών του ΔΕΔΔΗΕ Α.Ε κατά τη διάρκεια των οποίων κρατήθηκαν και πρακτικά εργασίας. Στη διάρκεια των

[3] Η σπειροειδής μορφή προσέγγισης είναι κυκλική και σε μορφή σπείρας και όσο περισσότεροι οι άνθρωποι συμμετέχουν στον πειραματισμό και την ανάλυση, τόσο περισσότερο μαθαίνουν[25].

συναντήσεων αυτών ανέκυψαν νομοθετικά και ρυθμιστικά ζητήματα, τα οποία δημιουργούσαν σημαντικά εμπόδια στην πραγματοποίηση του Προγράμματος για την αντιμετώπιση της ΕΦ. Παρ' όλα αυτά ο Δήμος Ιλίου, το ΗΜΕ & ΠΡΟΠΕ, ο ΔΕΔΔΗΕ Α.Ε και η ΔΕΗ Α.Ε, δεν έπαψαν να επιζητούν τη λύση. Η διαδικασία αυτή δημιούργησε δεσμούς εμπιστοσύνης μεταξύ των ομάδων εργασίας.

Παράλληλα, χρησιμοποιήθηκε η Προσέγγιση του Λογικού Πλαισίου (LFA) μια μεθοδολογία για το σχεδιασμό, τη διαχείριση και την αξιολόγηση των προγραμμάτων και των έργων [28]. Με εργαλεία διαχείρισης και ανάλυσης όπως η μήτρα λογικού πλαισίου «Logframe», επιτυγχάνεται η ανάλυση των ενδιαφερόμενων μερών, του προβλήματος, των στόχων και των στρατηγικών, για τη δρομολόγηση των δραστηριοτήτων και των πόρων. Επιλέχθηκε η εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθοδολογίας επειδή είναι αρκετά απλή και χρησιμοποιείται ευρέως σε έργα χρηματοδοτούμενα από την ΕΕ.

Κατά τη διάρκεια της έρευνας καταγράφηκαν στοιχεία που αφορούν μεμονωμένα κάθε αλληλοεπιδρώντα παράγοντα που συμβάλει στην ολοκλήρωση του έργου καθώς και η διάδραση μεταξύ των συμμετεχόντων. Επιπλέον, εντοπίστηκαν τα προβλήματα που παρουσιάζονται αλλά και οι δυνατότητες αντιμετώπισής τους. Στον Πίνακα 2 υπάρχει η μήτρα ανάλυσης των συμμετεχόντων. Καταγράφονται για κάθε συμμετέχοντα ξεχωριστά τα προβλήματα που δημιουργεί το φαινόμενο της ΕΦ, τα ενδιαφέροντα που προκύπτουν για την επίλυση του προβλήματος και τέλος οι δυνατότητες που διαθέτει ο κάθε φορέας προς αυτή την κατεύθυνση.

Πίνακας 2: Μήτρα Ανάλυσης Συμμετεχόντων [Σύμφωνα με τον οδηγό της ΕΕ για το LFA] [29]

Συμμετέχοντες **Βασικά χαρακτηριστικά**	**Προβλήματα που δημιουργεί το φαινόμενο της Ε.Φ**	**Ενδιαφέροντα**	**Δυνατότητες**
Δημοτική αρχή Έλλειψη πόρων και ικανοτήτων για το σχεδιασμό και τη διαχείριση του έργου	Αποκοπές ηλεκτροδότησης, μείωση του επίπεδου ζωής των δημοτών	Πρωταγωνιστικός ρόλος στον εκδημοκρατισμό του τομέα της ενέργειας, δυναμική πρωτοβουλία προς όφελος της τοπικής κοινωνίας	Πρωτοποριακή αντιμετώπιση του προβλήματος της ΕΦ, ενεργοποίηση συμμετοχής της τοπικής κοινωνίας, σημαντική προσφορά στην τοπική κοινωνία. Άμεση γνώση των πολιτών που υφίστανται το πρόβλημα της ΕΦ.
Τοπική κοινωνία Έλλειψη επιχειρηματικής και συνεργατικής κουλτούρας, περιορισμένες οικονομικές δυνατότητες	Επιβάρυνση της υγείας, αποκοπές ηλεκτροδότησης, ανασφάλεια σχετικά με την απελευθέρωση της αγοράς ενέργειας	Ενεργειακή ασφάλεια, προσιτές τιμές, ενεργή συμμετοχή στην ανάπτυξη του τόπου.	Συμμετοχικότητα, δραστική αντιμετώπιση της ΕΦ με άμεση συνεργασία με τα ΕΕΝ
Ακαδημαϊκά και Ερευνητικά Ιδρύματα Παραγωγή γνώσης και τεχνολογίας	Πολύπλοκοι τρόποι διάδρασης με την τοπική κοινωνία	Διάχυση της γνώσης στην κοινωνία, επιστημονική και κοινωνική αναγνώριση, εφαρμογή της παραγόμενης γνώσης, κατάρτιση σχετικού προγράμματος εκπαίδευσης	Δημιουργία ζωντανού εργαστηρίου, δημιουργία προτύπου αντιμετώπισης της ΕΦ σε τοπικό επίπεδο, καινοτομική πρωτοπορία
Φορείς Δημοσίου τομέα (ΥΠΕΝ, ΔΕΔΔΗΕ, ΡΑΕ, ΔΕΗ) Διαχείριση του ενεργειακό τομέα	Δαιδαλώδεις σχετικές διαδικασίες, εμπλοκή διαφορετικών φορέων, έλλειψη σχετικού σχεδιασμού αντιμετώπισης του φαινομένου της ΕΦ	Ομαλή ενεργειακή μετάβαση του ενεργειακού τομέα, ενεργειακή ασφάλεια, ενεργειακή δικαιοσύνη, ενεργειακή βιωσιμότητα	Ρυθμιστικό πλαίσιο, επιδοτήσεις-χρηματοδοτήσεις
Επενδυτές Φορείς Ιδιωτικού τομέα (Ιδιώτης Πάροχος Ενέργειας- Πάροχος υλικοτεχνικού εξοπλισμού) Κερδοφορία αλλά και εικόνα κοινωνικής ευαισθησίας	Καθυστερήσεις πληρωμών σε λογαριασμούς ενέργειας, αβέβαιο επενδυτικό περιβάλλον	Ανάπτυξη προγραμμάτων Εταιρικής Κοινωνικής Ευθύνης και προσφορά στις τοπικές κοινωνίες	Ευκαιρίες επένδυσης στην ανακαίνιση του κτιριακού αποθέματος και στη χρήση ΑΠΕ

Η δράση καταγράφει τα χαρακτηριστικά της ΕΦ σε τοπικό επίπεδο με σκοπό να καταλήξει σε μια λύση περιορισμού του φαινομένου. Στο πλαίσιο αυτό, ο Δήμος Ιλίου αναλαμβάνοντας το ενεργειακό κόστος

αυτών των νοικοκυριών για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, ενώ ο βασικός σκοπός είναι η εύρεση οριστικής λύσης αντιμετώπισης του φαινομένου στην περιοχή ευθύνης του Δήμου Ιλίου. Μέσω των συνεργειών που δημιουργούνται στο πλαίσιο της έρευνας, η τοπική αυτοδιοίκηση έχει σκοπό να δραστηριοποιηθεί ενεργά σε τοπικό επίπεδο για την επίλυση του φαινομένου, την προστασία του περιβάλλοντος, την ενεργοποίηση της συμμετοχικότητας των πολιτών αλλά και τη δημιουργία επιτυχούς παραδείγματος αντιμετώπισης της ΕΦ.

2.3 Το Μητρώο των Ενεργειακά Ευάλωτων Νοικοκυριών

Η δημιουργία του Μητρώου Ενεργειακά Ευάλωτων Νοικοκυριών δεν εξαντλείται στην οργανωμένη καταγραφή των ΕΕΝ βάσει των ενεργειακών τους καταναλώσεων (λογαριασμοί ηλεκτρικού ρεύματος). Για να είναι λειτουργικό το μητρώο πρέπει να συνδυάζει πληροφορίες από τις καταγραφές των κοινωνικών υπηρεσιών του Δήμου. Με σεβασμό στα προσωπικά δεδομένα των ατόμων τα οποία εντάσσονται στα υφιστάμενα μητρώα, τίθεται με αντικειμενικά κριτήρια η σειρά των νοικοκυριών που θα συμμετέχουν στο πρόγραμμα. Για αποφυγή υποβολής παραπλανητικών στοιχείων επιβάλλονται και επιτόπιες καταγραφές στον τόπο διαμονής των ΕΕΝ για τη διαπίστωση και καταγραφή της ενεργειακής κατάστασης των κτιρίων καθώς και την εκτίμηση των κοινωνικό-οικονομικών συνθηκών διαβίωσης (πάντα στο πλαίσιο διακριτικότητας και κοινωνικής ευαισθησίας), ενώ είναι απαραίτητη και η επιβεβαίωση των διαθέσιμων δημογραφικών στοιχείων. Στο πλαίσιο της συνέργειας ΚΤΕ προετοιμάζονται οι επισκέψεις στα ΕΕΝ ώστε με διαδοχικές προσεγγίσεις να εντοπιστούν και να κατηγοριοποιηθούν οι πραγματικές ανάγκες της τοπικής κοινωνίας.

Κατά η διάρκεια της επίσκεψης συμπληρώνονται ερωτηματολόγια με τρέχουσες πληροφορίες για τις συνθήκες διαβίωσης των ενοίκων αλλά και για την ενεργειακή κατάσταση της κατοικίας. Η καταγραφή πραγματοποιείται σε έντυπα-πρωτόκολλα του Εργαστηρίου ΗΜΕ& ΠΡΟΠΕ και τηρούνται απαρέγκλιτα οι αρχές προστασίας των προσωπικών δεδομένων. Η καταγραφή, επεξεργασία και ομαδοποίηση των στοιχείων αυτών αποτελεί την κύρια πηγή δεδομένων για την οικονομοτεχνική αξιολόγηση της υπό σχεδιασμό παρέμβασης.

2.3.1. Επικοινωνία με τους ενεργειακά ευάλωτους καταναλωτές

Λαμβάνοντας υπόψη τη σχετική Εθνική και Ευρωπαϊκή νομοθεσία που αφορά την προστασία των προσωπικών δεδομένων και γνωρίζοντας την ανάγκη ενεργού συμμετοχής των πολιτών για την επιτυχή έκβαση του έργου, η σαφής και ολοκληρωμένη περιγραφή της διαδικασίας επικοινωνίας με τα ΕΕΝ είναι απαραίτητη. Διακατεχόμενοι κυρίως από σεβασμό για τους συμπολίτες μας που αντιμετωπίζουν σοβαρά προβλήματα επιβίωσης αρχικά και δευτερεύοντος ποιότητας διαβίωσης τυποποιείται η διαδικασία επικοινωνίας με τα ΕΕΝ υλοποιώντας τα κάτωθι βήματα:

- τηλεφωνική Προσέγγιση
- πρώτη Συνάντηση
- υπογραφή Υπεύθυνης Δήλωσης για τη συναίνεση επεξεργασίας των δεδομένων στο πλαίσιο πραγματοποίησης του έργου και
- επίσκεψη στην κατοικία

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Ο πιλοτικός χαρακτήρας του έργου έχει σκοπό τη δημιουργία πρότυπου Μητρώου ΕΕΝ και τη δημιουργία σχετικών προδιαγραφών.

Η πραγματοποίηση του πιλοτικού έργου δίνει τη δυνατότητα καταγραφής και αντιμετώπισης του φαινομένου σε πραγματικές συνθήκες. Για το σκοπό αυτό εξετάζονται οι δυναμικές που αναπτύσσονται και προτείνονται λύσεις αντιμετώπισης του φαινομένου σε τοπικό επίπεδο. Στη διάρκεια πραγματοποίησης του έργου καταγράφονται οι δυσκολίες εφαρμογής των πολιτικών και προτείνονται τρόποι βελτίωσης του προς υλοποίηση πλαισίου.

3.1 Έρευνα Καταγραφή

Σε έρευνα του Εργαστηρίου ΗΜΕ & ΠΡΟΠΕ που πραγματοποιήθηκε σε νοικοκυριά της περιοχής από τον Απρίλιο έως τον Ιούνιο 2020 καταγράφηκε το μέγεθος ΕΦ στα νοικοκυριά, η σημαντική αποκάλυψη

της λεγόμενης «κρυφής ενεργειακής φτώχειας»[4], και η ευαισθητοποίηση των πολιτών σε θέματα αντιμετώπισης της ενεργειακής φτώχειας, εξοικονόμησης και ορθολογικής χρήσης της ενέργειας αλλά και κοινωνικής αλληλεγγύης.

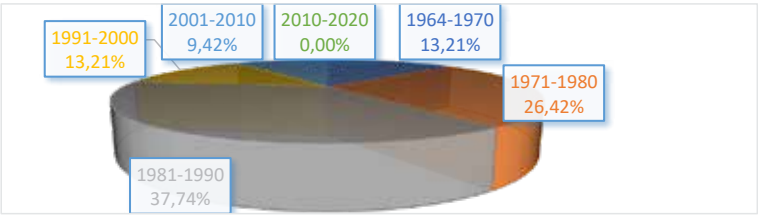
Ερευνήθηκαν τέσσερεις ξεχωριστές κατηγορίες που αφορούν:

- προσωπικά στοιχεία και δημογραφικά δεδομένα (7 ερωτήσεις),
- κτιριακά και αντικειμενικά δεδομένα των κατοικιών όπως πολεοδομικά στοιχεία, στοιχεία που αφορούν τα συστήματα θέρμανσης – ψύξης – ενέργειας και τη χρήση τους (23 ερωτήσεις),
- υποκειμενικά δεδομένα που αφορούν την αποτελεσματικότητα των παραπάνω ενεργειακών δεδομένων (7 ερωτήσεις) και τέλος
- δεδομένα που αφορούν την ευαισθητοποίηση σε θέματα ενεργειακής φτώχειας (10 ερωτήσεις).

Στον πίνακα 3 παρατίθενται ενδεικτικά αποτελέσματα:

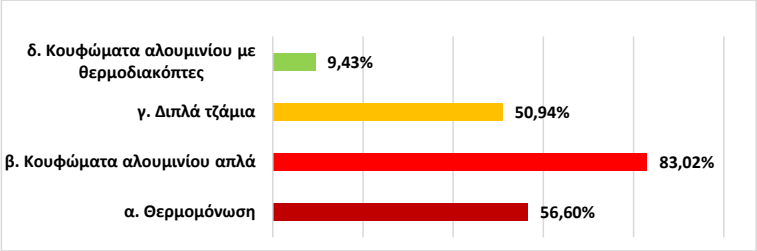
Πίνακας 3: Ενδεικτικά αποτελέσματα έρευνας Εργαστηρίου ΗΜΕ & ΠΡΟΠΕ

Περιγραφή Δείγμα Ερωτηθέντων / Κτιρίων	Ποσοστό
Μισθωτοί	32%
Άνεργοι	4%
Λαμβάνει κάποιου είδους επίδομα (κυρίως Κοινωνικό Τιμολόγιο)	11%
Διαμένει σε κατοικίες κατασκευασμένες μετά το 1980 (Εικόνα 2)	60%
Ιδιοκτήτες της κατοικίας	83%
Κατοικίες 80-99 m²	28%
Κατοικίες 60-79 m²	25%
Κατοικίες 100-119 m²	21%
Κεντρική θέρμανση με πετρέλαιο ως κύριο σύστημα θέρμανσης	60%
Κεντρική θέρμανση με φυσικό αέριο ως κύριο σύστημα θέρμανσης	28%
Δευτερεύον σύστημα θέρμανσης τα κλιματιστικά	36%
Δευτερεύον σύστημα θέρμανσης άλλες ηλεκτρικές συσκευές όπως θερμοσυσσωρευτές, σόμπες, αερόθερμα κλπ.	33%
Κατοικίες που διαθέτουν θερμομόνωση (Εικόνα 3).	57%
Κατοικίες που διαθέτουν διπλά τζάμια (Εικόνα 3).	51%
Κατοικίες που διαθέτουν κουφώματα αλουμινίου (Εικόνα 3).	83%



Εικόνα 2: Απάντηση στο ερώτημα: Έτος κατασκευής κτιρίου

[4] Ο δείκτης της κρυφής ενεργειακής φτώχειας M/2 (Ευρωπαϊκό Παρατηρητήριο Ενεργειακής Φτώχειας), προσμετρά το ποσοστό των νοικοκυριών που έχουν ενεργειακές δαπάνες μικρότερες από το μισό του μέσου όρου της χώρας. Η χρήση αυτού του δείκτη γίνεται στο Βέλγιο και στην Ισπανία [15].



Εικόνα 3: Απάντηση στα ερωτήματα: Η κατοικία διαθέτει θερμομόνωση, διπλά τζάμια, κουφώματα αλουμινίου, κουφώματα αλουμινίου με θερμοδιακόπτες.

3.2 Μητρώο ΕΕΝ, τυπικό νοικοκυριό με αποτύπωση των ενεργειακών αναγκών (άτυπο πιστοποιητικό ενεργειακής απόδοσης), βελτιώσεις κατά ΚΕΝΑΚ, και εκτιμώμενο κόστος

Η έρευνα του Εργαστηρίου ΗΜΕ & ΠΡΟΠΕ του Πα.Δ.Α σχετικά με την Εξοικονόμηση Ενέργειας και την Ενεργειακή Αναβάθμιση κτιρίων *[30]* τόσο σε τοπικό όσο και σε εθνικό επίπεδο έχει ξεκινήσει πριν την εκδήλωση του φαινομένου της οικονομικής κρίσης. Αυτό έδωσε στις ερευνητικές ομάδες του Εργαστηρίου μια ευρύτερη προοπτική σχετικά με την αντιμετώπιση του φαινομένου της ΕΦ. Το Εργαστήριο έχει αναπτύξει συνεργασίες με όμορους του Πα.Δ.Α δήμους και τον Αναπτυξιακό Σύνδεσμο Δυτικής Αττικής (ΑΣΔΑ), και στη συνέχεια έχει επεκταθεί ευρύτερα σε δήμους της Αττικής αλλά και σε νησιωτικούς δήμους με βασική προτεραιότητα τα οφέλη της εφαρμογής της τεχνολογίας για την τοπική κοινωνία.

Με τις επιτόπιες επισκέψεις καταγράφονται κοινωνικά, οικονομικά και τεχνικά δεδομένα. Πραγματοποιήθηκαν 80 περίπου, καταγραφές και επισκέψεις σε αντίστοιχα νοικοκυριά, κατά τη διάρκεια των οποίων συμπληρώθηκαν ερωτηματολόγια με κοινωνικά και οικονομικά χαρακτηριστικά των νοικοκυριών, αλλά και με τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κτιρίου και των ηλεκτρικών συσκευών της οικογένειας. Κατόπιν τα στοιχεία αυτά επεξεργάστηκαν από ερευνητές του Εργαστηρίου ΗΜΕ & ΠΡΟΠΕ και το αποτέλεσμα ήταν η εκτίμηση της ενεργειακής κατηγορίας του κτιρίου και η οικονομοτεχνική αξιολόγηση πιθανών λύσεων ενεργειακής αναβάθμισης της κατοικίας. Στα σχέδια της συγκεκριμένης εφαρμογής εντάσσεται και η έκδοση αντίστοιχων Ενεργειακών Πιστοποιητικών (ΠΕΑ) για τα υπό μελέτη κτίρια. Ενδεικτικά αναφέρονται τα αποτελέσματα από επίσκεψη σε ΕΕΝ. Με την επεξεργασία των στοιχείων επιλέγουμε να εξετάσουμε τρία σενάρια που αφορούν την ενεργειακή αναβάθμιση της κατοικίας και να προβούμε σε οικονομική αξιολόγηση των τεχνικών λύσεων (βλέπε Πίνακα 4).

Πίνακας4: Προτεινόμενες επεμβάσεις βελτίωσης ενεργειακής κατηγορίας του εξεταζόμενου τυπικού κτιρίου (Ενεργειακής Κατηγορίας - Η)

ΚΟΣΤΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΑΠΟΠΛΗΡΩΜΗΣ					
Εξοικονόμηση και κόστη	Κτήριο αναφοράς	Υπάρχον κτήριο	Σενάριο 1 *αλλαγή κουφωμάτων*	Σενάριο 2 *μόνωση*	Σενάριο 3 *ηλιακός θερμοσίφωνας + μόνωση + κουφώματα*
Λειτουργικό κόστος €	476,7	2.529,2	2.295,5	927,7	585,4
Αρχικό κόστος επένδυσης €			2.369,0	5.754,7	8.603,4
Εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας (Kwh/ m^2)			77,4	530,6	644,2
Εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας (%)			9,2	63,3	76,8
Τιμή εξοικονομούμενης ενέργειας (€/Kwh)			0,6	0,2	0,3
Μείωση εκπομπών CO_2 (kgr/ m^2)			22.1	153.5	188
Περίοδος αποπληρωμής (έτη)			10,1	3,6	4,4

3.3 Πρόγραμμα ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΩ και οι Προοπτικές μιας Ενεργειακής Κοινότητας για ΕΕΝ

Ο σχεδιασμός νέων πολιτικών αντιμετώπισης του φαινομένου της ΕΦ θα πρέπει να περιλαμβάνει μέτρα κοινωνικής πολιτικής και βελτιώσεις της ενεργειακής απόδοσης, στοιχεία τα οποία αλληλοενισχύονται, ιδίως στον τομέα της στέγασης. Επιπροσθέτως, η συνέργεια ΚΤΕ που διαμορφώνεται προβλέπεται να αξιοποιήσει πλήρως τις δυνατότητες κινητοποίησης των χρηματοδοτικών προγραμμάτων της ΕΕ, συμπεριλαμβανομένης και αυτών της πολιτικής συνοχής, για την αντιμετώπιση της ενεργειακής φτώχειας, αναλύοντας τα διανεμητικά αποτελέσματα των σχεδίων ενεργειακής μετάβασης και δίνοντας προτεραιότητα στα μέτρα που στοχεύουν σε ευάλωτες ομάδες, ώστε να διασφαλιστεί η πρόσβαση τους σε πραγματική στήριξη. Ο σχεδιασμός επίσης θα φέρει καλύτερα αποτελέσματα με την κατανομή δημόσιων πόρων, ιδίως επιχορηγήσεων, που θα στοχεύσουν σε νοικοκυριά με χαμηλό εισόδημα μεταξύ των κατηγοριών δικαιούχων, που διαθέτουν πολύ περιορισμένους ίδιους πόρους και περιορισμένη πρόσβαση σε εμπορικά δάνεια.

Οι εξελίξεις που συμβαίνουν λόγω της δυναμικής του τεχνο-κοινωνικού συστήματος της σύγχρονης Ενεργειακής Μετάβασης μαρτυρούν την αναγκαιότητα διατήρησης των ρυθμίσεων ενθάρρυνσης δημιουργίας των Ενεργειακών Κοινοτήτων (ΕΚ) που προκύπτουν από το Ν.4513/2018 [31] και τις οδηγίες REDII [32] & EMD [33] . Ο Δήμος Ιλίου μελετά τη σύσταση Ενεργειακής Κοινότητας μη κερδοσκοπικού χαρακτήρα με σκοπό την παραγωγή ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές για την κάλυψη των βασικών ενεργειακών αναγκών των ΕΕΝ και την κατεύθυνση της τοπικής κοινωνίας προς μια δίκαιη ενεργειακή μετάβαση.

3.4 Ενημέρωση - Ημερίδες

Διαπιστώνονται σοβαρά προβλήματα συνεννόησης και εμπιστοσύνης μεταξύ των εμπλεκόμενων φορέων, δυσκολίες κατανόησης των τεχνικών πληροφοριών από τους πολίτες αλλά και δαιδαλώδεις διαδικασίες που διέπουν το πλαίσιο συνεργασίας μεταξύ των φορέων που μαρτυρούν την ανάγκη και τη χρησιμότητα της ενημέρωσης τόσο των αρχών της τοπικής αυτοδιοίκησής και της τοπικής κοινωνίας αλλά και της επικοινωνίας μεταξύ των ερευνητών της επιστημονικής κοινότητας για την αντιμετώπιση των εμποδίων και των καθυστερήσεων στη λύση του προβλήματος. Για τους παραπάνω λόγους έχει δοθεί ιδιαίτερη βαρύτητα στις δράσεις επικοινωνίας. Έτσι στο σύντομο χρονικό διάστημα συνεργασίας του Πα.Δ.Α. με το Δήμο Ιλίου έλαβαν χώρα τα ακόλουθα:

Την Πέμπτη 8 Οκτωβρίου 2020 σε ειδική εκδήλωση στο Δημαρχείο Ιλίου, στο πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Εβδομάδας Βιώσιμης Ανάπτυξης παρουσιάστηκε το **πρωτοποριακό πρόγραμμα** *"Υποστήριξη των Ενεργειακά Ευάλωτων Νοικοκυριών του Δήμου Ιλίου – Δράσεις για την αντιμετώπιση της Ενεργειακής Ένδειας"*, που εκπονείται σε συνεργασία του Δήμου Ιλίου με το Εργαστήριο ΗΜΕ & ΠΡΟΠΕ, Πα.Δ.Α. Σκοπός της ημερίδας, πέρα από την επικοινωνία του έργου σε Ευρωπαϊκό Επίπεδο και τη γνωστοποίηση του στους εμπλεκόμενους φορείς στα στελέχη και τους εργαζόμενους του Δήμου Ιλίου, ήταν η ευρύτερη επικοινωνία του έργου σε τοπικό επίπεδο.

Επιπλέον το Εργαστήριο ΗΜΕ & ΠΡΟΠΕ ΠαΔΑ συμμετείχε στο **1ο Διαδικτυακό Συνέδριο για την Ενεργειακή Φτώχεια** παρουσιάζοντας το πρωτοποριακό πρόγραμμα *"Υποστήριξη των Ενεργειακά Ευάλωτων Νοικοκυριών του Δήμου Ιλίου – Δράσεις για την αντιμετώπιση της Ενεργειακής Ένδειας"*, συμβάλλοντας στην ενημέρωση της ερευνητικής κοινότητας για την εκπόνηση του έργου και ενθαρρύνοντας την ανταλλαγή απόψεων με άλλους ερευνητές.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το φαινόμενο της ΕΦ είναι σημαντικό τόσο στην Ευρώπη όσο και στην Ελλάδα, ενώ εντείνεται ιδιαίτερα στις αστικές περιοχές. Με βασικές παραμέτρους την κατάσταση του κτιριακού αποθέματος και την αδυναμία κάλυψης των ενεργειακών αναγκών λόγω χαμηλού εισοδήματος οδηγούμαστε αρχικά στην αναζήτηση και καταγραφή των πληροφοριών αυτών σε τοπικό επίπεδο ώστε να διαμορφώσουμε κατά το δυνατό μια ακριβή βάση δεδομένων.

Η δημιουργία Μητρώου ΕΕΝ είναι το πρώτο στάδιο υλοποίησης της δράσης, ενώ στόχος είναι το πιλοτικό αυτό έργο να αποτελέσει παράδειγμα για την αντιμετώπιση της ΕΦ. Όπως ήδη αναφέρθηκε το πρόβλημα της ΕΦ έχει διαπιστωθεί και έχει αξιολογηθεί ως ιδιαίτερα σοβαρό τόσο σε Ευρωπαϊκό όσο και σε Εθνικό επίπεδο. Η διαπίστωση όμως και οι σχετικές εκτιμήσεις βασίζονται σε οικονομικά στοιχεία που «καλύπτουν» την τοπικότητα του φαινομένου. Στη διαδικασία αντιμετώπισης του φαινομένου της ΕΦ έχει διαγνωστεί η αναγκαιότητα συλλογής ακριβέστερων στοιχείων και ειδικότερα σε τοπικό επίπεδο.

Ο ρόλος της Τοπικής Αυτοδιοίκησης αναδεικνύεται καταλυτικός στην εξέλιξη της αντιμετώπισης του φαινομένου και στη διαμόρφωση μιας αποτελεσματικής λύσης. Ο θεσμός των Ενεργειακών Κοινοτήτων με τη λειτουργία τους από την Τοπική Αυτοδιοίκηση αξιοποιεί τις δυναμικές του τεχνο-κοινωνικού συστήματος, που αναλύει το φαινόμενο της ΕΦ και τις επιπτώσεις της για μια δίκαιη επίλυση του προβλήματος.

Η πορεία της αντιμετώπισης του φαινομένου της ΕΦ καταδεικνύει την αναγκαιότητα εύρεσης μεθόδων και λύσεων που δεν ανακουφίζουν πρόσκαιρα τα ΕΕΝ αλλά συμβάλλουν στη ριζική επίλυση του προβλήματος της ΕΦ. Η προσέγγιση του έργου μέσω του πλαισίου ΚΤΕ έχει σαν στόχο να διασφαλίσει την εύρυθμη συνεργασία μεταξύ των εμπλεκόμενων φορέων και η συνέργεια που σχηματίζεται να διαχειριστεί αποτελεσματικά το μεγάλο βαθμό δυσκολίας συντονισμού και εκτέλεσης του έργου.

Το φαινόμενο της ΕΦ έχει διαπιστωθεί και διερευνάται (κυρίως θεωρητικά) από την περίοδο έναρξης της τελευταίας σοβαρής οικονομικής κρίσης. Η εξελικτική πορεία του φαινομένου καταδεικνύει τη δυσκολία στην εφαρμογή αποτελεσματικών λύσεων για την αντιμετώπισή του. Έχει γίνει φανερό πως δεν επαρκούν κεντρικά σχεδιασμένες πολιτικές αλλά πρέπει να υπάρχουν ευέλικτες πολιτικές που σχεδιάζονται τοπικά και προσαρμόζονται αποτελεσματικά στις τοπικές ιδιαιτερότητες του φαινομένου. Η γεωγραφική τοπικότητα προσθέτει στο έργο της αντιμετώπισης της ΕΦ έναν επιπλέον παράγοντα αύξησης του βαθμού δυσκολίας του. Η μέχρι σήμερα αντιμετώπιση των επιπτώσεων της ΕΦ δεν θεωρείται αποτελεσματική και οδηγεί στην αναγνώριση της ανάγκης να αναζητηθούν και να θεραπευτούν σε πραγματικό επίπεδο οι αιτίες του φαινομένου της ΕΦ.

Η ενημέρωση των κατοίκων του Δήμου, η εξοικείωση τους με πρακτικές εξοικονόμησης ενέργειας, την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές και τη διάχυση καινοτόμων τεχνολογικών λύσεων στην τοπική κοινωνία αποτελεί μέρος της συνεχιζόμενης έρευνας, η οποία αποσκοπεί στην αποτελεσματική αντιμετώπιση του πιεστικού προβλήματος της ενεργειακής φτώχιας στη χώρα μας αλλά και διεθνώς.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θέλουμε να ευχαριστήσουμε τα στελέχη των Δήμων της Δυτικής Αθήνας και της Δυτικής Αττικής για το ενδιαφέρον, την βοήθεια και την εμπιστοσύνη που μας έδειξαν. Επίσης θα θέλαμε να εκφράσουμε τις ευχαριστίες και την υποστήριξή μας στους δημότες που μας παρείχαν πληροφορίες και μας καλοδέχθηκαν στα σπίτια τους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] "Επίκεντρο η Ενεργειακή Φτώχεια".*.,2018, Ενημερωτικό δελτίο του Ευρωπαικού Δικτύου για την αντιμετώπιση της φτώχειας.*

[2] Poggi, F., Firmino, A., Amado, M., 2020, "Shaping energy transition at municipal scale: A net-zero energy scenario-based approach".*Land Use Policy, Volume 99, 104955.*

[3] eurostat., 2020, "Arrears on utility bills - EU-SILC," eurostat.

[4] ΕΛΣΤΑΤ., 2020, "ΥΛΙΚΗ ΣΤΕΡΗΣΗ ΚΑΙ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΔΙΑΒΙΩΣΗΣ," ΕΛΣΤΑΤ, Αθήνα.

[5] "Ηνωμένα Έθνη," [Online]. Available: https://unric.org/el. [Accessed 15 01 2021].

[6] ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ, "Σύσταση 2020/1563 της επιτροπής, της 14ης Οκτωβρίου 2020, σχετικά με την ενεργειακή φτώχεια," ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ.

[7] Lerman, L.V., Gerstlberger, W., Lima,M.F., Frank, A.G., 2021, "How governments, universities, and companies contribute to renewableenergy development? A municipal innovation policy perspective of the triple helix".*Energy Research & Social Science Volume 71, 101854, 10.1016/j.erss.2020.101854.*

[8] Kovacic, Z., Musang,J.K., Buyana, K., Ambol, A., Smi, S., Mwau,B., Ogo, M., Lwasa, D., Brent, A., 2020, "Building capacity towards what? Proposing a framework for the analysis of energy

transition governance in the context of urban informality in Sub-Saharan Africa," *Local Environment,* pp. 1-15.

[9] *Οδηγία 2003/54/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 26ης Ιουνίου 2003, σχετικά με τους κοινούς κανόνες για την εσωτερική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας και την κατάργηση της οδηγίας 96/92/ΕΚ.*

[10] *Οδηγία 2009/72/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 13ης Ιουλίου 2009, σχετικά με τους κοινούς κανόνες για την εσωτερική αγορά ηλεκτρικής ενεργείας και για την κατάργηση της οδηγίας 2003/54/ΕΚ.*

[11] *Οδηγία 2012/27/ΕΕ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 25ης Οκτωβρίου 2012, για την ενεργειακή απόδοση, την τροποποίηση των οδηγιών 2009/125/ΕΚ και 2010/30/ΕΕ και την κατάργηση των οδηγιών 2004/8/ΕΚ και 2006/32/ΕΚ.*

[12] *Οδηγία 2010/31/ΕΕ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 19ης Μαΐου 2010, για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων.*

[13] "Clean energy for all Europeans package," European Commission, [Online]. Available: https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-strategy/clean-energy-all-europeans_en. [Accessed 31 01 2021].

[14] *Οδηγία 2018/844 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 30ής Μαΐου 2018, για την τροποποίηση της οδηγίας 2010/31/ΕΕ για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων και της οδηγίας 2012/27/ΕΕ για την ενεργειακή απόδοση.*

[15] "EU ENERGY POVERTY OBSERVATORY," European Commission, [Online]. Available: https://www.energypoverty.eu/. [Accessed 31 01 2021].

[16] ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ Ε.Π. ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΤΗΤΑ,ΕΠΙΧΕΙΡΗΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ & ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑ., 2019, *Τροποποίηση Πράξης με κωδικό ΟΠΣ (MIS) 5021536,* ΑΘΗΝΑ: Υπουργείο Ανάπτυξης και Επενδύσεων.

[17] Αρ. Φύλλου 4893., 2019, "Κύρωση του Εθνικού Σχεδίου για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ)," ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ ΤΗΣ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑΣ.

[18] "Ηλεκτρικό ρεύμα για όλους," Περιφέρεια Αττικής, [Online]. Available: http://www.patt.gov.gr. [Accessed 31 01 2021].

[19] ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΤΩΝ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΩΝ., 2019, "Γνωμοδότηση της Ευρωπαϊκής Επιτροπής των Περιφερειών με θέμα Πολυεπίπεδη διακυβέρνηση και διατομεακή συνεργασία για την καταπολέμηση της ενεργειακής φτώχειας," Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

[20] Ben Amer, S., Gregg, J. S., Sperling, K., & Maya-Drysdale, D. W., 2020, "Too complicated and impractical? An exploratory study on the role of energy system models in municipal decision-making processes in Denmark".*Energy Research & Social Science, 70, [101673].*

[21] Dobravec, V., Matak, N., Sakulin, C. et al., 2021, "Multilevel governance energy planning and policy: a view on local energy initiatives.".*Energ Sustain Soc 11, 2 (2021).*

[22] Δήμος Ιλίου., 2020, "Επαναφορά της 216/2012 Απόφασης Δημοτικού Συμβουλίου που αφορά τη λήψη απόφασης για τη διασφάλιση της ελάχιστης εγγυημένης παροχής ρεύματος για την αξιοπρεπή διαβίωση σε άτομα με εισοδήματα κάτω από το όριο της φτώχειας," in *Αρ. Πρωτ. Δήμου Ιλίου: 1953/18.01.2019*, Ίλιον.

[23] Carayannis, E. G., Goletsis, Y., Grigoroudi. E., 2018, "Composite innovation metrics: MCDA and the Quadruple Innovation Helix framework," *Technological Forecasting & Social Change,* no. 131, p. 4–17.

[24] Rademaekers, K., Yearwood, J., Ferreira, A., 2016 (Trinomics)., , "Selecting Indicators to Measure Energy Poverty," European Commission, DG Energy, Rotterdam.

[25] Stromback, J., Dromacque, C., Stromback, J., 2011, *The potential of smart meter enabled programs to increase energy and systems efficiency: a mass pilot comparison,* VaasaETT, Global Energy Think Tank, pp. 36-37.

[26] Darby, S., Liddell, C., Hills D.,Drabbl. D., 2015, *Smart Metering Early Learning Project: Synthesis report,* Research conducted for DECC by the Environmental Change Institute, Oxford, the University of Ulster, and the Tavistock Institute.

[27] Larman, G., Basili, V.B., 2003, *Iterative and Incremental Development: A Brief History,* IEEE Computer Society.

[28] Fuster, J. E., 2006, "Comparison of the European Commission's project cycle management/logical framework approach with international PM standards and methodologies," in *Global Congress 2006—EMEA, Madrid, Spain. Newtown Square, PA: Project Management Institute.*, Madrid.

[29] Unit DEVCO 06., 2016, Elements of the CYCLE OF OPERATIONS and Introduction to the Logical Framework approach, Brussels: European Commission.

[30] *Έκθεση μακροπρόθεσμης στρατηγικής για την κινητοποίηση επενδύσεων για την ανακαίνιση του αποτελούμενου από κατοικίες και εμπορικά κτίρια, δημόσια και ιδιωτικά, εθνικού κτιριακού αποθέματος., 2014,* Αθήνα: Υπουργείο Περιβάλντος Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής / Εργαστήριο Ήπιων Μόρφων Ενέργειας και Προστασίας Περιβάλλοντος Πα.Δ.Α.

[31] *Νόμος 4513/2018 Ενεργειακές Κοινότητες και άλλες διατάξεις.,* 2018.

[32] *Οδηγία (ΕΕ) 2018/2001 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 11ης Δεκεμβρίου 2018, για την προώθηση της χρήσης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές.*

[33] *Οδηγία 2019/944 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 5ης Ιουνίου 2019, σχετικά με τους κοινούς κανόνες για την εσωτερική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας και την τροποποίησητης οδηγίας 2012/27/ΕΕ.*

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΜΕΛΛΟΝ ΣΕ ΠΕΡΙΟΔΟΥΣ ΚΡΙΣΗΣ

Θ. Σλίνη[1*], Χ. Τζιώγας[2], Ν. Μουσιόπουλος[1]

[1]Εργαστήριο Μετάδοσης Θερμότητας και Περιβαλλοντικής Μηχανικής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, ΑΠΘ
541 24 Θεσσαλονίκη, *e-mail: thslini@auth.gr
[2] Εργαστήριο Οργάνωσης και Διοίκησης Επιχειρήσεων, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, ΑΠΘ
541 24 Θεσσαλονίκη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η πρόσφατη υγειονομική κρίση και ο εγκλεισμός έχει πλήξει αδιαμφισβήτητα την παγκόσμια ανάπτυξη και ειδικότερα την προοπτική των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ). Ωστόσο δεν στάθηκε, ευτυχώς, ικανή να την αποτρέψει. Υπό αυτά τα δεδομένα ο τομέας της ενέργειας καλείται έμπρακτα πλέον να διαχειριστεί την ισχύουσα αλλά και ενδεχόμενες κρίσεις και επιβάλει την ανάγκη επικαιροποίησης των προτεραιοτήτων και στόχων σε παγκόσμιο επίπεδο αλλά και εθνικό επίπεδο.

Παράλληλα κατά τα τελευταία πέντε χρόνια, η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) έχει σημειώσει αξιοσημείωτη πρόοδο στον τομέα της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας και φυσικού αερίου, με τη βελτίωση ενεργειακής απόδοσης και την προώθηση των ΑΠΕ, επιτυγχάνοντας σημαντικές μειώσεις των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και την «τιμολόγηση» του άνθρακα με ισχυρές τιμές στο σύστημα εμπορίας εκπομπών.

Η παρούσα ανάλυση αποσκοπεί στην ανασκόπηση της ενεργειακής πολιτικής υπό το πρίσμα των πρόσφατων εξελίξεων και των διαθέσιμων στοιχείων του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας – International Energy Agency. Επιχειρείται η αξιολόγηση της προόδου που έχει σημειωθεί τα τελευταία χρόνια και εξετάζει τις ευκαιρίες για ενίσχυση του τομέα της ενέργειας στο πλαίσιο της οικονομικής ανάκαμψης και της προώθησης της κλιματικής ουδετερότητας. Συζητείται ακόμη η ανάγκη των οργανισμών να αντιμετωπίζουν την αβεβαιότητα και τους κινδύνους στους οποίους θα πρέπει να μπορούν να ανταποκρίνονται γρήγορα και αποτελεσματικά, σε «ταραγμένες» περιόδους κρίσεων που χαρακτηρίζονται από ελλιπείς συνήθως πληροφορίες και προεκτάσεις. Εξίσου σημαντική κρίνεται και η αποτύπωση των νέων δεδομένων και συνθηκών στα Συστήματα Περιβαλλοντικής Διαχείρισης στο σκέλος της ανάλυσης και διαχείρισης της διακινδύνευσης.

Τέλος, η πρόσφατη κρίση του «εγκλεισμού» και της κοινωνικής αποστασιοποίησης μπορεί να αποτελέσει ένα ζωντανό παράδειγμα για την αντιμετώπιση και επιτυχή διαχείριση κρίσεων και ίσως ένα χρήσιμο εργαλείο για την ανάπτυξη βραχυπρόθεσμων και μακροπρόθεσμων δράσεων για μια καθαρή, ανθεκτική και δίκαιη ανάκαμψη του τομέα της ενέργειας αλλά και της οικονομίας.

Λέξεις Κλειδιά: *ενέργεια, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, κλιματική αλλαγή, διαχείριση κρίσεων*

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο πρόσφατος εγκλεισμός, σε παγκόσμιο επίπεδο, προκάλεσε περισσότερες διαταραχές στον τομέα της ενέργειας από οποιοδήποτε άλλο γεγονός στην πρόσφατη ιστορία, αφήνοντας επιπτώσεις που θα γίνουν περισσότερο αντιληπτές τα επόμενα χρόνια. Η κατάσταση ανάγκης που αποτυπώθηκε δεν αφορούσε μόνο τον τομέα της υγείας (λόγω του COVID-19) αλλά εξαπλώθηκε ευρύτερα στην οικονομία σε βαθμό που χαρακτηρίστηκε ως το χειρότερο οικονομικό σοκ από το 1930 [1]. Η αναστολή της οικονομικής δραστηριότητας σαφώς και επηρεάζει την ενεργειακή ζήτηση, αλλά και τις προοπτικές για ταχεία μετάβαση σε «καθαρή» ενέργεια. Οι παρούσες συνθήκες είναι δυνατό είτε να οδηγήσουν στην οπισθοδρόμηση της προσπάθειας για την επίτευξη ενός πιο ασφαλούς και βιώσιμου ενεργειακού συστήματος ή να αποτελέσουν καταλύτη που επιταχύνει το ρυθμό της αλλαγής και ευνοεί την ενεργειακή μετάβαση σε καθαρότερες μορφές. Η κρίσιμη περίοδος δεν έχει τελειώσει, παραμένουν πολλές αβεβαιότητες και δεν έχουν ακόμη ληφθεί κρίσιμες αποφάσεις για την ενεργειακή πολιτική σε συνδυασμό με την επείγουσα παγκόσμια αντίδραση στην κλιματική αλλαγή.

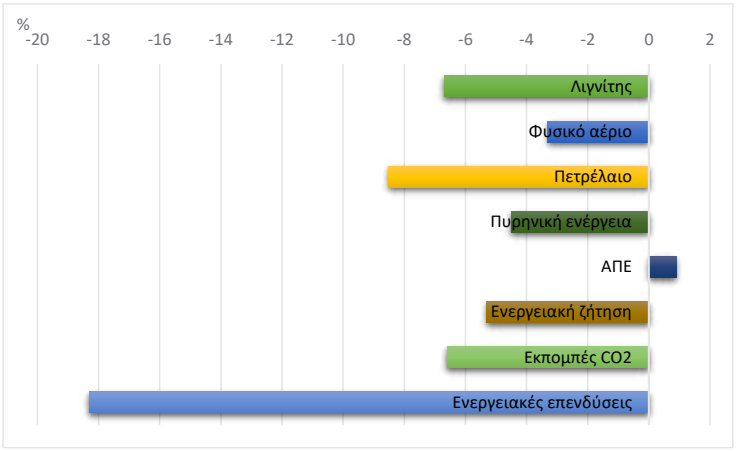
Η ενέργεια αποτελεί κρίσιμο παράγοντα προόδου και οικονομικής ανάπτυξης. Η σταθερότητα των παγκόσμιων αγορών ενέργειας είναι απαραίτητη για τη διατήρηση και την ανάπτυξη της βιομηχανίας και της κοινωνικής ευημερίας. Κατά συνέπεια, η συνεργασία για την παγκόσμια ενεργειακή ασφάλεια και την οικονομική ανάπτυξη χαρακτηρίζεται ως ζωτικής σημασίας. Χαρακτηριστική είναι η συμφωνία για τη μείωση της παραγωγής πετρελαίου, αλλά και η κινητοποίηση μερών με ανταγωνιστικά συμφέροντα στην κατεύθυνση του κοινού στόχου της σταθεροποίησης της αγοράς. Το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο εξακολουθούν να θεωρούνται βασικά στοιχεία της οικονομίας, με σημαντικό ρόλο για όλους τους άξονες της αειφορίας.

Εξίσου σημαντική για την αειφορία και τη διασφάλιση της ισορροπίας του συστήματος είναι και η ενεργειακή ασφάλεια, η αξιοπιστία και ασφάλεια των ενεργειακών συστημάτων. Οι απειλές στην υποδομή από ακραία καιρικά φαινόμενα, ο αυξανόμενος κίνδυνος επίθεσης στον κυβερνοχώρο και η διαταραχή στην ισορροπία προσφοράς και ζήτησης από εξωτερικούς παράγοντες, όπως η πανδημία, έχουν εκθέσει τις ευπάθειες του συστήματος. Το γεγονός αυτό είναι επιζήμιο για το κοινωνικό σύνολο και την οικονομία γενικότερα και θέτουν υπό αμφισβήτηση την αποτίμηση και διαχείριση κινδύνου. Τα μόνιμα και συστηματικά αποτελέσματα μπορούν να προέλθουν μόνο από μια ισορροπημένη προσέγγιση, η οποία εκτιμά την οικονομική ανάπτυξη, την ασφάλεια και την αξιοπιστία μαζί με τη βιωσιμότητα και προωθεί τη σταθερότητα στις αγορές ενέργειας. Επίσης επισημαίνεται πως στην περίπτωση ενός μακροπρόθεσμου «κλεισίματος» του κλάδου της βιομηχανίας μέσα στο 2020, έργα αιολικής και ηλιακής ενέργειας που είναι ήδη υπό εξέλιξη ενδέχεται να επηρεαστούν από έλλειψη εξοπλισμού που θα εμποδίσει την ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ).

Η πρωτοφανής υγειονομική κρίση και η αβεβαιότητα κατά τη διάρκεια του εγκλεισμού, οι οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις μίας κατάστασης ανάγκης τέτοιας έκτασης και διάρκειας σε συνδυασμό με τις επακόλουθες αντιδράσεις σε πολιτικό και στρατηγικό επίπεδο ανοίγουν ένα ευρύ φάσμα πιθανών σεναρίων για το ενεργειακό μέλλον. Ωστόσο η κρισιμότητα της κατάστασης μπορεί να θεωρηθεί μια κατάλληλη συγκυρία για τη ζητούμενη ενεργειακή μετάβαση σε καθαρότερες μορφές ενέργειας με βιώσιμο τρόπο.

2. Η ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

Σύμφωνα με την εκτίμηση του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας [2], η παγκόσμια ενεργειακή ζήτηση πρόκειται να μειωθεί κατά 5% το 2020, οι εκπομπές CO_2 που σχετίζονται με την ενέργεια κατά 7% και οι ενεργειακές επενδύσεις κατά 18%. Οι επιπτώσεις ποικίλλουν ανάλογα με τις πηγές των καυσίμων. Η εκτιμώμενη πτώση της ζήτησης πετρελαίου κατά 8% και της χρήσης λιγνίτη κατά 7% παρουσιάζουν έντονη αντίθεση με τη μικρή αύξηση του ποσοστού των ΑΠΕ. Η μείωση της ζήτησης φυσικού αερίου είναι περίπου 3%, ενώ η παγκόσμια ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας φαίνεται να μειώνεται κατά ένα ποσοστό 5% σε ετήσια βάση (εικόνα 1).



Εικόνα 1: Εκτιμώμενη ενεργειακή ζήτηση, εκπομπές CO_2 και δείκτες επενδύσεων για το 2020 σε σχέση με το 2019 [IEA, 2020, World Energy Outlook].

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα έχει πληγεί σοβαρά, λόγω του σχετικά υψηλού λειτουργικού κόστους σε σύγκριση με την πυρηνική ενέργεια και τις ΑΠΕ. Αντίθετα, η ηλεκτρική ενέργεια χαμηλών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα επικράτησε σε αυτές τις εξαιρετικές περιστάσεις, με τη μερίδιο της ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ να αυξάνεται σε ορισμένες χώρες. Η διαπίστωση αυτή προέκυψε ως αποτέλεσμα της υποχρέωσης των διαχειριστών των ενεργειακών συστημάτων για μεταφορά «ανανεώσιμης» ηλεκτρικής ενέργειας όπου υπάρχει ανάγκη, με σύμμαχο και τις ευνοϊκές καιρικές συνθήκες.

Οι μεταβολές στη ζήτηση ενέργειας έχει ως επακόλουθο την έντονη υποχώρηση των τιμών πετρελαίου και φυσικού αερίου, με ορατό το ενδεχόμενο να προκληθούν διαταραχές ευρύτερα στον ενεργειακό τομέα και την οικονομία. Η μείωση των τιμών της ενέργειας αποτυπώνεται με οικονομικούς όρους στους δείκτες του πληθωρισμού στα περισσότερα κράτη μέλη της ΕΕ. με τη χώρα μας εμφανίζει την υψηλότερη μείωση (-2%). Η σταθερά αρνητική τιμή του πληθωρισμού στην ΕΕ. καταγράφεται ήδη για 3 συνεχείς μήνες (Αύγουστος-Σεπτέμβριος-Οκτώβριος 2020) σύμφωνα με τα στοιχεία της Eurostat [3].

Την ίδια στιγμή, η μείωση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί ένα σημαντικό πρόβλημα όσον αφορά την ενεργειακή ασφάλεια το οποίο οι αρμόδιοι φορείς καλούνται να αντιμετωπίσουν. Είναι προφανές ότι η αύξηση της ζήτησης μπορεί να ασκήσει πίεση στα δίκτυα και ενδεχομένως να προκαλέσει διακοπή λειτουργίας και ηλεκτροδότησης. Το ίδιο όμως ισχύει και στην περίπτωση της απότομης ή/και δραματικής μείωσης της ζήτησης όπως πρόσφατα καταγράφηκε. Κατά συνέπεια, η ασφάλεια δεν δύναται να θεωρηθεί ως κάτι δεδομένο. Οι κυβερνητικοί φορείς αλλά και εταιρείες κοινής ωφελείας έχουν επίγνωση του ζητήματος και των ενδεχόμενων προβλημάτων.

Η ΕΕ. προσδίδει μεγάλη βαρύτητα στην ασφάλεια κατά την ενεργειακή μετάβαση, κυρίως επειδή τα κράτη-μέλη διαθέτουν εθνικό πεδίο εφαρμογής και δεν λαμβάνουν τακτικά υπόψη τις διασυνοριακές συνθήκες. Η ασφάλεια της ηλεκτρικής ενέργειας είναι βασική προτεραιότητα, καθώς οι χώρες αποσύρουν σταδιακά τις παραδοσιακές πηγές ενέργειας άνθρακα, με ταυτόχρονη αύξηση της παραγωγής από ΑΠΕ όπως η αιολική και ηλιακή (φωτοβολταϊκά), οι οποίες παρουσιάζουν ποικίλες διακυμάνσεις [4]. Είναι χαρακτηριστικό πως αρκετές ευρωπαϊκές χώρες βασίζονται στα γειτνιάζοντα κράτη για την ενεργειακή τους επάρκεια. Για το λόγο αυτό η ΕΕ. ενίσχυσε την ετοιμότητα και την ασφάλεια σε συνθήκες έκτακτης ανάγκης σε πετρέλαιο και φυσικό αέριο, ιδίως με την αύξηση του συντονισμού μεταξύ των κρατών μελών (με ειδικές ομάδες συντονισμού) και με την εφαρμογή μιας συνολικής προσέγγισης. Για παράδειγμα στην Ιταλία, εταιρεία κοινής ωφελείας η οποία παράγει, μεταφέρει και διανέμει ηλεκτρισμό σε 33 διαφορετικές χώρες, δημιούργησε μια παγκόσμια ομάδα εργασίας για τη συντήρηση των υποδομών και τη διασφάλιση της εύρυθμης λειτουργίας. Η ειδική αυτή ομάδα παρέχει επίσημη καθοδήγηση σε όλα τα παραρτήματά της σε παγκόσμια κλίμακα, ώστε να ανταποκριθούν και να αντιμετωπίσουν τις τοπικές καταστάσεις έκτακτης ανάγκης [5]. Αντίστοιχα, έχουν πραγματοποιηθεί δοκιμές πίεσης στο δίκτυο και στις εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας σε μια σειρά προσομοιώσεων υποδομών, δοκιμών και επαληθεύσεων για την προετοιμασία των εργαζομένων να

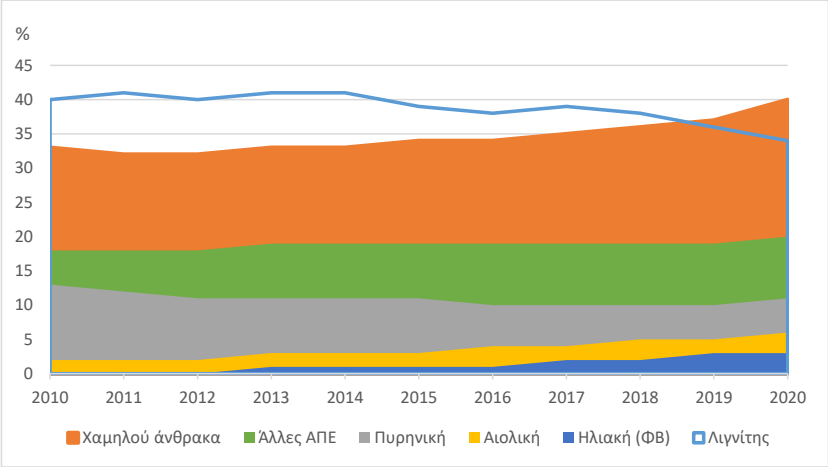
αντιμετωπίσουν πιθανά ζητήματα και να διασφαλιστεί η απρόσκοπτη προσφορά των υπηρεσιών. Κι ενώ το ισχυρό σύστημα ασφάλειας πετρελαίου και κατάφερε να διαχειριστεί ικανοποιητικά τις κρισιμότερες πετρελαϊκές «αναταράξεις», ωστόσο, οι προοπτικές των διυλιστηρίων είναι δυσοίωνες, καθώς τα περιθώρια διύλισης έχουν περιοριστεί στη βορειοδυτική Ευρώπη από τον Απρίλιο του 2020 [5]. Ομοίως, έχουν εφαρμοστεί ισχυρά μέτρα ασφάλειας του φυσικού αερίου και έχουν υλοποιηθεί κομβικές διασυνδέσεις αερίου και η δυνατότητα αντίστροφων ροών. Επιπροσθέτως, έχουν ληφθεί μέτρα για την αντιμετώπιση της ασφάλειας στον κυβερνοχώρο, συμπεριλαμβανομένου του ενεργειακού τομέα, με έναν εξειδικευμένο κώδικα δικτύου. Αυτό σηματοδοτεί την αξιόλογη πρόοδο που έχει σημειωθεί όσον αφορά την ετοιμότητα, αλλά μέρος των εργασιών υλοποίησης είναι ακόμη σε εξέλιξη.

Η ασφάλεια του φυσικού αερίου συνδέεται όλο και περισσότερο με την ασφάλεια της ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φυσικό αέριο πρόκειται να αυξηθεί με τη σταδιακή κατάργηση του άνθρακα και την απόφαση ορισμένων χωρών να τερματίσουν τη χρήση της πυρηνικής ενέργειας. Το φυσικό αέριο μπορεί να υποστηρίξει (ιδίως στις χώρες της Κεντρικής και Ανατολικής Ευρώπης) τη μετάβαση σε καθαρότερα καύσιμα, συμπεριλαμβανομένου του υδρογόνου. Καθώς η εγχώρια παραγωγή φυσικού αερίου μειώνεται, οι εισαγωγές αναμένεται να αυξηθούν σε συνδυασμό με την ταχέως αναπτυσσόμενη παγκόσμια αγορά υγροποιημένου φυσικού αερίου. Το 2019, οι εισαγωγές υγροποιημένου φυσικού αερίου στην ΕΕ άγγιξε τα 115 bcm (billion cubic metre) μερίδιο 25% των συνολικών εισαγωγών [5]. Κι ενώ οι τιμές έχουν μειωθεί, δεν έχουν όλες οι χώρες πρόσβαση στο υγροποιημένο αέριο με ανταγωνιστικούς όρους. Η ενοποίηση της ευρωπαϊκής αγοράς φυσικού αερίου στην Ανατολική Ευρώπη αποτέλεσε το επίκεντρο των προσπαθειών τα τελευταία χρόνια για τη διασφάλιση της ελεύθερης ροής αερίου σε ανταγωνιστικές τιμές για τη βελτίωση της ασφάλειας του εφοδιασμού.

Αντίστοιχα, στο Ηνωμένο Βασίλειο, η διασφάλιση της ασφάλειας και της αξιοπιστίας του δικτύου εμπίπτει στον επίσημο διαχειριστή του ηλεκτρικού συστήματος. Παρόλο που το σύστημα του Ηνωμένου Βασιλείου είναι ένα από τα πιο αξιόπιστα στον κόσμο, δεν υπάρχει εφησυχασμός, αλλά διαρκής διερεύνηση πρόσθετων επιλογών που θα βοηθήσουν στη διαχείριση της έκτακτης και δύσκολα προβλέψιμης κατάστασης [6].

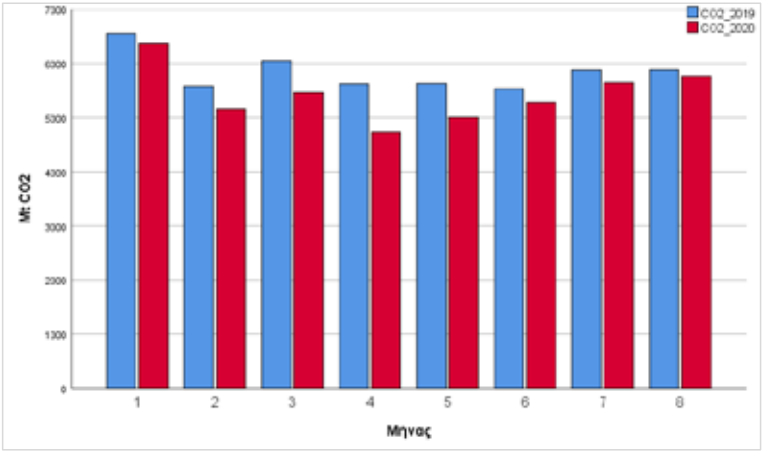
Αξίζει ακόμη να σημειωθεί ότι η ανταγωνιστικότητα και η ανθεκτικότητα των τεχνολογιών χαμηλών εκπομπών CO_2 οδήγησαν σε υψηλότερα μερίδια αγοράς για πυρηνική, ηλιακή και αιολική ενέργεια σε πολλές χώρες από την έναρξη των περιοριστικών μέτρων (εικόνα 2). Για το τρέχον έτος οι ΑΠΕ εκτιμάται να αντιστοιχούν στο 40% της παραγωγής ενέργειας το 2020 [7]. Π.χ. το μερίδιο της παραγωγής πυρηνικής ενέργειας στη Νότια Κορέα αυξήθηκε κατά σχεδόν 9 % κατά τη διάρκεια της πανδημίας Covid -19, ενώ στο Ηνωμένο Βασίλειο, η πυρηνική ενέργεια έπαιξε μεγάλο ρόλο στην σχεδόν εξάλειψη της παραγωγής άνθρακα για περίοδο 2 μηνών. Κατά το 2020, η Αμερικανική Υπηρεσία Πληροφοριών Ενέργειας - U.S. Energy Information Administration [8] εκτιμά πως βραχυπρόθεσμα το μερίδιο της παραγωγής πυρηνικής ενέργειας θα αυξηθεί περισσότερο από μία ποσοστιαία μονάδα σε σύγκριση με το 2019. Στην Κίνα, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μειώθηκε κατά τον Ιανουάριο-Φεβρουάριο 2020 κατά περισσότερο από 8%: η δυναμικότητα του άνθρακα μειώθηκε κατά περίπου 9%, η υδροηλεκτρική ενέργεια κατά σχεδόν 12%. Η πυρηνική αποδείχθηκε πιο ανθεκτική με μείωση μόνο κατά 2%.

Η αύξηση της χρήσης ανανεώσιμων πηγών μείωσε τις παγκόσμιες εκπομπές CO_2 κατά περισσότερο από 5% το πρώτο τρίμηνο του τρέχοντος έτους (εικόνα 3). Προβλέπει μια πρωτοφανή ετήσια μείωση των εκπομπών κατά 8% φέτος (εικόνα 3), επιστρέφοντας στο επίπεδο της προηγούμενης δεκαετίας [9, 10]. Από τον Ιανουάριο έως τον Οκτώβριο του 2020, η ικανότητα παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ ήταν 15% υψηλότερη από ό, τι για την ίδια περίοδο πέρυσι. Με την Κίνας και τις ΗΠΑ να πρωταγωνιστούν, η καθαρή εγκατεστημένη ισχύς από ΑΠΕ θα αυξηθεί σχεδόν 4% παγκοσμίως το 2020, αγγίζοντας τα 200 GW.

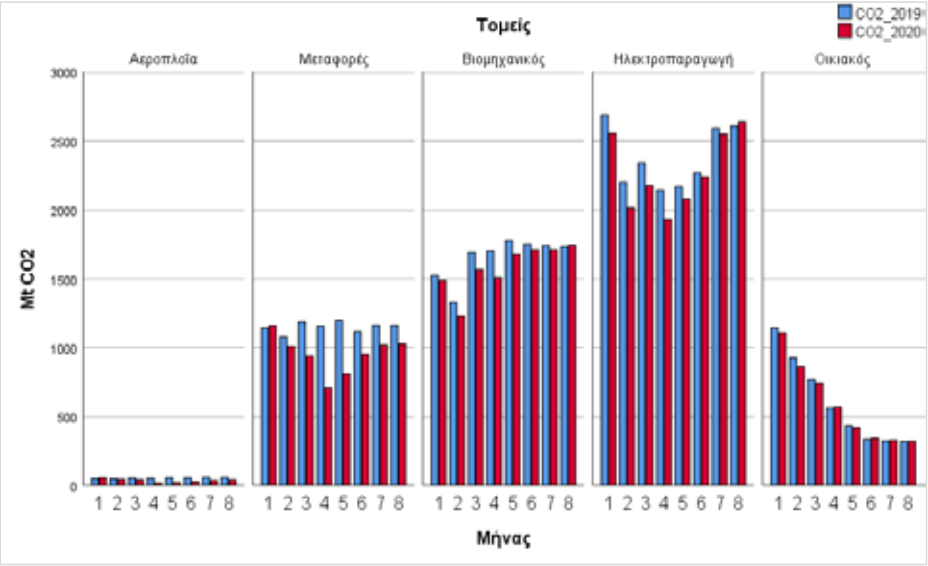


Εικόνα 2: Ποσοστό ενεργειακών πηγών (λιγνίτη και πηγών χαμηλού άνθρακα) σε παγκόσμια κλίμακα για το διάστημα 2010-2020 (στοιχεία IEA 2020).

Τα οφέλη αυτών των υψηλότερων μεριδίων καθαρής ενέργειας όσον αφορά τις μειωμένες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και άλλων ατμοσφαιρικών ρύπων είναι ορατά σε παγκόσμιο επίπεδο τους τελευταίους μήνες. Η πτώση των εκπομπών αντανακλάται σε μια τεράστια συρρίκνωση της παγκόσμιας οικονομικής παραγωγής, η οποία αναμένεται να μειωθεί κατά 4,4% φέτος, σύμφωνα με το ΔΝΤ, η χειρότερη μετά τη Μεγάλη Ύφεση του 1930. Ωστόσο, παρά τη μείωση των εκπομπών, θεωρείται απίθανο να επηρεαστεί η μακροπρόθεσμα αυξανόμενη θερμοκρασία του πλανήτη. Σε σχέση δηλαδή με την κλιματική αλλαγή, ενώ οι περιορισμοί στα ταξίδια και στην εργασία οδήγησαν σε ξαφνική μείωση τόσο των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (GHG) όσο και των ατμοσφαιρικών ρύπων, αυτή η σύντομη περίοδος θα έχει μικρό αντίκτυπο στην κλιματική αλλαγή [11].



(α)



(β)

Εικόνα 3: Εκπομπές CO_2 (σε Mt) κατά τις περιόδους Ιανουαρίου – Αυγούστου 2019 και Ιανουαρίου – Αυγούστου 2020 (α) συνολικά και (β) ανά τομέα συνεισφοράς.

3. ΣΕΝΑΡΙΑ ΓΙΑ ΤΟ ΜΕΛΛΟΝ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

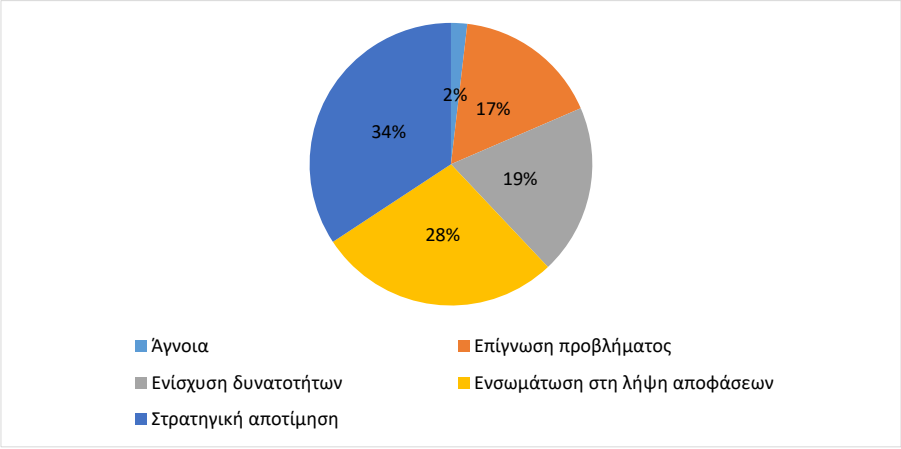
Σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Περιβάλλοντος - European Environmental Agency [5], η Ευρώπη έχει επιδείξει θετικά αποτελέσματα ως προς την επίτευξη των στόχων της μείωσης των εκπομπών και την κλιματική ουδετερότητα για το 2020, όχι όμως και των στόχων για το 2030. Η πανδημία χρησιμεύει ως μια υπενθύμιση της ανάγκης για την ενεργειακή μετάβαση με ιδιαίτερη έμφαση στις έννοιες της αξιοπιστίας και της ανθεκτικότητας στη χάραξη μακροπρόθεσμων πολιτικών. Διατρέχοντας μια σειρά παρόμοιων παγκόσμιων διαταραχών κατά τις τελευταίες δύο δεκαετίες, συμπεριλαμβανομένων ακραίων καιρικών φαινομένων, οι προϋποθέσεις και οι παράμετροι χάραξης πολιτικής απαιτούν επικαιροποίηση ώστε να περιγράφουν τη νέα πραγματικότητα, το νέο «φυσιολογικό». Τα μακροπρόθεσμα μοντέλα θα χρειαστούν πρόσθετη ανάλυση αξιοπιστίας και ανθεκτικότητας για να διατηρήσουν την προσομοίωση του «παρόντος», προλαμβάνοντας κινδύνους από μελλοντικές διαταραχές του συστήματος.

Ως επόμενο βήμα, η ΕΕ σχεδιάζει να εφαρμόσει πλήρως και να εγγυηθεί την περιφερειακή προσέγγιση και συνεργασία μεταξύ των κρατών αξιοποιώντας τη δυνατότητα συντονισμού μεταξύ των διαχειριστών των ενεργειακών συστημάτων [12]. Με τον τρόπο αυτό ενισχύονται σημαντικά τα συστήματα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας ώστε να έχουν την κατάλληλη λειτουργική ευελιξία και ικανότητα κάλυψης των αναγκών στο πλαίσιο του στόχου της ταχείας μετάβασης στις ΑΠΕ. Αναγνωρίζεται πάντως απαιτούνται μεγαλύτερες επενδύσεις και εξυπνότερες πολιτικές για να διατηρείται ασφαλής η συνεχής παροχή.

Υπό μία διαφορετική προσέγγιση που ωστόσο οδηγεί σε παρόμοια συμπεράσματα, η μεγαλύτερη πρόκληση που αντιμετωπίζει η ενεργειακή μετάβαση είναι η έλλειψη ετοιμότητας σύμφωνα τον Δείκτη Ενεργειακής Μετάβασης [13] ο οποίος κατατάσσει 115 οικονομίες αναφορικά με την ενεργειακή ασφάλεια και πρόσβαση, με την περιβαλλοντική βιωσιμότητα και προσιτή τιμή της ενέργειας. Ενώ επιβεβαιώνεται η συνολική θετική πορεία της παγκόσμιας ενεργειακής μετάβασης, καταγράφονται αρκετά εμπόδια και επιμέρους χαμηλές αποδόσεις [14]. Την ίδια στιγμή επισημαίνεται πως παρά τα σταδιακά οφέλη από το υφιστάμενο σύνολο πολιτικών, η εφαρμογή τεχνολογικών λύσεων είναι περιορισμένη και η ανάγκη για ριζοσπαστικών και καινοτόμων ιδεών επείγει εξαιρετικά.

Η παρούσα συγκυρία δημιούργησε τις κατάλληλες συνθήκες για ένα ολοκληρωμένο σχέδιο ανάκαμψης που ενσωματώνει και δίνει έμφαση σε ένα φιλικό προς το περιβάλλον μέλλον θα μπορούσε να βοηθήσει σημαντικά στην καταπολέμηση της υπερθέρμανσης του πλανήτη. Υπό την προϋπόθεση ότι ορισμένα μέτρα περιορισμού παραμένουν σε ισχύ μέχρι το τέλος του 2021, χωρίς περισσότερες δομικές παρεμβάσεις, η παγκόσμια θερμοκρασία του πλανήτη θα είναι μόνο περίπου 0,01°C έως 0,005°C χαμηλότερη από την αναμενόμενη έως το 2030. Αντιθέτως, με μια οικονομική ανάκαμψη με έντονα «πράσινη» κατεύθυνση στον τομέα της ενέργειας και τη μείωση των επενδύσεων σε ορυκτά καύσιμα, είναι δυνατόν να αποφευχθεί η μελλοντική υπερθέρμανση των 0,3 ° C έως το 2050 [15].

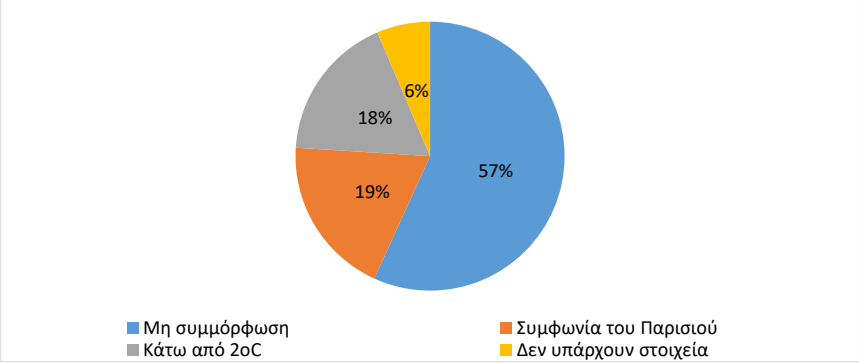
Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα αποτελέσματα έρευνας Transition Pathway Initiative [16] η οποία αξιολογεί την ευθυγράμμιση εταιρειών ενέργειας (εξόρυξης λιγνίτη, ηλεκτροπαραγωγής, παραγωγής και διανομής πετρελαίου και αερίου) σε σχέση με την ενεργειακή μετάβαση και την επίτευξη των στόχων της Συμφωνίας του Παρισιού για την κλιματική αλλαγή και τη συγκράτηση της αύξησης της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη αρκετά κάτω από τους 2°C πάνω από τα προβιομηχανικά επίπεδα και τις προσπάθειες περιορισμού της στον 1,5°C.Αναφορικά με την ποιότητα διαχείρισης και ανταπόκρισης στους στόχους για τον περιορισμό της κλιματικής αλλαγής, η πλειοψηφία των εταιρειών (61%, 101/163) υποστηρίζουν την ενσωμάτωση κατάλληλων μέτρων σε επίπεδο στρατηγικού σχεδιασμού και επιχειρησιακής λήψης αποφάσεων ή και ακόμη έχουν φτάσει σε σημείο αποτίμησης της εφαρμογής αντίστοιχων μέτρων (εικόνα 4).



Εικόνα 4: Επίδοση της ποιότητας διαχείρισης και ανταπόκρισης στους στόχους για τον περιορισμό της κλιματικής αλλαγής των εταιρειών που δραστηριοποιούνται στο χώρο της ενέργειας [16].

Αναφορικά με την επίδοση των επιπέδων άνθρακα (carbon performance) διαπιστώθηκε ότι το 37% (46/125) των εταιρειών που δραστηριοποιούνται στο χώρο της ενέργειας ευθυγραμμίζεται με τις αποφάσεις της Συνθήκης του Παρισιού με ένα ποσοστό 18% (22/125) να επιθυμούν και να αναλαμβάνουν δράσεις για το φιλόδοξο πλάνο της αύξηση της θερμοκρασίας κάτω του σημείου αναφοράς των 2ºC. Μέρος της βελτιωμένης εικόνας και των θετικών αποκρίσεων οφείλεται στην υιοθέτηση μακροπρόθεσμων πολιτικών και δράσεων που οριοθετούνται χρονικά στο 2050, αντί του 2030. Οι δείκτες που αποτυπώνουν την επίδοση των εταιρειών αναφορικά με τις εκπομπές άνθρακα και στους οποίους βασίζεται η αξιολόγηση των εταιρειών είναι η αναγνώριση και αποδοχή του προβλήματος, η αναγνώριση του κινδύνου/ευκαιρίας, ο καθορισμός και η τήρηση στόχων των εκλυόμενων εκπομπών, η δημοσιοποίηση των στοιχείων των εκπομπών, η απόδοση ευθυνών στο Διοικητικό Συμβούλιο, η επαλήθευση των εκπομπών κατά τη λειτουργία της εταιρείας, η ρητή υποστήριξη εθνικών και διεθνών πολιτικών περιορισμού, η εμπλοκή της εταιρείας σε αποδεκτές πρακτικές του διεθνούς εμπορίου, η αποτελεσματική διαχείριση κινδύνων που σχετίζονται με την κλιματική αλλαγή, η δημοσιοποίηση εκπομπών που προέρχονται από τη χρήση συγκεκριμένων προϊόντων, ο ορισμός μακροπρόθεσμων στόχων εκπομπών, η ενσωμάτωση των κινδύνων/ευκαιριών

στη μακροπρόθεσμη στρατηγική, ο προγραμματισμός και ανάπτυξη σεναρίων σχετικά με τις εκπομπές και την κλιματική αλλαγή, η σχέση με τις διεθνείς εμπορικές ενώσεις και επιμελητήρια.



Εικόνα 5: Επίδοση του επιπέδου άνθρακα (carbon performance) των εταιρειών που δραστηριοποιούνται στο χώρο της ενέργειας [14].

Τα επίσημα σενάρια της IEA [17] σχετικά με το ενεργειακό μέλλον δεν μπορεί παρά να ενέχουν ένα σημαντικό βαθμό αβεβαιότητας για τη διάρκεια της πανδημίας, τις οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις της έκτακτης αυτής κατάστασης, την αντίδραση και εγρήγορση που θα επιδείξουν ο πολιτικός και στρατηγικός σχεδιασμός. Η αντίδραση της αγοράς, τα νέα δεδομένα των αγορών ενέργειας, η δυναμική παρουσία της τεχνολογίας αποτελούν κρίσιμες παραμέτρους που θα πρέπει να συνυπολογιστούν στις συνθήκες αβεβαιότητας. Συγκεκριμένα γίνεται αναφορά στα ακόλουθα:

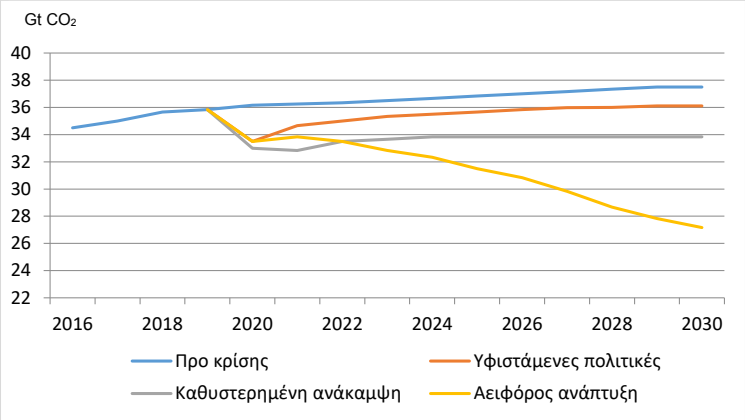
α) Το σενάριο διατήρησης των υφιστάμενων πολιτικών (Stated Policies Scenario (STEPS)), όπου η πανδημία θα τεθεί υπό έλεγχο το 2021 και συνεπώς η παγκόσμια οικονομία θα επιστρέψει την ίδια χρονιά στα προ κρίσης επίπεδα. Το σενάριο αποτυπώνει τις υπάρχουσες εξαγγελίες και προθέσεις οι οποίες υποστηρίζονται από συγκεκριμένα μέτρα.

β) Το σενάριο της καθυστερημένης ανάκαμψης (Delayed Recovery Scenario (DRS)) το οποίο είναι επιδείνωση στην προοπτική ανάπτυξης. Σύμφωνα με αυτό το σενάριο η παγκόσμια αγορά θα επανακάμψει μόνο το 2023, με την χαμηλότερη ανάπτυξη της ενεργειακής ζήτησης από το 1930.

γ) Το σενάριο της αειφόρου ανάπτυξης το οποίο βασίζεται στην ευρεία εξάπλωση των ΑΠΕ, την προώθηση των επενδύσεων στα ενεργειακά συστήματα και στις πολιτικές καθαρής ενέργειας, ώστε να επιτευχθούν οι στόχοι του Παρισιού, να διασφαλιστεί η πρόσβαση για όλους και μειωθούν οι θερμοκηπικές εκπομπές.

Με βάση τα σενάρια αυτά, ο διαρθρωτικός μετασχηματισμός του ενεργειακού τομέα θα απαιτήσει τεράστιες επενδύσεις. Το σενάριο Αειφόρου Ανάπτυξης βλέπει μια βραχυπρόθεσμη αύξηση των επενδύσεων σε τεχνολογίες καθαρής ενέργειας τα επόμενα δέκα χρόνια. Μαζί με τη δράση για τη μείωση των εκπομπών από την υπάρχουσα υποδομή, αυτό αρκεί για να καταστήσει το 2019 το οριστικό έτος αιχμής για τις παγκόσμιες εκπομπές CO_2. Οι εκπομπές CO_2 είναι σχεδόν 10 Gt χαμηλότερες σε σύγκριση με το σενάριο των υφιστάμενων πολιτικών έως το 2030 και οι μειώσεις των εκπομπών ατμοσφαιρικών ρύπων συντελούν σε σημαντικά καθαρότερη ποιότητα αέρα σε σχέση με το τέλος του 2020. Παρά την ισχυρή αβεβαιότητα του οικονομικού κλίματος οι επενδύσεις στις ανανεώσιμες πηγές παραμένουν υψηλές.

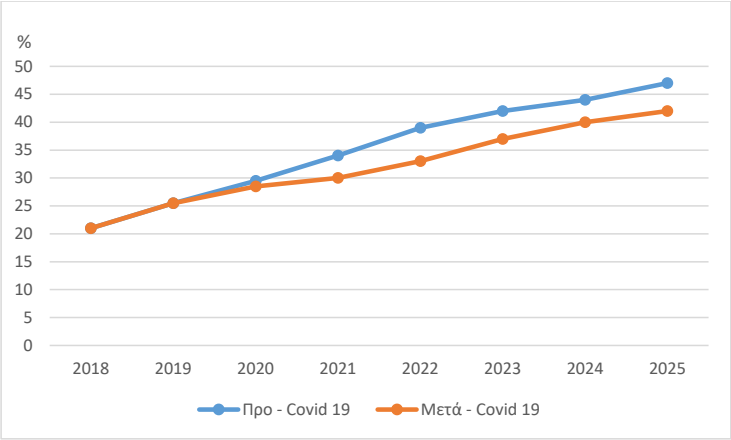
Αναμφίβολα η βιομηχανία ΑΠΕ έχει καταφέρει να καλύψει το χρόνο του εγκλεισμού και να προσαρμοστεί γρήγορα στις προκλήσεις της κρίσης. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται από τη θετική αναθεώρηση της πρόβλεψης του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας με την αυξημένη ικανότητα από ΑΠΕ το 2020 κατά 18% σε σχέση με την θεώρηση του Μαΐου. Διαταραχές της εφοδιαστικής αλυσίδας και καθυστερήσεις στον κατασκευαστικό τομέα επιβράδυναν την πρόοδο των έργων ανανεώσιμης ενέργειας κατά το πρώτο εξάμηνο του 2020. Ωστόσο, η κατασκευαστική δραστηριότητα επανήλθε ταχύτατα στα πρότερα προ κρίσης επίπεδα σε παγκόσμιο επίπεδο, γεγονός που θα συμβάλει στην επικύρωση του σεναρίου της αειφόρου ανάπτυξης.



Εικόνα 6: Εξέλιξη των επιπέδων εκπομπών CO2 (Gt CO_2) σύμφωνα με 3 σενάρια του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας - International Energy Agency μέχρι το 2030 υπό την πίεση της πρόσφατης υγειονομικής κρίσης.

Το μακροπρόθεσμο όραμα της Ευρωπαϊκής Επιτροπής [18] αναμένει ότι η πυρηνική ενέργεια θα συμβάλει στο 15% της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας το 2050. Ο στόλος των πυρηνικών αντιδραστήρων της Ευρώπης γερνά, με πολλές πυρηνικές εγκαταστάσεις να είναι εκτός λειτουργίας και μόνο λίγες αντιδραστήρες υπό κατασκευή και αρκετές προγραμματισμένες. Η ανάλυση του ΔΟΕ διαπιστώνει ότι χωρίς νέα πολιτική δράση σε εθνικό επίπεδο, η ικανότητα πυρηνικής ενέργειας στην ΕΕ θα μπορούσε να μειωθεί στο 5% έως το 2040. Αυτό μπορεί να έχει επιπτώσεις όχι μόνο στο κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και στην ασφάλεια του εφοδιασμού σε περιφερειακό επίπεδο, εάν δεν έχει μελετηθεί και αντιμετωπιστεί σωστά. Για να παραμείνει ανοικτή η επιλογή πυρηνικής ενέργειας για το 2030 και μετά, η ΕΕ πρέπει να διατηρήσει ίσους όρους ανταγωνισμού για τη χρηματοδότηση της πυρηνικής ενέργειας, να υποστηρίξει τις επεκτάσεις διάρκειας ζωής και νέες εγκαταστάσεις σε χώρες όπου γίνεται αποδεκτή η πυρηνική ενέργεια και να προωθήσει την ασφάλεια και τη διάθεση αποβλήτων για τον παροπλισμό υφιστάμενων φυτών.

Στην Ελλάδα η οικονομική κρίση κατά την τελευταία δεκαετία, επηρέασε σε μεγάλο βαθμό τη συνολική ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας. Οι προβλέψεις και τα σενάρια που βασίζονταν στην αυξημένη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια του 2019 προέβλεπαν ότι έως το 2021 η ζήτηση θα ισούται με 56,500 GWh [19, 20]. Ωστόσο, μετά το ξέσπασμα του Covid - 19, αυτό το σενάριο αναθεωρήθηκε για το 2023 που σημαίνει ότι η αναμενόμενη αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας θα παραταθεί κατά 2 έτη. Αντίστοιχα, το μερίδιο των ΑΠΕ στην κατανάλωση ενέργειας αναμένεται να αγγίξει το 42% το 2025, αντί του 2023 όπως είχε αρχικά προβλεφθεί (εικόνα 7). Δεδομένου ότι οι επενδύσεις σε ΑΠΕ αναμένεται να υποστηριχθούν σε εθνικό και ευρωπαϊκό επίπεδο κατά τη διάρκεια της παρούσας κρίσης του Covid -19, η ανάκαμψη σε σταθερή τροχιά προόδου εκτιμάται να αποκατασταθεί πολύ σύντομα.



Εικόνα 7: Μερίδιο (% ποσοστό) των ΑΠΕ στην κατανάλωση ενέργειας στην Ελλάδα πριν και μετά την πρόσφατη υγειονομική κρίση.

4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η πανδημία έχει επηρεάσει τη λειτουργία των ενεργειακών συστημάτων και τη ζήτηση ενέργειας σε όλο τον κόσμο. Παράλληλα οι συνθήκες της πρόσφατης κρίσης μπορούν να προσφέρουν μια προεπισκόπηση και μια προσομοίωση για το μείγμα ηλεκτρικής ενέργειας όπου κυριαρχούν οι πηγές χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Η καινοτομία φαίνεται να καθοδηγεί αυτό το δρόμο. Η πλειοψηφία των αναπτυγμένων χωρών και ισχυρές οικονομίες επένδυσαν στην έρευνα και ανάπτυξη καθαρής ενέργειας το 2018 και το 2019 ενισχύοντας το ρυθμό οικονομικής ανάπτυξής τους. Παραδόξως παρά την οικονομική αναστάτωση που προκλήθηκε από το Covid-19, καταγράφονται σοβαρές προσπάθειες από κυβερνήσεις και επιχειρήσεις που δραστηριοποιούνται στο χώρο της ενέργειας να ενισχύσουν τις τεχνολογίες και να συνειδητοποιήσουν το τεράστιο δυναμικό των ΑΠΕ . Τέτοιες κινήσεις αποδίδονται όχι μόνο στην ανάγκη αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής αλλά και στην επιθυμία να επιτευχθούν οι στόχοι της συμφωνίας του Παρισιού.

Ταυτόχρονα, απαιτούνται αποτελεσματικές πολιτικές, δράσεις του ιδιωτικού τομέα και συνεργασία δημόσιου-ιδιωτικού τομέα για τη δημιουργία ενός πιο περιεκτικού, βιώσιμου, προσιτού και ασφαλούς παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος.

Η οικονομική παρέμβαση που απαιτείται για την ανοικοδόμηση μετά την πανδημία μπορεί και πρέπει να επιταχύνει την ενεργειακή μετάβαση, ώστε να μην εξαλειφθούν και τα πλεονεκτήματα που έχουν κατακτηθεί κατά την τελευταία δεκαετία. Είναι σαφές ότι απαιτείται δημόσια υποστήριξη για την ενεργειακή καινοτομία, τη νέα ενεργειακή υποδομή, αλλά και την επικαιροποίηση του κανονιστικού πλαισίου για την υποστήριξη της ανοικοδόμησης λαμβάνοντας υπόψη την ενεργειακή μετάβαση. Για να ανακτήσουν την πρόοδο που έχει σημειωθεί προς την ενεργειακή μετάβαση και να αποφευχθεί κάθε απαισιόδοξο σενάριο, οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής πρέπει να επενδύσουν στην έρευνα και ανάπτυξη, επεκτείνοντας το ανθρώπινο κεφάλαιο και εκσυγχρονίζοντας την ενεργειακή υποδομή. Αυτές οι επενδύσεις θα αποφέρουν κέρδη τόσο από οικονομική όσο και από περιβαλλοντική άποψη. Η πανδημία δηλαδή έφερε επίσης στο προσκήνιο τη διασύνδεση των οικονομικών, κοινωνικών και περιβαλλοντικών συστημάτων - επισημαίνοντας το γεγονός ότι η ενεργειακή μετάβαση δεν αφορά μόνο το ενεργειακό μείγμα. Η παγκόσμια ενέργεια είναι κάτι περισσότερο από επιλογές για οικονομικά και περιβαλλοντικά θέματα.

Υπάρχουν ενδιαφέροντες διαρθρωτικοί παραλληλισμοί μεταξύ της κρίσης Covid-19 και της κλιματικής αλλαγής: πρέπει να επιπεδώσουμε τόσο την καμπύλη μόλυνσης/εξάπλωσης όσο και την καμπύλη θερμοκρασίας. Και οι δύο κρίσεις είναι παγκόσμιες και η καταπολέμησή τους απαιτεί διεθνή συνεργασία. Και οι δύο συνθήκες μας αναγκάζουν να δράσουμε με προνοητικότητα. Και οι δύο καταστάσεις έκτακτης ανάγκης θα μας οδηγήσουν αναπόφευκτα να εξετάσουμε κριτικά πώς να αντιμετωπίζουμε τα δεδομένες και τις προηγούμενες «βεβαιότητες». Με αυτήν την αφορμή μπορεί να αναπτυχθεί ένα νέο παγκόσμιο μοντέλο για την ευημερία και την προστασία του κλίματος. Υπάρχουν μερικά ενθαρρυντικά σημάδια ότι

αυτό μπορεί να πετύχει. Η εξασφάλιση της επιτυχίας τους θα απαιτήσει εντατική συνεργασία σε πολλούς τομείς, συμπεριλαμβανομένης της τυποποίησης, της χρηματοδότησης και της κυβερνητικής πολιτικής.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] IAE – International Energy Agency (2020). Renewable Energy Market Update Outlook for 2020 and 2021. May.

[2] IAE – International Energy Agency (2020). Renewable Energy Market Update Outlook for 2020 and 2021. May.

[3] Eurostat, 2020. Newsrelease, Euroindicators October 2020, 171/2020. 18 November.

[4] CCSA - Committee for the Coordination of Statistical Activities (2020). How COVID-19 is changing the world: a statistical perspective. https://unstats.un.org/unsd/ccsa .

[5] IEA – International Energy Agency, 2020b, "European Union 2020", Paris. https://www.iea.org/reports/european-union-2020 .

[6] Imperial College London, 2020, "Is the UK facing an electricity security crisis?", An Energy Futures Lab Briefing Paper.

[7] IAE – International Energy Agency, 2020a, "Sustainable Recovery. World Energy Outlook 2020", Special Report in collaboration with the International Monetary Fund. July.

[8] U.S. Energy Information Administration, 2020. "U.S. Energy Information Administration's International Energy Outlook 2020 (IEO2020)", October 14.

[9] World Economic Forum, 2020, "These 3 charts show what COVID-19 has done to global energy demand", Agenda, 18 May, https://www.weforum.org/agenda/2020/08/covid19-change-energy-electricity-use-lockdowns-falling-demand/ .

[10] Liu, Z., Ciais, P., Deng, Z., et al., 2020, "Near-real-time monitoring of global CO_2 emissions reveals the effects of the COVID-19 pandemic", Nature Communication, 11, 5172. https://doi.org/10.1038/s41467-020-18922-7 .

[11] Perkins, K. M., Munguia, N., Ellenbecker, M., Moure-Eraso, P., and Velazquez,L., 2020, "COVID-19 pandemic lessons to facilitate future engagement in the global climate crisis", Journal of Cleaner Production,125178, ISSN 0959-6526.

[12] World Economic Forum, 2020, "COVID-19 will accelerate the revolution in energy systems". https://www.weforum.org/platforms/covid-action-platform/articles/covid-19-accelerate-energy-revolution .

[13] World Economic Forum, 2020, "Fostering Effective Energy Transition 2020 edition", Insight Report May.https://www.weforum.org/reports/fostering-effective-energy-transition-2020 .

[14] Forster, P.M., Forster, H.I., Evans, M.J., et al.2020, "Current and future global climate impacts resulting from COVID-19", Nature Climate Change, 10, pp. 913–919. https://doi.org/10.1038/s41558-020-0883-0.

[15] Chang,C.-L., McAleer, M., Wang, Y.-A., 2020, "Herding behaviour in energy stock markets during the Global Financial Crisis, SARS, and ongoing COVID-19* ", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 134, 110349, ISSN 1364-0321.

[16] Transition Pathway Initiative, 2020, "Management Quality and Carbon Performance of Energy Companies", September 2020 Update. www.transitionpathwayinitiative.org.

[17] IEA – International Energy Agency, 2020c, "Renewables 2020 - Analysis and forecast to 2025.

[18] EEA - European Environmental Agency, 2020, "EEA Signals 2020 -Towards zero pollution in Europe". doi: 10.2800/40627.

[19] HAEE - Hellenic Association for Energy Economics, 2020, "Greek Energy Market Report 2020".

[20] IAEE - International Association for Energy Economics, 2020, "Impact of the Coronavirus on the Greek Energy Market", IAEE Energy Forum / Covid-19 Issue.

ΗΛΙΑΚΑ ΘΕΡΜΙΚΑ

ΜΕΛΕΤΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ ΜΕ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΜΠΕΤΟΝ, ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΤΜΟΥ ΣΕ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ

Παναγιώτης Κ. Κτίστης[1], Ραφαέλα Α. Αγαθοκλέους[1], Σωτήρης Α. Καλογήρου[1]

[1] Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Επιστήμης και Μηχανικής Υλικών, Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου
email: panayiotis.ktistis@cut.ac.cy, rafaela.agathokleous@cut.ac.cy, soteris.kalogirou@cut.ac.cy

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η Κύπρος αποτελεί χώρα πλήρως εξαρτημένη στην εισαγωγή καυσίμων για την παραγωγή ενέργειας. Ο κατασκευαστικός τομέας κατέχει το 60% της συνολικής κατανάλωσης καυσίμου με το βιομηχανικό τομέα να είναι ο δεύτερος μεγαλύτερος καταναλωτής κυρίως για παραγωγή ατμού. Η χρήση των συστημάτων παραβολικού συλλέκτη για παραγωγή ατμού ή ζεστού νερού μπορεί να μειώσει την κατανάλωση καυσίμου της βιομηχανίας σε σημαντικό βαθμό, εάν οι κύριες ανάγκες χρήσης τέτοιων συστημάτων μπορούν να εξυπηρετηθούν. Το κύριο κριτήριο ασφαλώς είναι η παραγωγή του συστήματος να μπορεί να εξυπηρετήσει τις ανάγκες της βιομηχανίας καθώς και να υπάρχει διαθέσιμη γη για την εγκατάσταση. Η παρούσα μελέτη παρουσιάζει το πρώτο σύστημα παραβολικού συλλέκτη, το οποίο εγκαταστάθηκε στη μεγαλύτερη βιομηχανία ποτών στην Κύπρο. Το σύστημα αποτελείται από δύο σειρές παραβολικών συλλεκτών με συνολικό εμβαδόν 288 m^2, ατμολέβητα και σύστημα αποθήκευσης θερμότητας σε μπετόν. Ο σκοπός του συστήματος αποθήκευσης είναι να παρέχεται θερμική ενέργεια στο σύστημα σε περιόδους χαμηλής ή και καθόλου ηλιοφάνειας εξυπηρετώντας έτσι τις θερμικές ανάγκες της βιομηχανίας. Για να επιτευχθεί αυτό, δύο στρατηγικές λειτουργίας έχουν αναπτυχθεί οι οποίες και ελέγχονται αυτόματα από τη μονάδα ελέγχου του συστήματος. Η πρώτη στρατηγική ενεργοποιείται όταν υπάρχει ανάγκη ατμού από τη βιομηχανία και η δεύτερη όταν η παραγόμενη θερμική ενέργεια μπορεί να αποθηκεύεται κατευθείαν στο σύστημα αποθήκευσης. Και οι δύο στρατηγικές λειτουργίας έχουν αξιολογηθεί και διαφάνηκε ότι κατά την πρώτη στρατηγική το σύστημα είχε την ικανότητα να παράξει 940 L ατμού σε θερμοκρασία 188 ^oC και πίεση 10 Bar_g ενώ κατά τη δεύτερη, το σύστημα μπόρεσε να αποθηκεύσει 107.3 kWh_{th}. Το σύστημα αξιολογήθηκε επίσης για δύο συνεχόμενους μήνες, αποδεικνύοντας την μακροπρόθεσμη ικανότητά του να καλύπτει την απαιτούμενη ποσότητα ατμού στη βιομηχανία όποτε του ζητηθεί, υποστηριζόμενο βέβαια από το σύστημα αποθήκευσης.

Λέξεις Κλειδιά: Παραβολικοί συλλέκτες, αποθήκευση θερμότητας σε μπετόν, ηλιακοί συλλέκτες

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μετά τον 20ον αιώνα, πολλές χώρες έχουν στρέψει το ενδιαφέρον τους στην παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας αξιοποιώντας συστήματα Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ). Κύριο μέλημά τους είναι να μειώσουν τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο που έχει η αυξανόμενη χρήση συμβατικών καυσίμων. Σήμερα, πρωτοπόρος ΑΠΕ θεωρείται η ηλιακή ενέργεια με πολλά συστήματα που έχουν αναπτυχθεί να αξιοποιούν αποδοτικά την ηλιακή ενέργεια μέσα από θερμικά ή φωτοβολταϊκά πάρκα.

Όσον αφορά την παραγωγή ενέργειας, η Κύπρος είναι σε πολύ μεγάλο βαθμό εξαρτημένη από τη χρήση συμβατικών καυσίμων με το 60% της συνολικής κατανάλωσης να αφορά τις παρασκευές (manufacturing). Ο βιομηχανικός τομέας αποτελεί το δεύτερο μεγαλύτερο καταναλωτή καυσίμου στην Κύπρο, χρησιμοποιώντας σημαντικές ποσότητες για παραγωγή ατμού. Με σκοπό τον εναρμονισμό της Κύπρου με τις Ευρωπαϊκές οδηγίες όσον αφορά τη μείωση κατανάλωσης καυσίμου, η χρήση συστημάτων ΑΠΕ για το σκοπό αυτό έχει αυξηθεί τα τελευταία χρόνια, αξιοποιώντας κυρίως τα ηλιακά συστήματα. Συνυπολογίζοντας λοιπόν τις υψηλές ανάγκες σε καύσιμο του βιομηχανικού τομέα, καθώς και το γεγονός ότι οι πλείστες απαιτούν θερμική ενέργεια για παραγωγή ατμού, η εφαρμογή τεχνολογίας παραβολικού συλλέκτη σε θερμικά πάρκα παρουσιάζεται ως η ιδανική λύση λόγω και της υψηλής τους απόδοσης, πετυχαίνοντας έτσι πιο ψηλές θερμοκρασίες σε σχέση με τους ευρέως διαδεδομένους επίπεδους συλλέκτες.

Σύμφωνα με το Διεθνές Ενεργειακό Γραφείο (IEA), το 2008 το 30% των παγκόσμιων ενεργειακών αναγκών οφείλεται στο βιομηχανικό τομέα [1]. Βιομηχανίες όπως χημικών, φαγητών και ποτών, πλαστικών και ρούχων, έχουν μεγάλες θερμικές ανάγκες για παραγωγή ατμού ή ζεστού νερού σε θερμοκρασίες από 100 °C σε 300 °C. Έτσι, η χρήση συστημάτων παραβολικού συλλέκτη θεωρείται η καταλληλότερη για μεγάλο εύρος βιομηχανικών διαδικασιών, συνεισφέροντας έτσι στην παραγωγή διασφαλίζοντας παράλληλα σημαντικό οικονομικό, περιβαλλοντικό και κοινωνικό κέρδος. Με την εγκατάσταση τέτοιου συστήματος, η βιομηχανία μπορεί να ανεξαρτητοποιηθεί σε σημαντικό βαθμό από τη διακύμανση του κόστους καυσίμου, σταθεροποιώντας έτσι το τελικό κόστος του προϊόντος σε πιο χαμηλά επίπεδα. Παράλληλα, η ενεργειακή ασφάλεια που δίδεται στις βιομηχανίες οι οποίες ανεξαρτητοποιούνται από την προμήθεια σημαντικών ποσοτήτων καυσίμου, είναι από μόνο του σημαντικό κίνητρο για να προχωρήσουν σε τέτοιες επενδύσεις. Επιπρόσθετα η εφαρμογή των συστημάτων αυτών συντείνει στη μείωση του φαινομένου της κλιματικής αλλαγής λόγω της μείωσης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO_2). Ουσιαστικά, η λιγότερη κατανάλωση καυσίμου μπορεί να οδηγήσει στη μείωση της μόλυνσης του περιβάλλοντος, εξασφαλίζοντας έτσι υγιέστερο περιβάλλον ζωής.

Πολλά συστήματα παραβολικού συλλέκτη για παραγωγή θερμότητας στις βιομηχανίες παρουσιάζονται παγκόσμια. Σύμφωνα με το IEA [2], 120 ηλιακά πάρκα βρίσκονται σε λειτουργία, καλύπτοντας συνολικό εμβαδόν 125,000 m^2 (88 MW). Μέχρι σήμερα υπάρχουν παγκόσμια, 61 εγκατεστημένα συστήματα παραβολικού συλλέκτη για παραγωγή θερμότητας σε βιομηχανίες, με συνολική εγκατεστημένη ισχύ 13.9 MW_{th}. Ο περισσότερος αριθμός εγκατεστημένων συστημάτων (18) βρίσκεται σε βιομηχανίες γάλακτος και ποτών ενώ όσον αφορά τη συνολική εγκατεστημένη ισχύ ο πρωτοπόρος τομέας είναι φαγητών και ποτών με 4 MW_{th} [3]. Το μεγαλύτερο σύστημα παραβολικού συλλέκτη βρίσκεται υπό κατασκευή σε εργοστάσιο εξόρυξης και λατομείο στο Νότιο Ομάν. Αυτό αναμένεται να έχει τη δυνατότητα να παράγει 6000 τόνους ατμού την ημέρα [4]. Αξίζει να σημειωθεί ότι αρκετά συστήματα παραβολικού συλλέκτη έχουν εγκατασταθεί σαν μέρος επιχορηγημένων προγραμμάτων. Συνεπώς υπάρχει αρκετή εμπειρία και γνώση όσον αφορά την αξιολόγηση της απόδοσης του τρόπου λειτουργίας τέτοιων συστημάτων. Η εμπειρία που αποκτήθηκε από αυτά τα συστήματα είναι αρκετά σημαντική στην ανάπτυξη και βελτιστοποίηση υφιστάμενων και νέων συστημάτων, έτσι ώστε να αναπτυχθούν μεγαλύτερης απόδοσης συστήματα στο μέλλον.

Η απόδοση συστήματος παραβολικού συλλέκτη που εγκαταστάθηκε το 1989 σε εργοστάσιο μεταξιού στο Mysore εξετάστηκε από τον Thomas [5]. Το σύστημα αποτελείται από 30 συλλέκτες καλύπτοντας εμβαδόν 192 m^2. Για τις ανάγκες του εργοστασίου παράγεται ατμός σε θερμοκρασία 150 °C με μέγιστη θερμοκρασία του ρευστού τους 179 °C. Το μέσω μεταφοράς θερμότητας είναι νερό και το σύστημα αξιολογήθηκε σε ηλιόλουστη μέρα το μήνα Απρίλιο. Η μέση ημερήσια απόδοση του συστήματος, δηλαδή η αναλογία της ενέργειας που συλλέχθηκε σε σχέση με τον παραγόμενο ατμό, υπολογίστηκε στα 33.5%.

Οι Pietruschka et al. [6] παρουσίασε εγκατεστημένο σύστημα παραβολικού συλλέκτη με σκοπό την παραγωγή θερμικής ενέργειας πετυχαίνοντας έτσι μείωση της κατανάλωσης καυσίμου. Το σύστημα

καλύπτει εμβαδόν 2040 m^2 και χρησιμοποιεί ρευστό μεταφοράς θερμότητας με μέγιστη θερμοκρασία τους 200 °C το οποίο οδηγείται σε ατμολέβητα για παραγωγή ατμού. Ο παραγόμενος ατμός αξιοποιείται στη διαδικασία παστερίωσης γάλακτος, ξέπλυμα μηχανημάτων, αποστείρωση και ξήρανση. Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι εκτιμήθηκε μείωση του CO_2 στους 290 τόνους το χρόνο λόγω της παρουσίας τους συστήματος παραβολικού συλλέκτη.

Στο Τέξας η παρασκευαστική βιομηχανία Johnson & Johnson, εγκατέστησε σύστημα που παράγει ατμό στους 174 °C, με συνολικό εμβαδόν 1068 m^2. Το ρευστό μεταφοράς θερμότητας είναι νερό σε πίεση ο οποίος εκτονώνεται σε ατμολέβητα με τον παραγόμενο ατμό να παρέχεται για τις διαδικασίες της βιομηχανίας. Η μελέτη του συστήματος έγινε από τους Brink et al. [7] οι οποίοι και αξιολόγησαν το σύστημα σε ηλιόλουστη ημέρα το μήνα Σεπτέμβριο. Η μέση ημερήσια απόδοση κυμάνθηκε από τους 30 – 40%, και η μέση ωριαία απόδοση από τους 38 – 42%.

Επιπρόσθετα, η εταιρεία NEP solar εγκατέστησε 3 συστήματα παραβολικού συλλέκτη για παραγωγή θερμότητας σε βιομηχανίες στην Ελβετία [8]. Το πρώτο εγκαταστάθηκε στην οροφή βιομηχανίας γάλακτος στο Bever καλύπτοντας εμβαδόν 115 m^2 και παράγοντας ατμό στους 190 °C. Ένα μεγαλύτερο σύστημα εγκαταστάθηκε σε βιομηχανία τυριών στο Saignelegier καλύπτοντας εμβαδόν 627 m^2 και παράγοντας ατμό στους 125 °C. Το σύστημα συνδυάζεται με δυο συμβατικούς λέβητες ισχύος 1 MW για σκοπούς προθέρμανσης, όταν η ηλιακή ακτινοβολία είναι χαμηλή. Το τρίτο σύστημα εγκαταστάθηκε στο Fribourg καλύπτοντας 587 m^2. Το ρευστό μεταφοράς θερμότητας είναι νερό το οποίο θερμαίνεται στους 165 °C για σκοπούς επεξεργασίας γάλακτος. Οι Rittmann-Frank et al. [9] προχώρησαν σε αξιολόγηση των τριών ηλιακών συστημάτων. Στο Bever, η χρονιαία απόδοση του συστήματος για το 2014 ήταν στο 23% ενώ μετά από αναβαθμίσεις που έγιναν τις επόμενες 3 περιόδους (2014, 2015, 2016) ανέβηκε στο 37% το 2015 που αντιστοιχεί σε 263 MWh καλύπτοντας το 12% του συνολικού φορτίου με χρονιαία εξοικονόμηση 69 τόνων CO_2. Στο σύστημα στο Fribourg η χρονιαία απόδοση κυμάνθηκε στο 40% (το έτος 2016) κάτι που αντιστοιχεί σε περισσότερο από 220 MWh ξεπερνώντας τις προσδοκίες.

Ακόμη ένα σύστημα έχει εγκατασταθεί στην Αίγυπτο, καλύπτοντας εμβαδόν 1958.4 m^2 με παραγωγή 1.3 τόνους την ώρα ατμό σε πίεση 8 Bar και θερμοκρασία 175 °C. Οι Abdel-Dayem et al. [10] αξιολόγησαν την απόδοση του συστήματος αναπτύσσοντας μαθηματικό μοντέλο που προσομοιάζει τις κύριες διαδικασίες. Βασισμένοι στην οικονομική ανάλυση (Life Cycle Savings Method) κατέληξαν ότι το βέλτιστο εμβαδόν συλλεκτών πρέπει να είναι 538 m^2 που αντιστοιχεί στο 10% της ανάγκης του εργοστασίου.

Πολλές μελέτες εστιάζονται σε συστήματα αποθήκευσης θερμότητας τα οποία είναι απαραίτητα σε ηλιακά συστήματα καθώς μπορούν να συλλέγουν θερμική ενέργεια που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μεταγενέστερο στάδιο (3-12 ώρες). Ο κύριος σκοπός των μονάδων αποθήκευσης θερμότητας είναι να καλύπτει τις ανάγκες σε θερμική ενέργεια της βιομηχανίας κατά τη διάρκεια χαμηλής ή καθόλου ηλιοφάνειας. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί τις πρωινές ώρες που δεν υπάρχει ηλιακή ακτινοβολία, για σκοπούς προθέρμανσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι για να υπάρχει διαθέσιμος ατμός στις 7 το πρωί τότε οι πλείστες βιομηχανίες ξεκινούν την προθέρμανση του ατμολέβητα και των σωληνώσεων τουλάχιστον 2-3 ώρες πριν. Συνεπώς είναι σημαντικό να υπάρξει υψηλής απόδοσης μονάδα αποθήκευσης, η οποία και μπορεί να παρέχει θερμότητα κατά τις ώρες αυτές. Επιπρόσθετα, η μονάδα αποθήκευσης μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως αντισταθμιστήρας (buffer) για να εξασφαλίζει τη λειτουργία του συστήματος σε πιο σταθερές συνθήκες (πίεση και θερμοκρασία). Αυτό ελαχιστοποιεί τις διακυμάνσεις της συμπεριφοράς του συστήματος στην περίπτωση σημαντικής διακύμανσης της ηλιακής ακτινοβολίας. Εμπλέκοντας σύστημα αποθήκευσης σε ηλιακό σύστημα, η ηλιακή συνεισφορά αυξάνεται, συμβάλλοντας περισσότερο στην περεταίρω μείωση της κατανάλωσης καυσίμου, του περιβαλλοντικού αντίκτυπου και λιγότερου χρόνου απόσβεσης [11].

Οι Kumaresan et al. [12] παρουσίασαν σε μελέτη τους πειραματική διάταξη με σύστημα παραβολικού συλλέκτη που περιλαμβάνει μονάδα αποθήκευσης. Η μονάδα αποθήκευσης είναι κάθετος κύλινδρος με 550 mm διάμετρο και 1100 mm ύψος συνολικού όγκου 230 L, επενδυμένος με θερμομόνωση από υαλοβάμβακα 150 mm. Παρατηρήθηκε ότι η στιγμιαία απόδοση του συστήματος κυμαίνεται από 50 - 62.5% με τη μέγιστη να σημειώνεται κατά το μεσημέρι. Όταν η μονάδα αποθήκευσης φορτίστηκε στους 120 °C και έμεινε ανεπηρέαστη από κυκλοφορία ρευστού για 45 ώρες, παρατηρήθηκε ωριαία απώλεια θερμότητας 1120 kJ. Η απόδοση όσον αφορά την ενέργεια η οποία συλλέγεται ως προς την ενέργεια η οποία αποθηκεύεται από τις 8 το πρωί μέχρι και τις 2 το μεσημέρι κυμαίνεται από 41% μέχρι 60%. Η μέγιστη απόδοση του συστήματος υπολογίστηκε κοντά στο 40%.

Ερευνητές μελέτησαν τρόπους ώστε να πετύχουν καλύτερη απόδοση της μονάδας αποθήκευσης διασφαλίζοντας το χαμηλότερο δυνατό κόστος αξιοποιώντας το μπετόν ως μέσο αποθήκευσης. Η

υψηλή θερμική αγωγιμότητα, οι εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες, παρόμοιος δείκτης θερμικής διαστολής του τσιμέντου σε σύγκριση με σωλήνες από σίδερο, καθώς και το χαμηλό κόστος υλικών, το καθιστούν ως πολύ υποσχόμενο μέσο για αποθήκευση θερμότητας. Στην Plataforma Solar de Almeria στην Ισπανία, η German Aerospace Center μελέτησε την πρώτη μονάδα αποθήκευσης που χρησιμοποιεί μπετόν [13]. Καλό είναι να σημειωθεί ότι κατά τη διάρκεια της φόρτισης του, υπολειπόμενο νερό στον πυρήνα της μονάδας αποθήκευσης εξατμίζεται και μπορεί να αυξηθεί η πίεση αν η διαπερατότητα είναι πολύ χαμηλή. Επομένως, οι ιδιότητες του μπετόν είναι η ικανότητα αποθήκευσης, η θερμική αγωγιμότητα καθώς και η ικανοποιητική διαπερατότητα για τον ατμό ώστε να μην προκαλείται ζημιά. Με βάση τα πιο πάνω, έχει κατασκευαστεί θερμομονωμένη μονάδα αποθήκευσης από μπετόν με 132 σωλήνες (9 m μήκος, 18 mm διάμετρος). Το σύστημα εξετάστηκε για 4 μήνες για εύρος θερμοκρασίας από τους 300 °C μέχρι 400 °C. Για έξι ώρες φόρτισης και αποφόρτισης του, υπολογίστηκε συνολική θερμοχωρητικότητα ίση με 25.6 kWh/m^3 [13].

Οι Martins et al. [14] εξέτασαν μονάδα αποθήκευσης σε μπετόν (Heatcrete®) που αντλεί θερμική ενέργεια από σύστημα παραβολικού συλλέκτη με συνολική θερμοχωρητικότητα 280 kWh_{th} υπό πραγματικές συνθήκες. Η πρόσμιξη Heatcrete® συγκρίθηκε με δύο υφιστάμενες προσμίξεις μπετόν που αναπτύχθηκαν από το German Aerospace Center (DLR) και το University of Arkansas (UA). Από τη σύγκριση προκύπτει ότι οι πιο υποσχόμενες ιδιότητες εντοπίζονται στην πρόσμιξη Heatcrete®. Σε ψηλές θερμοκρασίες κοντά στους 393 ºC, παρουσιάστηκαν μικρές ρωγμές λόγω της μικρής διαφοράς στο συντελεστή διαστολής μεταξύ των προσμίξεων μπετόν και των σιδερένιων σωλήνων. Μετά από αρκετές φορτίσεις και αποφορτίσεις της πρόσμιξης του μπετόν του UA η αντοχή στη θλίψη μειώθηκε σημαντικά, εξαιτίας των τοπικών υπερπιέσεων στο πορώδες σύστημα. Οι ίδιοι κύκλοι φόρτισης και αποφόρτισης εκτελέστηκαν και για το Heatcrete® και κατέδειξαν αρκετά καλή αντίσταση στη φθορά, αλλαγή στο χρώμα και παρουσία ρωγμών. Ωστόσο, διαπιστώθηκε απώλεια βάρους στην αρχή των πειραμάτων, λόγω της διαρροής ατμού ο οποίος ήταν παγιδευμένος σε δείγματα λόγω της θερμικής αποσύνθεσης που συνοδεύεται από την απελευθέρωση διοξειδίου του άνθρακα. Αυτή η απώλεια βάρους δεν θεωρείται αρκετά σημαντική καθώς η συμπεριφορά του Heatcrete® είναι σταθερή μέχρι τους 400 °C ενώ η ειδική θερμότητα είναι αρκετά ψηλή ίση με 0.75 kWh/m^3K.

Αρκετές βιομηχανίες σε αρκετές χώρες έχουν αντιληφθεί τα προαναφερθέντα οφέλη θέτοντας στόχους για την εφαρμογή τέτοιων συστημάτων στις στρατηγικές παραγωγής τους. Όσον αφορά την Κύπρο, λόγω και της άπλετης ηλιακής ακτινοβολία καθ' όλη την διάρκεια του χρόνου, αλλά και το αυξημένο κόστος καυσίμου, υπάρχει εξαιρετική προοπτική για εκμετάλλευση τέτοιων συστημάτων. Επίσης, ο βιομηχανικός τομέας αποτελεί το δεύτερο μεγαλύτερο καταναλωτή καυσίμου (20%) μετά τις μεταφορές (57%). Πιστεύεται, ότι η εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας στις διαδικασίες παραγωγής θερμικής ενέργειας σε βιομηχανίες στην Κύπρο μπορεί να οδηγήσει σε δραστική μείωση της εισαγωγής καυσίμων, βοηθώντας και το νησί να επιτύχει τους στόχους που έχουν τεθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση, ώστε το 2030 να μειωθεί η εισαγωγή καυσίμων στο 12%. Επίσης, η εγκατάσταση συστημάτων παραβολικού συλλέκτη από το βιομηχανικό τομέα θα βοηθήσει άμεσα στο να καλυφθεί μεγάλο ποσοστό του στόχου που αφορά το 32% της ενεργειακής κατανάλωσης η οποία και πρέπει να προέρχεται από συστήματα ΑΠΕ [15].

Λαμβάνοντας υπόψη τα πιο πάνω, σαν μέρος του Solar ERA-NET project, 'Evaluation of the Dispatchability of a Parabolic Trough Collector System with Concrete Storage' με ακρωνύμιο 'EDITOR' σχεδιάστηκε και εγκαταστάθηκε καινοτόμο σύστημα παραβολικού συλλέκτη στη μεγαλύτερη βιομηχανία χυμών στην Κύπρο, με επωνυμία KEAN. Ο σκοπός της μελέτης αυτής είναι να παρουσιάσει την απόδοση του συστήματος αποδεικνύοντας ότι μπορεί να λειτουργεί και να παρέχει ατμό στη βιομηχανία στη ζητούμενη πίεση και θερμοκρασία. Η καινοτομία του συστήματος είναι ότι αποθηκεύει ενέργεια σε μπετόν μέχρι και 640 kWh_{th}. Η απόκριση του συστήματος αποθήκευσης επίσης εξετάζεται ώστε να αποδεικτή η ικανότητά του να παρέχεται ατμός στη βιομηχανία από το ηλιακό σύστημα ενώσω υπάρχει ανάγκη. Το σύστημα εργάζεται κάτω από δύο στρατηγικές λειτουργίας βασισμένες στο πρόγραμμα παραγωγής της βιομηχανίας. Η πρώτη στρατηγική αφορά τη λειτουργία του συστήματος από τη Δευτέρα μέχρι και την Παρασκευή και η δεύτερη λειτουργία κατά τη διάρκεια του Σαββατοκύριακου, όπου η βιομηχανία είναι κλειστή. Οι μέθοδοι λειτουργίας αυτών των στρατηγικών έχουν αναλυθεί, υπολογίζοντας την απόδοση του συστήματος, την παραγόμενη ενέργεια και την παραγωγή ατμού από το σύστημα κατά τη Στρατηγική 1 και 2. Το σύστημα επίσης αξιολογήθηκε για δύο συνεχόμενους μήνες με σκοπό να αποδειχθεί ότι οι στρατηγικές λειτουργίας μπορούν να είναι αποδοτικές παρέχοντας ατμό στη βιομηχανία σε μεγαλύτερη χρονικά περίοδο.

2. ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ

Το καινοτόμο σύστημα παραβολικού συλλέκτη έχει εγκατασταθεί στη Λεμεσό, στη βιομηχανία ποτών της ΚΕΑΝ, ως μέρος ερευνητικής εργασίας του EDITOR project [16]. Οι διαδικασίες της βιομηχανίας οι οποίες απαιτούν θερμότητα είναι ο καθαρισμός/απολύμανση γυάλινων μπουκαλιών και μηχανών, παστερίωση και απολύμανση. Αξίζει να σημειωθεί ότι το μέγεθος του ηλιακού συστήματος καλύπτει μέρος της πραγματικής ανάγκης σε θερμική ενέργεια της βιομηχανίας. Σκοπός της εγκατάστασης είναι να αποδειχθεί ότι η τεχνολογία αυτή είναι αφενός εφαρμόσιμη και αφετέρου βιώσιμη κάτω από της συνθήκες που επικρατούν στην Κύπρο παρέχοντας πολλαπλά οφέλη τόσο στις βιομηχανίες όσο και στο νησί.

Το ηλιακό σύστημα αποτελείται από 8 παραβολικούς συλλέκτες (CF100) συνδεδεμένους σε 2 παράλληλες γραμμές των 4, με άνοιγμα 3 m και μήκος 12 m. Η ονομαστική θερμική ισχύς του συστήματος είναι 125 kW_{th}. Οι συλλέκτες CF100 κατασκευάστηκαν από τη Γερμανική εταιρεία Protarget σε συνεργασία με την DLR και άλλους βιομηχανικούς συνεργάτες [17]. Περιλαμβάνουν ένα υψηλής απόδοσης απορροφητήρα με θερμοκρασία λειτουργίας μέχρι και τους 425 °C. Το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας σε μπετόν κατασκευάστηκε από την Ισπανική εταιρεία S.L. CADE στην Ισπανία και αποτελείται από 4 αποθηκευτικές μονάδες [18].

Μετεωρολογικός σταθμός σχεδιασμένος από την Solar-Institute Jülich (SIJ) [16] έχει εγκατασταθεί, για καταγραφή των καιρικών δεδομένων. Τα δεδομένα στέλνονται από το μετεωρολογικό σταθμό στη μονάδα ελέγχου για προστασία των συλλεκτών σε περίπτωση ακραίων καιρικών φαινομένων. Περεταίρω, οι καταγραφόμενες τιμές της διαθέσιμης ηλιακής ακτινοβολίας χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της απόδοσης του συστήματος.

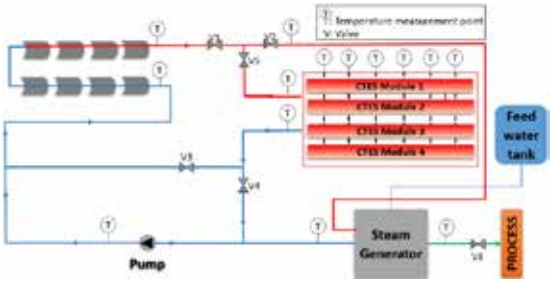
Το τρίτο μέρος του συστήματος είναι ο ατμολέβητας, κατασκευασμένος επίσης από την εταιρεία PROTARGET για παραγωγή ατμού σε πίεση 10 Bar_g, 188 °C. Νερό εισέρχεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος από ντεπόζιτα νερού που είναι τοποθετημένα στην οροφή του μηχανοστασίου και ο ατμολέβητας γεμίζει με νερό σε προκαθορισμένο σημείο, αφήνοντας χώρο για τον ατμό. Το ρευστό κυκλοφορεί στις σωληνώσεις εντός του ατμολέβητα, και η θερμότητα μεταφέρεται από το ρευστό στο νερό, με τον κορεσμένο ατμό να παράγεται στους 188 °C. Το ρευστό μεταφοράς θερμότητας είναι το θερμικό λάδι HELISOL®XA [19], φιλικό προς το περιβάλλον, ακίνδυνο, μη διαβρωτικό με μεγάλο χρόνο ζωής, το οποίο και κυκλοφορεί με τη βοήθεια αντλίας. Παράλληλα, αριθμός βαλβίδων ελέγχου τίθενται σε λειτουργία στο σύστημα ώστε να ελέγχουν τον τρόπο λειτουργίας και τις στρατηγικές του συστήματος.

Για την αξιολόγηση του συστήματος, σημαντικός αριθμός αισθητήρων χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση αριθμού παραμέτρων όπως η θερμοκρασία του ρευστού στην έξοδο του συλλέκτη και σε άλλα σημαντικά σημεία στο σύστημα, η θερμοκρασία εντός των τεσσάρων μονάδων αποθήκευσης, η πίεση στον ατμολέβητα και στον κυκλοφορητή, η ροή μάζας τόσο στον κυκλοφορητή όσο και στην παροχή νερού από τον ατμολέβητα. Επίσης υπολογίζεται η ισχύς των συλλεκτών, του συστήματος αποθήκευσης, του ατμολέβητα και η πίεση στην έξοδο του συλλέκτη. Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας που σε μεγάλο βαθμό καθορίζει την αξιολόγηση του συστήματος χρησιμοποιούνται thermocouples Type K. Όσον αφορά τη θερμοκρασία στο σύστημα αποθήκευσης, 24 σημεία μέτρησης έχουν ρυθμιστεί να αποθηκεύουν τη θερμοκρασία του ρευστού που κυκλοφορεί καθώς και του τσιμέντου. Όλες οι μετρήσιμες τιμές, με χρονικό βήμα ενός λεπτού αποθηκεύονται στη μονάδα ελέγχου του συστήματος στο μηχανοστάσιο, οι οποίες και είναι προσβάσιμες για παρακολούθηση και ανάλυση του συστήματος οποιαδήποτε ώρα.

2.1. Μέθοδοι λειτουργίας και στρατηγικές

Σχηματικό διάγραμμα του συστήματος παρουσιάζεται στην Εικόνα 1. Γενικά, ο συλλέκτης αποτελείται από τον απορροφητήρα και τον ανακλαστήρα. Ο απορροφητήρας έχει ειδική επικάλυψη που προσφέρει σε αυτόν υψηλή απορροφητικότητα (μέχρι και 94%) και χαμηλό δείκτη εκπομπής. Είναι τοποθετημένος στην εστιακή γραμμή και περιβάλλεται από γυαλί ενώ συνθήκες κενού διατηρούνται μεταξύ του απορροφητήρα και του γυαλιού ώστε να μειώνονται οι απώλειες θερμότητας, να αυξάνεται η θερμική απόδοση και να προστατεύεται η επικάλυψη του απορροφητήρα από την άμεση επαφή με το περιβάλλον. Ο παραβολικός συλλέκτης είναι εγκατεστημένος σε διεύθυνση βορρά-νότου παρακολουθώντας τον ήλιο από τη δύση στην ανατολή, με τη βοήθεια δύο υδραυλικών συστημάτων παρακολούθησης ήλιου. Οι προσπίπτουσες ακτίνες του ήλιου πέφτουν στον ανακλαστήρα με ανακλαστικότητα κοντά στο 95% και η απευθείας ηλιακή ακτινοβολία (DNI) συγκεντρώνεται στον απορροφητήρα, όπου το ρευστό μεταφοράς θερμότητας κυκλοφορεί. Στη συνέχεια, το ρευστό οδηγείται στον ατμολέβητα ή στο σύστημα αποθήκευσης θερμότητας, ανάλογα με τη μέθοδο

λειτουργείας. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 1, το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας συνδέεται σε παράλληλη διάταξη και ενεργοποιείται ανάλογα με τη μέθοδο λειτουργίας αξιοποιώντας τις ηλεκτρικές βαλβίδες. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην Εικόνα 1, το σύμβολο V υποδεικνύει βαλβίδες και το T σημεία μέτρησης θερμοκρασίας. Όπως ήδη αναφέρθηκε, 24 σημεία μέτρησης θερμοκρασίας υπάρχουν στο σύστημα αποθήκευσης θερμότητας, 6 σε κάθε μονάδα αποθήκευσης, όπως αυτά παρουσιάζονται στην Εικόνα 1 για την μονάδα 1, μόνο για σκοπούς ευκρίνειας.



Mode	Pump	V1	V2	V3	V4	V5	V6
TES cold start	ON	C	O	O	C	R	C
TES discharge	ON	C	O	O	C	R	O
TES discharge and SF recirculation	ON	R	O	O	C	R	O
TES discharge and Generation	ON	R	O	O	C	R	O
Generation	ON	O	O	C	O	C	O
TES Charge	ON	O	C	C	O	O	C
SF preheating	ON	R	O	C	C	C	C
Plant off	OFF	O	C	C	O	C	C
% OPEN CLOSE REGULATED		O=100%		C=0%		R=10-90%	

Εικόνα 1: Διάταξη του συστήματος και πίνακας υπόδειξης κατάστασης βαλβίδων ανάλογα με τη μέθοδο λειτουργίας.

Για να επιτευχθούν οι στρατηγικές λειτουργίας, ξεχωριστές μέθοδοι λειτουργίας του συστήματος έχουν αναπτυχθεί και βελτιστοποιηθεί. Ανάλογα με τη μέθοδο, οι ανάλογες βαλβίδες ενεργοποιούνται. Ο σκοπός των στρατηγικών αυτών είναι να καταστήσουν το σύστημα αυτόνομο και να παρέχει ατμό στη βιομηχανία όποτε υπάρχει ανάγκη.

Η λειτουργία του συστήματος παραβολικού συλλέκτη στην KEAN χωρίζεται σε δύο στρατηγικές όπως παρουσιάζονται στην Εικόνα 2. Η πρώτη στρατηγική, από τη Δευτέρα μεχρι και την Παρασκευή με ανάγκη σε ατμό στους 188 °C και πίεση 10 Bar_g ξεκινώντας από τις 5 το πρωί μέχρι τις 3 το απόγευμα. Η δεύτερη ενεργοποιείται κατά τη διάρκεια του Σαββατοκύριακου όπου δεν υπάρχει ανάγκη σε ατμό, συνεπώς η παραγώμενη θερμότητα αποθηκεύεται στο σύστημα αποθήκευσης. Κατά τη διάρκεια εφαρμογής των δύο στρατηγικών, σημαντικές μέθοδοι λειτουργίας ενεργοποιούνται υπό συγκεκριμένα κριτήρια ανάλογα με τη θερμοκρασία του ρευστού μεταφοράς θερμότητας, τη μέση θερμοκρασία στο σύστημα αποθήκευσης θερμότητας, τις ανάγκες θερμικής ενέργειας των διαδικασιών της βιομηχανίας και τη διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία. Οι δύο στρατηγικές ακολουθούν τις πιο κάτω μεθόδους λειτουργίας:

- Στρατηγική 1 ενεργοποιεί τις πιο κάτω μεθόδους: TES Cold-Start Mode, TES Discharge Mode, TES Discharge and Solar Field Recirculation Mode, TES discharge and Generation Mode, Generation Mode and TES Charging Mode (μπλέ χρώμα στην Εικόνα 2).
- Στρατηγική 2 ενεργοποιεί τις πιο κάτω μεθόδους: Solar Field Preheating Mode and TES Charging Mode (καφέ χρώμα στην Εικόνα 2).

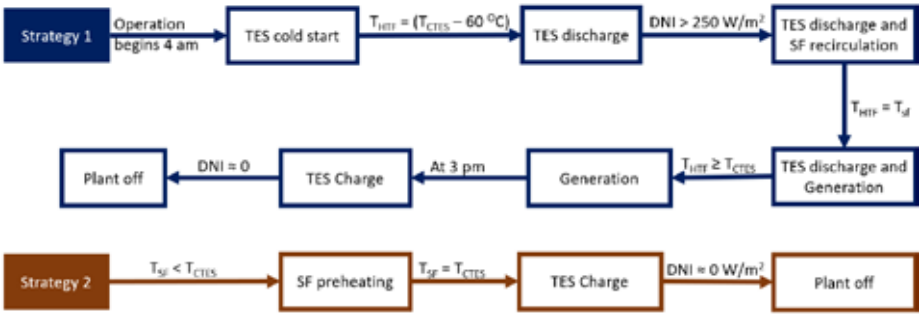
Η Στρατηγική 1 ενεργοποιείται στις 4 το πρωί και το σύστημα ενεργοποιεί τη στρατηγική 'TES Cold-Start Mode'. Κατά τη διάρκεια αυτής, η αποθηκευμένη θερμική ενέργεια στο σύστημα αποθήκευσης μεταφέρεται στον ατμολέβητα κυκλοφορώντας το ρευστό μεταξύ του συστήματος αποθήκευσης και του ατμολέβητα. Αυτή η μέδοδος χρησιμοποιείται για να αυξάνει τη θερμοκρασία του από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος που βρίσκεται, σε θερμοκρασία ίση με 60 °C λιγότερους από τη θερμοκρασία του συστήματος αποθήκευσης. Για να επιτευχθεί αυτό χωρίς να καταστραφεί η η κατασκευή του μπετόν (cracking), η διαδικασία γίνεται αργά, με χαμηλή ροή ελέγχοντας τη βαλβίδα 5 (οι βαλβίδες απεικονίζονται στην Εικόνα 1). Την ίδια ώρα η πίεση στον ατμολέβητα αρχίζει να αυξάνεται. Εάν η θερμοκρασία του ρευστού γίνει ίση με την επιδιοκώμενη και η ώρα είναι 5 το πρωί, η μέθοδος 'TES Discharge Mode' ενεργοποιείται. Εάν ο στόχος της θερμοκρασίας του ρευστού δεν επιτευχθεί δίδεται περισσότερος χρόνος. Αυτή η μέθοδος παραμένει ενεργεί ενώσω η ηλιακή ακτινοβολία είναι χαμηλή και έτσι το ρευστό μεταφοράς θερμότητας ρέει από το σύστημα αποθήκευσης κατευθείαν στον ατμολέβητα με το 50% της ταχύτητας ροής του κυκλοφορητή, ώστε να παρέχει την απαιτούμενη ισχύ στη ζητούμενη πίεση και θερμοκρασία. Αυτή η μέθοδος διασφαλίζει παρουσία ατμού από το ηλιακό σύστημα (και πιο συγκεκριμένα από το σύστημα αποθήκευσης) στη βιομηχανία όταν η ηλιακή ακτινοβολία είναι χαμηλή. Οι βαλβίδες 1 και 4 παραμένουν κλειστές κατά τη διαδικασία ενώ οι βαλβίδες 2,3 και 6 είναι εντελώς ανοικτές. Ενώ η ηλιακή ακτινοβολία αυξάνεται οι

δύο γραμμές παραβολικού συλλέκτη ενεργοποιούνται με το σύστημα να ξεκινά αρχικά στη μέθοδο 'TES Discharge & SF Recirculation Mode' και ακολούθως 'TES Discharge & Generation Mode'. Κατά τη μέθοδο 'TES Discharge & SF Recirculation Mode' η ενέργεια μεταφέρεται από το σύστημα αποθήκευσης στον ατμολέβητα για παραγωγή ατμού και το ρευστό μεταφοράς θερμότητας κυκλοφορεί στους παραβολικούς συλλέκτες ώστε να αυξηθεί η θερμοκρασία του. Όταν η θερμοκρασία ομογενοποιηθεί σε όλο το σύστημα η μέθοδος 'TES Discharge & Generation Mode' ενεργοποιείται. Για αυτή την μέθοδο οι βαλβίδες 2, 3 και 6 παραμένουν ανοικτές, η βαλβίδα 4 κλείνει ενώ οι βαλβίδες 1 και 5 ρυθμίζονται ανάλογα.

Όταν η θερμοκρασία του ρευστού μεταφοράς θερμότητας ($T_{PTC,o}$) είναι μεγαλύτερη από τη μέση θερμοκρασία του συστήματος αποθήκευσης ($T_{CTES,av}$) η μέθοδος λειτουργίας 'Generation Mode' ενεργοποιείται. Η αλλαγή της μεθόδου λειτουργίας γίνεται αυτόματα, βασισμένη στη θερμοκρασία του ρευστού και στη διαφορά πίεσης που ελέγχεται από τις βαλβίδες. Σε αυτή τη μέθοδο, το ρευστό μεταφοράς κυκλοφορεί μεταξύ των παραβολικών συλλεκτών και τον ατμολέβητα, μεταφέροντας τη συλλεγόμενη ενέργεια σε αυτόν. Το δοχείο αποθήκευσης νερού το οποίο είναι τοποθετημένο πάνω από το μηχανοστάσιο, συμπληρώνει νερό σε θερμοκρασία περιβάλλοντος στον ατμολέβητα. Ο ατμός που παράγεται, τροφοδοτείται στις διαδικασίες της βιομηχανίας. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας παραγωγής ατμού σε πίεση 10 Bar_g (±0.2 Bar_g), το σύστημα λειτουργεί σε θερμοκρασία ρευστού στην έξοδο του συλλέκτη στους 350 ^oC με ονομαστική θερμική ισχύ 125 kW_{th}. Αυτή η μέθοδος παραμένει ενεργοποιημένη μέχρι και τις 3 το απόγευμα όταν και η ανάγκη για ατμό από τη βιομηχανία ολοκληρώνεται. Κατά την μέθοδο παραγωγής, η βαλβίδες 1,2,4 και 6 παραμένουν ανοικτές ενώ οι 3 και 5 κλειστές.

Μετά τις 3 το απόγευμα, η ηλιακή ακτινοβολία παραμένει σε υψηλά επίπεδα, οπότε το σύστημα αυτόματα στρέφεται στη μέθοδο 'Charging Mode'. Κατά τη διάρκεια της μεθόδου αυτής, ο ατμολέβητας απομονώνεται και το ρευστό μεταφοράς κυκλοφορεί από τους συλλέκτες στο σύστημα αποθήκευσης, μεταφέροντας τη συλλεγόμενη ενέργεια σε αυτό. Οι βαλβίδες 2 και 3 παραμένουν κλειστές ενώ οι 1, 4 και 5 ανοικτές. Τέλος, όταν η ηλακή ακτινοβολία δεν είναι ικανοποιητική, γύρω στις 6:30 το απόγευμα, το σύστημα απενεργοποιείται μέχρι και τις 4 το πρωί της επόμενης ημέρας, όπου και ο κύκλος που περιγράφηκε επαναλαμβάνεται.

Το Σαββατοκύριακο, όπου δεν υπάρχει ανάγκη από τη βιομηχανία σε ατμό, το σύστημα δουλεύει με βάση τη Στρατηγική 2. Όταν και η ηλιακή ακτινοβολία αυξάνεται, το σύστημα ενεργοποιείται και στρέφεται στη μέθοδο 'SF preheating'. Έτσι με το που γίνει η θερμοκρασία του ρευστού ίση με τη μέση θερμοκρασία του συστήματος αποθήκευσης, η βαβλίδα 5 ανοίγει και η μέθοδος 'Charging Mode' ενεργοποιείται μέχρι και που η ηλιακή ακτινοβολία δεν θα είναι ικανοποιητική.



Εικόνα 2: Στρατηγικές λειτουργίας του συστήματος.

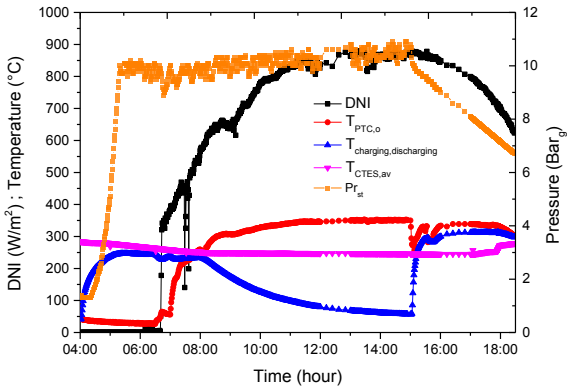
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1. Μέθοδοι λειτουργίας και στρατηγικές

Δεδομένα της απόκρισης του συστήματος έχουν αναλυθεί ώστε να αξιολογηθεί το σύστημα στις μεθόδους λειτουργίας που συμπεριλαμβάνονται στις στρατηγικές λειτουργίας. Δύο ηλιόλουστες ημέρες χωρίς σύννεφα έχουν επιλεγεί για την αξιολόγησή τους.

Η Εικόνα 3 παρουσιάζει την πίεση (Pr_{st}) του παραγόμενου ατμού, την απευθείας ηλιακή ακτινοβολία, τη θερμοκρασία του ρευστού στην έξοδο της γραμμής των συλλεκτών ($T_{PTC,o}$) τη θερμοκρασία του ρευστού κατά της μεθόδους φόρτισης και αποφόρτισης του συστήματος αποθήκευσης ($T_{charging,discharging}$) και τη μέση θερμοκρασία του συστήματος αποθήκευσης ($T_{CTES,av}$) κατά τη διάρκεια της ημέρας για τη Στρατηγική 1.

Οι ακόλουθες θερμοκρασίες και ώρες αφορούν την ημέρα εξέτασης αλλά είναι εφαρμόσιμες και για τις υπόλοιπες ημέρες. Στις 4 το πρωί, το σύστημα βρίσκεται στην 'TES Cold-Start Mode'. Ενώ η ηλιακή ακτινοβολία είναι μηδενική αυτή την ώρα, το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας θερμαίνει το ρευστό με αργό ρυθμό στους 236 ºC και η πίεση στον ατμολέβητα αυξάνεται στα 5.1 Barg. Η $T_{CTES,av}$ αυτή την ώρα για τη συγκεκριμένη ημέρα είναι 279 ºC. Αφού λοιπόν η θερμοκρασία του ρευστού είναι λιγότερη από 60 ºC σε σύγκριση με αυτή του συστήματος αποθήκευσης, στις 5 το πρωί το σύστημα στρέφεται στην 'TES Discharge Mode'. Από τις 5 μέχρι και τις 6:30, ατμός παράγεται αποκλειστικά από το σύστημα αποθήκευσης. Η πίεση στον ατμολέβητα στις 6:30 το πρωί αυξήθηκε στα 10 Barg και η θερμοκρασία του ρευστού στους 242 ºC. Έτσι, ενώ η ηλιακή ακτινοβολία αυξάνεται, η θερμοκρασία του ρευστού στους συλλέκτες, η οποία ήταν σε συνθήκες περιβάλλοντος, πρέπει να ομογενοποιηθεί κυκλοφορώντας το ρευστό μέσω του συστήματος αποθήκευσης. Και οι δύο συλλέκτες στρέφονται σε ρύθμιση παρακολούθησης του ήλιου και η μέθοδος 'CTES Discharge and SF Recirculation Mode' ενεργοποιείται μέχρι τις 7:42 το πρωί, όπου η θερμοκρασία σε όλα τα σημεία του συστήματος είναι η ίδια (233 °C). Στη συνέχεια ενεργοποιείται η 'TES Discharging and Generation Mode' παράγοντας ατμό μέχρι και τις 8 το πρωί. Αυτή την ώρα η $T_{PTC,o}$ είναι στους 259 ºC ξεπερνώντας τη $T_{CTES,av}$ που ήταν 253 ºC. Συνεπώς, το σύστημα μέχρι και τις 3 το απόγευμα στέφεται στη μέθοδο 'Generation Mode' με παραγωγή ατμού μόνο από τους συλλέκτες. Η $T_{PTC,o}$ διατηρείται κοντά στους 350 ºC για να ικανοποιεί τις παραμέτρους του ατμολέβητα. Η μέθοδος 'Generation Mode' λειτουργεί σε μέση απευθείας ηλιακής ακτινοβολία 783 W/m^2. Στη συνέχεια, στις 3 το απόγευμα, η 'CTES Charging Mode' ενεργοποιείται μέχρι τη δύση του ήλιου αυξάνοντας την $T_{CTES,av}$ από τους 245 °C στους 282 °C για μέση DNI στα 756 W/m^2. Τέλος, η $T_{CTES,av}$ κατά τη διάρκεια της ημέρας κυμάνθηκε από τους 284 ºC στις 4 το πρωί στους 245 ºC στις 3 το απόγευμα. Ενώ με την ενεργοποίηση της μεθόδου 'CTES Charging Mode' από τις 3 μέχρι και τις 6:30 το απόγευμα ανέβηκε ξανά στους 284 °C.



Εικόνα 3: Μεταβολή της θερμοκρασίας του ρευστού, της απευθείας ηλιακής ακτινοβολίας, της πίεσης στον ατμολέβητα σε σχέση με το χρόνο κατά τη Στρατηγική 1.

Η Εικόνα 4 παρουσιάζει την παραγώμενη ενέργεια από το συλλέκτη (P_{PTC}), τον παραγώμενο ατμό (Q_{st}), την ενέργεια που μεταφέρεται από και προς το σύστημα αποθήκευσης (P_{CTES}) και το λόγο της ισχύς που συλλέγεται από τον ήλιο σε σχέση με την ισχύ που παράγεται από το συλλέκτη (η_{PTC}). Όπως παρατηρείται, η παραγωγή ατμού είναι συνεχής από τις 5 το πρωί μέχρι και τις 3 το απόγευμα αποδεικνύοντας ότι το σύστημα παραβολικού συλλέκτη μπορεί να ικανοποιήσει τις θεμικές ανάγκες της βιομηχανίας, σύμφωνα με τις βάρδιες παραγωγής.

Με τη βοήθεια του συτήματος αποθήκευσης το σύστημα παρέχει ανελλειπώς ατμό στη βιομηχανία, από τις πρωινές ώρες, μολονότι δεν υπάρχει επαρκής ηλιακή ακτινοβολία. Για το λόγο αυτό το P_{CTES} φαίνεται να έχει αρνητικές τιμές στο γράφημα τις πρωινές ώρες, εξαιτίας της ενέργειας η οποία αντλείται από το σύστημα αποθήκευσης στον ατμολέβητα (και αργότερα στους συλλέκτες). Επίσης,

μετά τις 3 το απόγευμα οι τιμές αυτές είναι θετικές καθώς η ενέργεια μεταφέρεται από τους συλλέκτες προς το σύστημα αποθήκευσης με σκοπό τη φόρτισή της. Ακολούθως, το P_{PTC} τις πρωινές ώρες είναι επίσης αρνητική λόγω της ενέργειας που μεταφέρεται από το σύστημα αποθήκευσης προς τους συλλέκτες, με σκοπό την ομογενοποίηση της θερμοκρασίας του ρευστού.

Η P_{CTES}, P_{PTC} και το Q_{st} υπολογίζεται με βάση τις πιο κάτω εξισώσεις:

$$P_{CTES} = \dot{m}_{HTF} \times c_{p,HTF} \times (T_{CTES,o} - T_{CTES,i}) \quad (1)$$

$$P_{PTC} = \dot{m}_{HTF} \times c_{p,HTF} \times (T_{PTC,o} - T_{PTC,i}) \quad (2)$$

$$Q_{st} = m_{W} \times c_{p,W} \times (T_{st,o} - T_{W,i}) \quad (3)$$

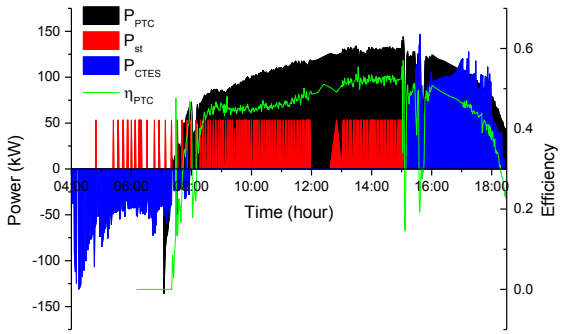
Όπου ṁ είναι η ροή μάζας (kg/s), c_p είναι η ειδική θερμότητα (kJ/kg·K), $T_{CTES,i}$ είναι η θερμοκρασία του ρευστού στην είσοδο της μονάδας αποθήκευσης (°C), $T_{CTES,o}$ είναι η θερμοκρασία του ρευστού στην έξοδο της μονάδας αποθήκευσης (°C), $T_{st,o}$ είναι η θερμοκρασία του ατμού στην έξοδο του ατμολέβητα (°C) και $T_{w,i}$ η θερμοκρασία του νερού στην είσοδο του ατμολέβητα (°C).

Η $\eta_{PTC,}$ υπολογίζεται από την Εξ. (4), και κυμαίνεται από 36-52%. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4, η μέση η_{PTC} κατά τη διάρκεια της μεθόδου παραγωγής και αποθήκευσης είναι ίση με 44%. Ο παραγόμενος ατμός κατά την ημέρα εξέτασης υπολογίστηκε στα 940 L, όπου υπολογίζεται μετρώντας την ποσότητα του νερού που συμπληρώνεται στον ατμολέβητα. Για τη συγκεκριμένη ημέρα, χρησιμοποιώντας την Εξ. (3) η Q_{st} υπολογίζεται στα 601 MJ. Η συνολική αποθηκευμένη ενέργεια Q_{CTES} από τις 3 μέχρι και τις 6:30 το απόγευμα, υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την Εξ. (5) και ισούται με 77.5 kWh_{th}.

$$\eta_{PTC} = \frac{P_{PTC}}{DNI \times N \times L \times w} \quad (4)$$

$$Q_{CTES} = \sum \dot{m}_{HTF} \times c_{p,HTF} \times (T_{CTES,av,j+1} - T_{CTES,av,j}) \quad (5)$$

Όπου N είναι ο αριθμός των συλλεκτών και L,w το μήκος και το πλάτος κάθε συλλέκτη αντίστοιχα (m). Το $T_{CTES,av,j}$ είναι η μέση θερμοκρασία από τα 24 θερμοστοιχεία που είναι εγκατεστημένα σε διάφορα ύψη στις μονάδες αποθήκευσης οποιαδήποτε χρονική στιγμή j, και $T_{CTES,av,j+1}$ είναι η μέση θερμοκρασία από τα 24 θερμοστοιχεία σε διάφορα ύψη στις μονάδες αποθήκευσης μετά από χρονικό διάστημα ενός λεπτού.

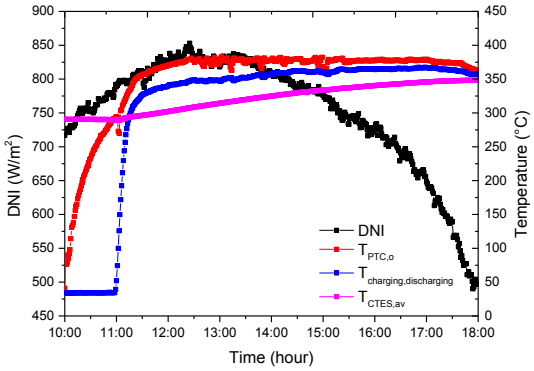


Εικόνα 4: Μεταβολή της ισχύς των συλλεκτών, της μονάδας αποθήκευσης, της παραγωγής ατμού και η απόδοση του συστήματος σε σχέση με το χρόνο κατά τη Στρατηγική 1.

Στην Εικόνα 5 φαίνεται το DNI, η $T_{PTC,o}$, η $T_{charging,discharging}$ και η $T_{CTES,av}$ όσον αφορά την υπο εξέταση ημέρα λειτουργίας στην Στρατηγική 2.

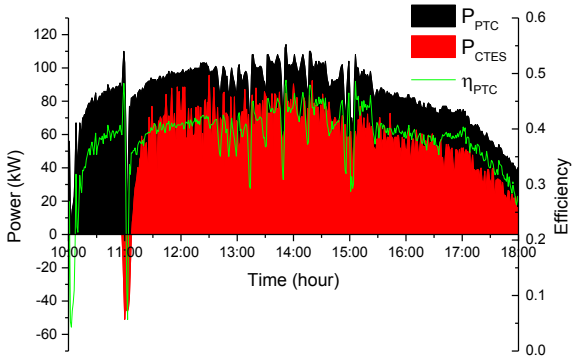
Όπως φαίνεται, η προθέρμανση του ρευστού γίνεται από τις 10 μέχρι και τις 11 το πρωί με μέση απευθείας ηλιακή ακτινοβολία στα 755 W/m^2 με τη $T_{PTC,o}$ να αυξάνεται από τους 41 °C μέχρι τους 296 °C. Όταν η $T_{PTC,o}$ γίνει ίση με τη θερμοκρασία στο σύστημα αποθήκευσης (296 °C) η διαδικασία φόρτισης ενεργοποιείται μέχρι και τη δύση του ήλιου. Η $T_{CTES,av}$ αυξήθηκε

από τους 296 °C στους 348 °C κατά τη διάρκεια της συγκεκριμένης ημέρας με μέση απευθείας ηλιακή ακτινοβολία στα 753 W/m^2.



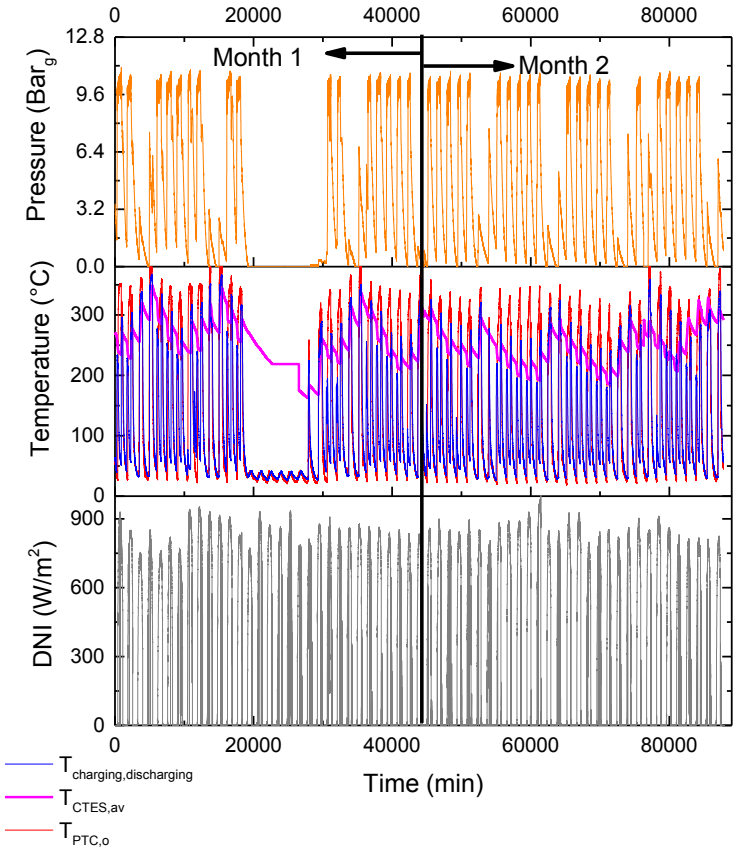
Εικόνα 5: Μεταβολή της θερμοκρασίας του ρευστού, της απευθείας ηλιακής ακτινοβολίας, της πίεσης στον ατμολέβητα σε σχέση με το χρόνο κατά τη Στρατηγική 2.

Στην Εικόνα 6 απεικονίζεται η P_{PTC}, η P_{CTES} και η η_{PTC}. Όπως παρατηρείται από της 11 το πρωί και για 10 λεπτά, η P_{CTES} είναι αρνητική, με αυτό να συμβαίνει επειδή το ρευστό μεταφοράς που βρίσκεται στη σωλήνα μεταξύ του συστήματος αποθήκευσης και της βαλβίδας 5 είναι σε επαφή με το περιβάλλον (παρόλη τη θερμομόνωση). Συνεπώς, χρειάστηκε το χρονικό διάστημα των 10 λεπτών να αυξηθεί η θερμοκρασία του ρευστού και να ομογενοποιηθεί με τη θερμοκρασία του ρευστού στο όλο σύστημα. Η συνολική Q_{CTES} στις 7 ώρες λειτουργίας της Στρατηγικής 2 είναι 107.3 kWh_{th}, και υπολογίζεται με βάση την Εξ. (5). Η η_{PTC} κυμάνθηκε από το 35 % μέχρι και το 48 % (Εικόνα 6) με τη μέση η_{PTC} κατά τη διάρκεια της ημέρας να υπολογίζεται στα 39%.



Εικόνα 6: Μεταβολή της ισχύς των συλλεκτών, της μονάδας αποθήκευσης, της παραγωγής ατμού και η απόδοση του συστήματος σε σχέση με το χρόνο κατά τη Στρατηγική 2.

Το σύστημα έχει εξεταστεί και σε μεγαλύτερη διάρκεια για δύο συνεχόμενους μήνες, τον Αύγουστο και Σεπτέμβριο του 2019. Τα δεδομένα που καταγράφηκαν κατά την περίοδο αυτή παρουσιάζονται στην Εικόνα 7 με το σύστημα λειτουργεί σε $T_{PTC,o}$ ίση με 350 °C. Κατά τις καθημερινές, μετά τις 3 το απόγευμα, το σύστημα στρέφεται σε λειτουργία φόρτισης του συστήματος αποθήκευσης, ενέργεια που χρησιμοποιείται τις πρωινές ώρες ώστε να μην επηρεάζεται η παραγωγή ατμού. Κατά το μήνα Αύγουστο (Μήνας 1) υπάρχει ένα κενό στην παραγωγή λόγω των καλοκαιρινών διακοπών της βιομηχανίας. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, το ηλιακό σύστημα διέκοψε τη λειτουργία του με τους παραβολικούς συλλέκτες να τοποθετούνται σε τέτοια θέση ώστε να μην λαμβάνουν ηλιακή ακτινοβολία. Η παραγωγή ατμού τους δύο μήνες λειτουργίας ήταν 36 τόνοι, που αντιστοιχεί σε 23.02 GJ.



Εικόνα 7: Μεταβολή της θερμοκρασίας του ρευστού, της απευθείας ηλιακής ακτινοβολίας, της πίεσης του ατμού σε σχέση με το χρόνο για δύο συνεχόμενους μήνες λειτουργίας.

Οικονομική ανάλυση του συστήματος αποδεικνύει απόσβεση επένδυσης στα 4 χρόνια. Το κόστος παραγωγής ατμού με συμβατικό λέβητα κυμαίνεται στα 50 EUR/ton (σε κόστος καυσίμου 7 EUR/ton) σε σύγκριση με το κόστος παραγωγής από το σύστημα που κυμαίνεται στα 10 EUR/ton. Τέλος, λαμβάνοντας υπόψη τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, ένα σημαντικό ποσό από εκπομπές μπορεί να εξοικονομηθεί αξιοποιώντας ένα τέτοιο σύστημα.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η μελέτη αυτή παρουσιάζει την ανάλυση της απόκρισης του πρώτου συστήματος παραβολικού συλλέκτη που έχει εγκατασταθεί στην Κύπρο για παραγωγή θερμότητας σε βιομηχανία. Οι στρατηγικές και μέθοδοι λειτουργίας εξηγούνται και πραγματικά μετρήσιμα δεδομένα έχουν αξιοποιηθεί για την ανάλυση της συμπεριφοράς του συστήματος, όχι μόνο σε μεμονωμένες ημέρες αλλά και για μεγαλύτερη χρονική περίοδο 2 μηνών.

Πιο συγκεκριμένα, τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι:

1. Κατά τη Στρατηγική 1, με μέση ηλιακή ακτινοβολία τα 757 W/m^2, η αποθηκευμένη ενέργεια είναι 77.5 kWh$_{th}$ σε 3.5 ώρες ενώ το σύστημα παραβολικού συλλέκτη παρήγαγε 940 λίτρα ατμού εξυπηρετώντας θερμικές ανάγκες της βιομηχανίας, που αντιστοιχεί σε 601 MJ.

2. Όταν το σύστημα λειτουργήσει κατά τη Στρατηγική 1, από τις 5 μέχρι και τις 8 το πρωί ο ατμός παράχθηκε από την αποθηκευμένη ενέργεια και από τις 8 μέχρι και τις 3 το απόγευμα εξαιτίας των παραβολικών συλλεκτών.
3. Κατά τη Στρατηγική 1 τις πρωινές ώρες όπου η ηλιακή ακτινοβολία είναι μηδέν, το σύστημα είναι στη μέθοδο 'TES Cold-Start Mode' και το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας ανέβασε τη θερμοκρασία του ρευστού στους 236 °C.
4. Κατά τη Στρατηγική 2, με μέση απευθείας ηλιακή ακτινοβολία τα 753 W/m^2, η θερμοκρασία του συστήματος αποθήκευσης θερμότητας αυξήθηκε από τους 290 °C στους 348 °C, ομογενοποιήθηκε σε 10 λεπτά με η συνολική θερμική ενέργεια που αποθηκεύτηκε σε 7 ώρες λειτουργίας να είναι 107.3 kWh$_{th}$.
5. Η στιγμιαία απόδοση του παραβολικού συλλέκτη κυμάνθηκε από τα 35%-48% με τη μέση απόδοση να υπολογίστηκε στα 39%.
6. Το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας ενεργοποιείται από Δευτέρα μέχρι Παρασκευή μετά τις 3 το απόγευμα ώστε να μπορεί να ακολουθείται η ανάγκη σε ατμό τις πρωινές ώρες όπου η ηλιακή ακτινοβολία είναι χαμηλή ή ανύπαρκτη.
7. Για περίοδο λειτουργίας 2 μηνών η συνολική παραγωγή ατμού ήταν 36 τόνους (23 GJ).

Συγκεντρώνοντας τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι το σύστημα ανταποκρίνεται σε πολύ καλό βαθμό στις στρατηγικές και μεθόδους λειτουργίας παρέχοντας ατμό στη ζητούμενη πίεση και θερμοκρασία από τη βιομηχανία υποβοηθούμενο και από το σύστημα αποθήκευσης. Πιστεύεται ότι το σύστημα έχει εξαιρετική προοπτική για χώρες με καλή ηλιακή ακτινοβολία και είναι ικανό να παρέχει συνεχή θερμική ενέργεια στις ζητούμενες από τη βιομηχανία συνθήκες.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η έρευνα υποστηρίζεται από το Ευρωπαϊκό πρόγραμμα 'Evaluation of the Dispatchability of a Parabolic Trough Collector System with Concrete Storage' με ακρωνύμιο 'EDITOR' για τεχνολογική ανάπτυξη και καινοτομία 2009-2010, KOINA/SOLAR-ERA.NET/0114, το οποίο και συγχρηματοδοτείται από το European Development Fund, και το Ίδρυμά Προώθησης Έρευνας στην Κύπρο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Á. Guerrero-Quijano, A. Fernández-García, M. Pérez, E. Zarza, and L. Valenzuela, "MODELLING OF A SMALL-SIZED PARABOLIC-TROUGH SOLAR COLLECTOR FIELD FOR PROCESS HEAT IN THE CORK INDUSTRY," 2011.

[2] IEA, "SHC Task 49," *Iea Shc*, 2016. [Online]. Available: http://task49.iea-shc.org/. [Accessed: 18-Dec-2019].

[3] "Solar Thermal Plants Database | Solar Heat for Industrial Processes (SHIP) Plants Database." [Online]. Available: http://ship-plants.info/solar-thermal-plants?collector_type=5. [Accessed: 19-Jul-2019].

[4] "Solar Energy in Oman - Miraah | GlassPoint Solar." [Online]. Available: https://www.glasspoint.com/miraah/. [Accessed: 07-Jan-2020].

[5] A. Thomas, "OPERATION AND PERFORMANCE OF THE SOLAR STEAM GENERATION SYSTEM INSTALLED AT THE GOVERNMENT SILK FACTORY, MYSORE," *Energy Convers. Mgmt*, vol. 33, no. 3, pp. 191–196, 1992.

[6] M. Cotrado, A. Dalibard, R. Söll, and D. Pietruschka, "Design, control and first monitoring data of a large scale solar plant at the meat factory Berger, Austria," *Energy Procedia*, vol. 48, pp. 1144–1151, 2014.

[7] D. F. Brink and S. B. Youngblood, "Operation and Performance of the Solar Steam System at the Johnson & Johnson Plant in Sherman, Texas." 2010.

[8] S. Minder, “Example of concentrated solar systems (PTC) in the dairy industry in Switzerland,” 2012.

[9] M. H. Rittmann-Frank, J. Möllenkamp, M. Caflisch, and A. Häberle, “Evaluation of solar process heat systems in Switzerland,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 2033, no. November, 2018.

[10] A. M. Abdel-Dayem, “Numerical-simulation and experimental- validation of the largest Egyptian solar process-heat system.” RENEWABLE AND SUSTAINABLE ENERGY, 2011.

[11] K. M. Powell and T. F. Edgar, “Modeling and control of a solar thermal power plant with thermal energy storage,” *Chem. Eng. Sci.*, vol. 71, pp. 138–145, Mar. 2012.

[12] G. Kumaresan, R. Sridhar, and R. Velraj, “Performance studies of a solar parabolic trough collector with a thermal energy storage system,” *Energy*, vol. 47, pp. 395–402, 2012.

[13] D. Laing, D. Lehmann, and C. Bahl, “Concrete Storage for Solar Thermal Power Plants and Industrial Process Heat,” *Conference Proceedings*. 2008.

[14] M. Martins, U. Villalobos, T. Delclos, P. Armstrong, P. G. Bergan, and N. Calvet, “New Concentrating Solar Power Facility for Testing High Temperature Concrete Thermal Energy Storage,” *Energy Procedia*, vol. 75, pp. 2144–2149, Aug. 2015.

[15] European Commission, “2030 Climate &Amp; Energy Framework,” *European Commission*, 2019. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_en. [Accessed: 16-Jan-2020].

[16] “EDITOR,” 2019. [Online]. Available: https://www.fh-aachen.de/forschung/solar-institut-juelich/schwerpunkte/editor/. [Accessed: 03-Mar-2020].

[17] “Solar Thermal Energy – Protarget AG,” 2020. [Online]. Available: https://protarget-ag.com/en/solar-thermal-energy/. [Accessed: 03-Mar-2020].

[18] “CADE Engineered Technologies - CADE Soluciones de Ingeniería,” 2020. [Online]. Available: https://cadeengineering.com/. [Accessed: 03-Mar-2020].

[19] “Homepage - DLR Portal,” 2020. [Online]. Available: https://www.dlr.de/EN/Home/home_node.html. [Accessed: 03-Mar-2020].

[20] “Condor - Operation and Maintenance Equipments - Portable ...,” 2019. [Online]. Available: https://www.energy-xprt.com/products/condor-portable-reflectometer-530335. [Accessed: 26-Mar-2020].

ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ ΜΕ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Σ. Χ. Αλεξόπουλος[1], Σ. Καλογήρου[2]

[1] Aachen University of Applied Sciences,
Solar-Institut Jülich (SIJ), Heinrich-Mußmann-Str. 5, D-52428 Jülich,
e-mail: alexopoulos@sij.fh-aachen.de

[2] Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών και Επιστήμης και Μηχανικής Υλικών
Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου, Λεμεσός, Κύπρος
Ιδρυτικό Μέλος της Κυπριακής Ακαδημίας Επιστημών, Γραμμάτων και Τεχνών
e–mail: soteris.kalogirou@cut.ac.cy

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην Κύπρο δημιουργήθηκε στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος "Editor" ένα πρωτοποριακό σύστημα παραβολικού ηλιακού συλλέκτη με αποθήκευση θερμότητας. Η εγκατάσταση είναι στη βιομηχανία της ΚΕΑΝ, τη μεγαλύτερη βιομηχανία χυμών στην Κύπρο και ως σύστημα αποθήκευσης θερμότητας χρησιμοποιείτε μπετόν.

Ο σκοπός του συστήματος αποθήκευσης θερμότητας σε μπετόν είναι να εξασφαλίζει την παροχή ποσότητας ατμού στη βιομηχανία καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, χωρίς αυτό να επηρεάζεται από περιόδους χαμηλής ηλιοφάνειας. Ανάλογα με την εποχιακά μεταβαλλόμενη ικανότητα του εργοστασίου για παραγωγή χυμών, το ηλιακό σύστημα είναι πιλοτικού μεγέθους και παρέχει μεταξύ 5 και 25% της συνολικής ζήτησης ατμού.

Στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος "Editor" αναπτύχθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν μοντέλα προσομοίωσης της εγκατάστασης στην Κύπρο. Το μοντέλο προσομοίωσης του Solar-Institut Jülich παρουσιάζει απόκλιση μεταξύ της μετρηθείσας και της προσομοιωμένης θερμοκρασίας λαδιού στην έξοδο του ηλιακού συλλέκτη μόνο λίγων βαθμών Κελσίου. Με αυτό το μοντέλο είναι δυνατός ο ενεργειακός υπολογισμός της εγκατάστασης για διαφορετικές λειτουργικές συμπεριφορές.

Λέξεις Κλειδιά: ηλιακή ενέργεια, παραβολικός ηλιακός συλλέκτης, προσομοίωση, αποθηκευτής θερμότητας

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η τρέχουσα αγορά ηλιακών συλλεκτών για εφαρμογές θερμότητας κυριαρχείται από συστήματα με μέγιστες θερμοκρασίες λειτουργίας περίπου 250°C [1]. Ενώ αυτοί οι συλλέκτες είναι ικανοί να παράγουν αποτελεσματικά ατμό, λίγοι από αυτούς είναι εξοπλισμένοι με συστήματα αποθήκευσης. Οι μεγαλύτεροι ηλιακοί συλλέκτες για την παροχή ενέργειας σε συστήματα παραγωγής ενέργειας είναι εξοπλισμένοι με πολύπλοκα συστήματα αποθήκευσης λιωμένου αλατιού και μπορούν να λειτουργήσουν σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Για αυτό, ωστόσο, τα θερμικά λάδια χρησιμοποιούνται συχνά ως μέσο μεταφοράς θερμότητας, αυτά ταξινομούνται ως τοξικά και επιβλαβή.

Στην Κύπρο δημιουργήθηκε στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος "Editor" ένα πρωτοποριακό σύστημα παραβολικού ηλιακού συλλέκτη με αποθήκευση θερμότητας.

Η εν λόγω πρωτοποριακή εγκατάσταση έγινε στο εργοστάσιο παραγωγής χυμών και ποτών της ΚΕΑΝ στη Λεμεσό και η σημασία της είναι υψίστης σημασίας για την Κύπρο για τους εξής λόγους:

- Η παραγωγή ενέργειας στην Κύπρο βασίζεται εξ ολοκλήρου σε εισαγόμενα καύσιμα υψηλού κόστους,
- Η βιομηχανία είναι ο δεύτερος πιο ενεργοβόρος τομέας στην Κύπρο μετά από τον τομέα των μεταφορών,
- Η βιομηχανία έχει τη δεύτερη μεγαλύτερη εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα από τη χρήση συμβατικών καυσίμων για την παραγωγή ενέργειας,
- Η Κύπρος διαθέτει υψηλή ηλιακή ακτινοβολία πέραν των 800 W/m² πάνω από 300 μέρες τον χρόνο, γεγονός που την καθιστά ιδανική χώρα για χρήση ηλιακών συστημάτων για παραγωγή θερμότητας,
- Η ευρωπαϊκή ένωση έθεσε στόχους για αύξηση της χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, μείωσης χρήσης ενέργειας γενικά και ελαχιστοποίηση των ρυπογόνων ουσιών από την καύση συμβατικών καυσίμων για όλες τις χώρες μέλη της,
- Σημαντική συμβολή και σημαντικό μήνυμα για αύξηση της χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας από την Κύπρο, που απέχει ακόμη από τους στόχους της ευρωπαϊκής ένωσης.

2. ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΤΗΝ ΚΥΠΡΟ

Ο στόχος του ερευνητικού προγράμματος EDITOR είναι να αποδείξει και να επαληθεύσει την ικανότητα κάλυψης του βασικού φορτίου και την απόδοση ενός ηλιακού θερμικού συστήματος που έχει σχεδιαστεί για συνεχή λειτουργία. Κατά τη διάρκεια της περιόδου ανάπτυξης του έργου, κατασκευάστηκε στην Κύπρο ένα σύστημα που αποτελείται από μεσαίου μεγέθους παραβολικό συλλέκτη, αποθήκευση θερμότητας σκυροδέματος και λέβητα.

Ως ο ιδανικός συνεργάτης βρέθηκε η ΚΕΑΝ, η μεγαλύτερη βιομηχανία χυμών στην Κύπρο ως καταναλωτής θερμότητας. Αυτό ενισχύεται και λόγω των εξαιρετικών κλιματολογικών συνθηκών που επικρατούν στην Κύπρο, αλλά και λόγω του γεγονότος ότι η ΚΕΑΝ βασίζεται σε καινοτόμες και βιώσιμες μεθόδους παραγωγής.

Οι διαδικασίες που απαιτούν θερμότητα στην ΚΕΑΝ είναι ο καθαρισμός/ απολύμανση των μπουκαλιών και των εξαρτημάτων των μηχανημάτων, η παστερίωση και η αποστείρωση. Πρέπει να σημειωθεί ότι το μέγεθος του ηλιακού συστήματος είναι ένα μόνο ποσοστό της πραγματικής ζήτησης θερμότητας που απαιτείται από τη βιομηχανία. Ο εγκατεστημένος παραβολικός συλλέκτης είναι ένα πιλοτικό σύστημα που αναπτύχθηκε με πρωταρχικό στόχο να αποδείξει ότι αυτή η τεχνολογία είναι εφικτή για τις κυπριακές βιομηχανίες [2].

Ο παραβολικός συλλέκτης θερμαίνει ένα νέο, φιλικό προς το περιβάλλον θερμικό λάδι σε πάνω από 400°C. Το σύστημα στην ΚΕΑΝ διακρίνεται στην Εικόνα 1 και αποτελείται από δύο σειρές παραβολικούς συλλέκτες με συνολική επιφάνεια 288 m^2, λέβητα παραγωγής ατμού και σύστημα αποθήκευσης θερμότητας σε μπετόν.

Εικόνα 1: Εγκατάσταση παραβολικών συλλεκτών στην ΚΕΑΝ στην Κύπρο, Πηγή: protarget.gmbH

Ένα καινοτόμο νέο σύστημα αποθήκευσης θερμότητας σκυροδέματος αποθηκεύει θερμότητα έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή κορεσμένου ατμού όταν δεν υπάρχει (επαρκής) άμεση ηλιακή ακτινοβολία. Ο σκοπός του συστήματος αποθήκευσης θερμότητας σε μπετόν είναι να εξασφαλίζει την παροχή ποσότητας ατμού στη βιομηχανία καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, χωρίς αυτό να επηρεάζεται από περιόδους χαμηλής ηλιοφάνειας.

Ο αποθηκευτής της θερμότητας συνδυάζει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα: υψηλή σταθερότητα θερμοκρασίας, χαμηλό κόστος, εύκολο χειρισμό, χαμηλό κόστος συντήρησης και υψηλή ενεργειακή πυκνότητα [3].

Στον ηλιακό συλλέκτη χρησιμοποιείται επίσης ένας νέος τύπος αποδέκτη κενού. Το σύστημα παράγει κορεσμένο ατμό που τροφοδοτείται σε σύστημα ατμού του κατασκευαστή ποτών. Στόχος του συστήματος είναι η παραγωγή υπέρθερμου ατμού θερμοκρασίας 190°C για κάλυψη των αναγκών της βιομηχανίας με απώτερο σκοπό την μείωση παραγωγής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα με επιβλαβές ρυπογόνες ουσίες προς το περιβάλλον και έπειτα την μείωση κόστους των βιομηχανιών για την αγορά αυτών των καυσίμων [4].

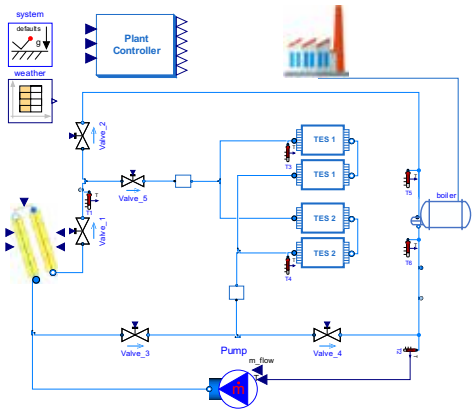
Ανάλογα με την εποχιακά μεταβαλλόμενη ικανότητα του εργοστασίου για παραγωγή χυμών, το ηλιακό σύστημα παρέχει μεταξύ 5 και 25% της συνολικής ζήτησης ατμού. Συγκεκριμένα το σύστημα σχεδιάστηκε και εγκαταστάθηκε με απώτερο σκοπό τη μείωση κατά 10% της παραγωγής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα για πιλοτικούς σκοπούς [5].

3. ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Το μοντέλο προσομοίωσης αναπτύχθηκε χρησιμοποιώντας τη γλώσσα Modelica® [6].

Το συνολικό μοντέλο του συστήματος της εγκατάστασης, που φαίνεται στην Εικόνα 2, αποτελείται από τη συστοιχία παραβολικών ηλιακών συλλεκτών, τον λέβητα, τον αποθηκευτή, έναν υπεύθυνο ελεγκτή εγκατάστασης, διάφορα βοηθητικά εξαρτήματα όπως οι βαλβίδες V1 έως V5 καθώς και εισόδους δεδομένων που εξαρτώνται από το χρόνο, όπως δεδομένα καιρού.

Οι εξισώσεις του συνολικού μοντέλου προσομοίωσης παρουσιάζονται λεπτομερώς στο [7].



Εικόνα 2: Συνολικό μοντέλο προσομοίωσης του συστήματος της εγκατάστασης με Modelica

Το μοντέλο προσομοίωσης χρησιμοποιεί διάφορα δεδομένα της εγκατάστασης ως εισόδους τιμών, όπως την ανακλαστικότητα των καθρεφτών και δεδομένα καιρού από επιτόπιες μετρήσεις [7] στο μετερεωλογικό σταθμό, ο οποίος έχει τοποθετηθεί δίπλα στη μονάδα.

Το μοντέλο του παραβολικού συλλέκτη σκάφης είναι πολύ λεπτομερές προκειμένου να επιτευχθεί η υψηλότερη δυνατή ακρίβεια, διατηρώντας παράλληλα μια αποδεκτή ταχύτητα προσομοίωσης. Για την μαθηματική περιγραφή του παραβολικού συλλέκτη, ήταν απαραίτητο να καθοριστούν τρία όρια και συνεπώς τρία παροδικά ενεργειακά ισοζύγια.

Η θερμική αποθήκευση είναι επενδυμένη με μονωτικό υλικό. Οι απώλειες μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του σκυροδέματος και του περιβάλλοντος λογιστικοποιούνται και μοντελοποιούνται όσο το δυνατόν ακριβέστερα.

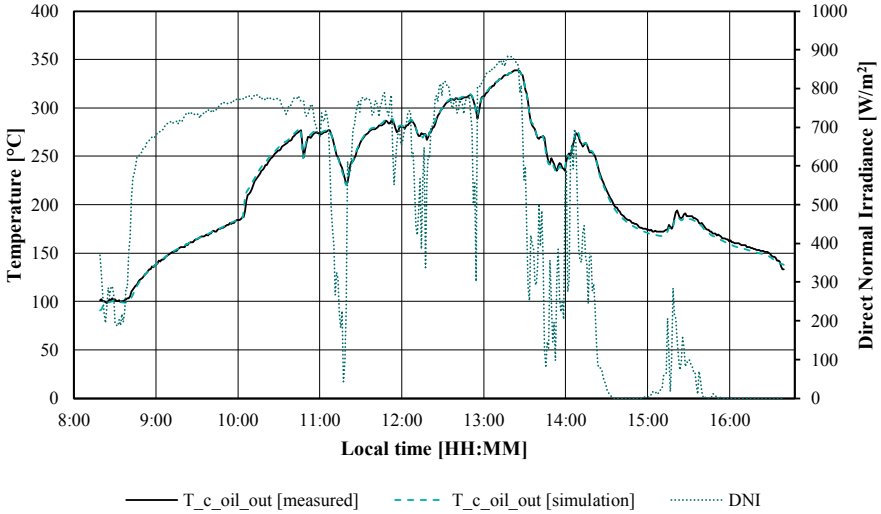
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Το SIJ δημιούργησε ένα δυναμικό μοντέλο προσομοίωσης του αποθηκευτή χρησιμοποιώντας τη γλώσσα προγραμματισμού Modelica, το επικύρωσε και πραγματοποίησε διάφορες προσομοιώσεις του αποθηκευτή θερμότητας σε συνδυασμό με το παραβολικό συλλέκτη [3].

Για να αποδειχθεί η ποιότητα του μοντέλου προσομοίωσης, πραγματοποιήθηκε μια προσομοίωση μιας ολόκληρης ημέρας με κυμαινόμενη απευθείας ηλιακή ακτινοβολία (DNI) τον Μάρτιο του 2019 και συγκρίθηκε με τα δεδομένα μέτρησης. Τα δεδομένα καιρού, η θερμοκρασία λαδιού στην είσοδο του συλλέκτη, η ροή μάζας θερμικού λαδιού και τα δεδομένα ανακλαστικότητας καθρεφτών χρησιμοποιήθηκαν ως είσοδοι [8].

Για την αξιολόγηση του συστήματος της συνολικής εγκατάστασης, χρησιμοποιήθηκαν διάφοροι αισθητήρες για τη μέτρηση μεγάλου αριθμού παραμέτρων όπως για παράδειγμα η θερμοκρασία του μέσου μεταφοράς της θερμότητας στην έξοδο του συλλέκτη και η θερμοκρασία στον αποθηκευτή [2]. Πολλές από αυτές τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν για την σύγκριση του δυναμικού μοντέλου με πραγματικές τιμές λειτουργίας της εγκατάστασης.

Η θερμοκρασία λαδιού στην έξοδο συλλέκτη υπολογίστηκε και συγκρίθηκε με τη μετρούμενη θερμοκρασία λαδιού [8]. Η Εικόνα 3 δείχνει ότι η προσομοιωμένη θερμοκρασία λαδιού εξόδου "T_c_oil, out [simulation]" και η μετρούμενη θερμοκρασία λαδιού εξόδου "T_c_oil, out [measured]" αντιστοιχούν με ακρίβεια και αποκλίνουν μόνο κατά 1,5 K.



Εικόνα 3: Σύγκριση μετρημένων έναντι προσομοιωμένων θερμοκρασιών λαδιού στην έξοδο του ηλιακού παραβολικού συλλέκτη

Το μοντέλο προσομοίωσης του Solar-Institut Jülich παρουσιάζει απόκλιση μεταξύ της μετρηθείσας και της προσομοιωμένης θερμοκρασίας λαδιού στην έξοδο του ηλιακού συλλέκτη μόνο λίγων βαθμών Κελσίου.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην Κύπρο δημιουργήθηκε στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος "Editor" ένα πρωτοποριακό σύστημα παραβολικού ηλιακού συλλέκτη με αποθήκευση θερμότητας. Η εγκατάσταση έγινε στη βιομηχανία της ΚΕΑΝ, τη μεγαλύτερη βιομηχανία χυμών στην Κύπρο και ως σύστημα αποθήκευσης θερμότητας χρησιμοποιείτε μπετόν.

Στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος "Editor" αναπτύχθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν μοντέλα προσομοίωσης της εγκατάστασης στην Κύπρο. Το μοντέλο προσομοίωσης του Solar-Institut Jülich παρουσιάζει απόκλιση μεταξύ της μετρηθείσας και της προσομοιωμένης θερμοκρασίας λαδιού στην έξοδο του ηλιακού συλλέκτη μόνο λίγων βαθμών Κελσίου. Με αυτό το μοντέλο είναι δυνατός ο ενεργειακός υπολογισμός της εγκατάστασης για διαφορετικές λειτουργικές συμπεριφορές.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς θα ήθελαν να εκφράσουν την ειλικρινή τους ευγνωμοσύνη για τα δημόσια κονδύλια που είχαν λάβει μέχρι σήμερα για την εκτέλεση του έργου βιομηχανικής έρευνας Research Promotion Foundation (RPF) από την Κύπρο, the Ministry of Economy and Competitiveness (MINECO) της Ισπανίας, the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi) της Γερμανίας καθώς επίσης και το Ministry of Innovation, Science and Research of the German State of North Rhine-Westphalia της Γερμανίας. Επίσης και το ευρωπαϊκό δίκτυο SOLAR-ERA.NET, το οποίο υποστηρίζεται από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή στο πλαίσιο του προγράμματος έρευνας και καινοτομίας HORIZON 2020.

Οι συγγραφείς θέλουν να ευχαριστήσουν σε αυτό το σημείο τα Υπουργεία Περιβάλλοντος και Παιδείας και Έρευνας της Ομοσπονδιακής Δημοκρατίας της Γερμανίας για την χρηματοδότηση ερευνητικών προγραμμάτων του Solar-Institut Jülich καθώς και τους ερευνητές του Solar-Institut Jülich για τις εργασίες τους σε αυτόν τον τομέα των ΑΠΕ.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Project EDITOR website of Solar-Institut Jülich https://www.fh-aachen.de/en/research/solar-institute-juelich/focus-areas/editor

[2] P. K. Ktistis, R. A. Agathokleous, S. A. Kalogirou: Experimental performance of a parabolic trough collector system for an industrial process heat application Energy 215 (2021) 119288

[3] Editor Flyer Solar-Institut Jülich

[4] Παραγωγή χυμού στην Κύπρο με ηλιακή ενέργεια Δελτίο Τύπου 18/06/2019

[5] KEAN: μια επιτυχημένη βιομηχανία με κοινωνικό προφίλ https://dialogos.com.cy/kean-mia-epitychimeni-viomichania-me-koinoniko-profil/ 21.6.2020

[6] Modelica Association https://www.modelica.org/

[7] J. C. Sattler, S. Alexopoulos, R. A. C. Caminos, J. Mitchell, V. Ruiz, S. Kalogirou, P. Ktistis, C. T. Boura, U. Herrmann: Dynamic Simulation Model of a Parabolic Trough Collector System with Concrete Thermal Energy Storage for Process Steam Generation SolarPACES 2018

[8] J. C. Sattler, R. A. C. Caminos, V. Atti, N. Ürlings, S. Dutta, V. Ruiz, S. Kalogirou, P. Ktistis, R. Agathokleous, S. Alexopoulos, C. T. Boura, U. Herrmann: Dynamic Simulation Tool for a Performance Evaluation and Sensitivity Study of a Parabolic Trough Collector System with Concrete Thermal Energy Storage SolarPACES 2019

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΟΠΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ ΜΕ ΣΤΑΤΙΚΟ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΗΡΑ

Σ. Χ. Αλεξόπουλος[1]*, Ο. Παναγόπουλος[2]*, Α. Α. Αργυρίου[2]

[1]* Fachbereich Energietechnik, Aachen University of Applied Sciences, Solar-Institut Jülich (SIJ), Heinrich-Mußmann-Str. 5, D-52428 Jülich, e-mail: alexopoulos@sij.fh-aachen.de,

[2]* Εργαστήριο Φυσικής της Ατμόσφαιρας, Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Πατρών, 265 00 Πάτρα.email: orestis.panagopou@upatras.gr, athanarg@upatras.gr,

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο κτιριακός τομέας συμβάλλει σε μεγάλο βαθμό στην παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας, επηρεάζοντας αρνητικά το περιβάλλον μέσω της εκπομπής διοξειδίου του άνθρακα. Για την αντιμετώπιση αυτού του σημαντικού προβλήματος αναπτύσσονται νέες τεχνολογίες βελτίωσης της ενεργειακής συμπεριφοράς των κτιρίων, μεταξύ των οποίων συστήματα αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας. Ελάχιστα θερμικά ηλιακά συστήματα καλύπτουν εφαρμογές ενδιαμέσων ή μέσων θερμοκρασιών και όσα από αυτά είναι εμπορικά διαθέσιμα, έχουν υψηλό κόστος.

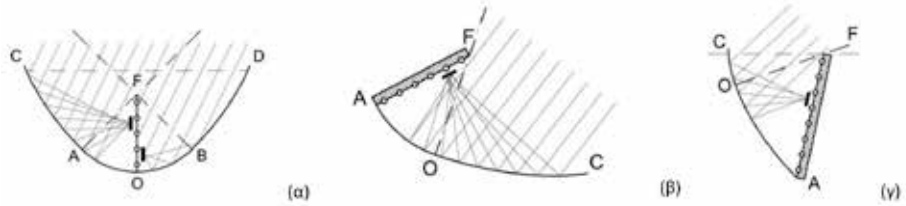
Στα πλαίσια του Ελληνο-Γερμανικού ερευνητικού προγράμματος "SCoSCo" αναπτύσσονται και μελετώνται καινοτόμα συστήματα συλλεκτών ηλιακής ακτινοβολίας. Μεταξύ αυτών μελετήθηκαν στατικοί συγκεντρωτήρες, συνδυαζόμενοι με κατάλληλους κινούμενους απορροφητές με στόχο την ανάπτυξη ενός ηλιακού θερμικού συλλέκτη χαμηλού κόστους και αποδοτικής λειτουργίας σε εφαρμογές ενδιαμέσων έως μέσων θερμοκρασιών, όπως η παροχή βιομηχανικής θερμότητας και η ενσωμάτωση σε κτίρια. Σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας, είναι η παρουσίαση των αποτελεσμάτων της οπτικής προσομοίωσης τέτοιων συστημάτων. Για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικά λογισμικά και έγιναν συγκρίσεις των αποτελεσμάτων.

Λέξεις Κλειδιά: *ηλιακή ενέργεια, ηλιακός συλλέκτης, προσομοίωση, κάτοπτρα, στατικός συγκεντρωτήρας*

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην Ελλάδα ένας σημαντικός τομέας αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας είναι όπως αναφέρεται και στο [1] η απευθείας μετατροπή της σε θερμότητα. Η θερμική μετατροπή πραγματοποιείται μέσω ηλιακών διατάξεων, οι οποίες καλύπτουν μεγάλο μέρος των αναγκών για θέρμανση νερού, θέρμανση και ψύξη χώρων και στην βιομηχανία. Τέτοια, ιδιαίτερα όταν απαιτούνται υψηλότερες θερμοκρασίες, είναι τα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα παραγωγής θερμότητας.

Τα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα αποτελούνται από το συγκεντρωτήρα και τον απορροφητή. Για λόγο συγκέντρωσης μεγαλύτερο του 2,5, απαιτείται παρακολούθηση του ήλιου. Η μέση ροή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας για δεδομένη γωνία πρόσπτωσης ισούται με το γινόμενο του γεωμετρικού λόγου συγκέντρωσης επί την οπτική απόδοση. Όμως, η κατανομή της ροής της ηλιακής ακτινοβολίας στον απορροφητή δεν είναι ομοιόμορφη. Ανάλογα με τη γεωμετρία του συγκεντρωτήρα, το σχήμα του απορροφητή και την γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας, υπάρχουν περιοχές του απορροφητή που δεν δέχονται ακτινοβολία, ενώ άλλες δέχονται μεγαλύτερη ροή ενέργειας από το άνοιγμα του συγκεντρωτήρα. Οπτικές προσομοιώσεις και πειραματικές μετρήσεις έχουν δείξει ότι κάποιες περιοχές του απορροφητή δέχονται ροή ενέργειας αρκετές φορές μεγαλύτερη από αυτή στο άνοιγμα του συγκεντρωτήρα [2]. Στην Εικόνα 1 φαίνεται η άνιση κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας στον απορροφητή, καθώς και η εξάρτηση από τη γωνία πρόσπτωσης. Με τη χρήση απορροφητή με επιλεκτική επίστρωση σε σωλήνα κενού, τοποθετημένο στην κατάλληλη θέση, είναι δυνατή η αύξηση της απόδοσης σε μέσες θερμοκρασίες. Η προτεινόμενη διάταξη μπορεί να διαθέτει συμμετρικό (Εικόνα 1.α) ή μη συμμετρικό συγκεντρωτήρα (Εικόνα 1.β,γ). Ο σωλήνας κενού μπορεί να μετακινείται στις περιοχές με μεγαλύτερη συγκέντρωση ακτινοβολίας, ενώ ο συγκεντρωτήρας παραμένει ακίνητος.



Εικόνα 1: Συμμετρικό (α) και μη συμμετρικά (β), (γ) κυλινδρο-παραβολικά κάτοπτρα.

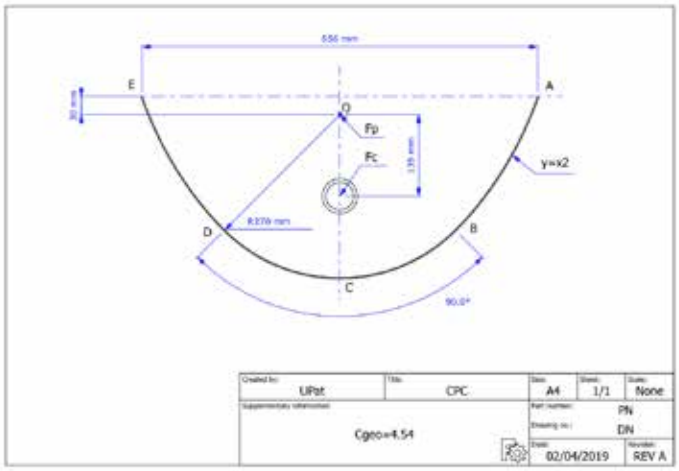
Ανάλογα με τη γεωμετρία του κατόπτρου, με το σχήμα του απορροφητή και τη γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας, περιοχές στον απορροφητή μπορούν είτε να μην έχουν προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, ενώ άλλες περιοχές μπορούν να λάβουν πολλαπλές εντάσεις ακτινοβολίας από αυτές στο άνοιγμα του συμπυκνωτή [3]. Οπτικές προσομοιώσεις και πειραματικές μετρήσεις έχουν δείξει ότι οι περιοχές στο επίπεδο του απορροφητή μπορεί να έχουν προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία με εντάσεις αρκετές φορές μεγαλύτερη από την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στο άνοιγμα του συμπυκνωτή [2] [4].

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας μελετήθηκαν αρκετές γεωμετρίες κατόπτρων ώστε να επιλεγεί η κατάλληλη. Κριτήριο για την επιλογή ήταν το κλάσμα συλλογής (intercept factor) που ορίζεται ως ο λόγος της ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας προς την απορροφώμενη για τις πιθανές γωνίες πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας [5].

Χαρακτηριστική εργασία στην οποία αναλύονται λεπτομερώς τα βήματα και η διαδικασία ανάπτυξης υπολογιστικών μοντέλων ανάλυσης πορείας ακτίνων είναι η [6].

Για τις οπτικές προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ανοικτού κώδικα “Tonatiuh” [7] και το Comsol [8]. Η γεωμετρία που έδωσε τα καλύτερα αποτελέσματα οπτικών προσομοιώσεων (SCO1) φαίνεται στην Εικόνα 2.

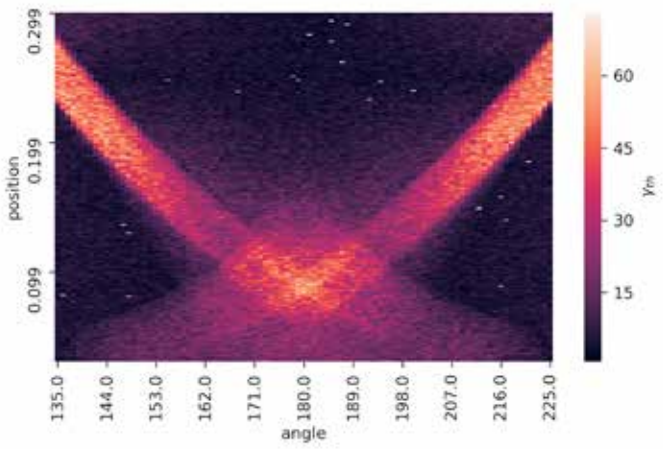


Εικόνα 2: Διάταξη SCO1.

Ο συγκεντρωτήρας αποτελείται από κυλινδρικό τομέα 90° (BD, κέντρο O) και δυο παραβολικά τμήμα (AB, ED, εστία O) στραμμένα κατά 45°. Το κέντρο του απορροφητή σωλήνα κενού βρίσκεται στο σημείο Fc.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

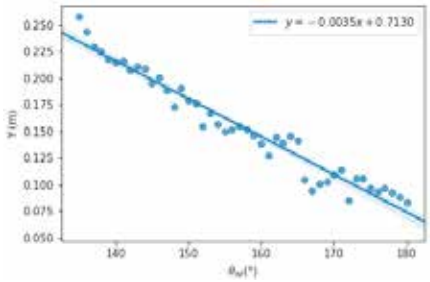
Ο απορροφητής κινείται κατά μήκος του άξονα συμμετρίας του κατόπτρου. Σε κάθε θέση του απορροφητή υπολογίζεται ο intercept factor για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης από 135°-225° με βήμα 1° και κάθετη πρόσπτωση στις 180°. Το αποτέλεσμα των προσομοιώσεων παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.



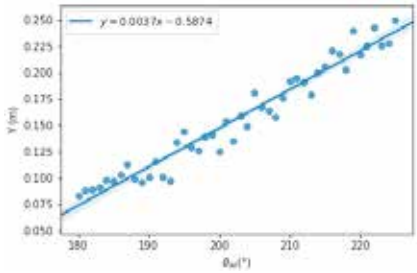
Εικόνα 3: Κλάσμα συλλογής για γραμμική τροχιά απορροφητή.

Η μέγιστη τιμή του κλάσματος συλλογής είναι περίπου 70% και παρατηρείται τόσο για κάθετη πρόσπτωση, όσο και στις ακραίες τιμές της γωνίες πρόσπτωσης.

Στη συνέχεια, επιλέγονται οι μέγιστες τιμές του κλάσματος συλλογής για κάθε θέση του απορροφητή και παρίστανται γραφικά στην Εικόνα 4 για γωνίες 135° έως 180° και στην Εικόνα 5 για γωνίες 180° έως 225°.



Εικόνα 4: Κλάσμα συλλογής – γωνία πρόσπτωσης 135° έως 180°.



Εικόνα 5: Κλάσμα συλλογής - γωνία πρόσπτωσης 180° έως 225°.

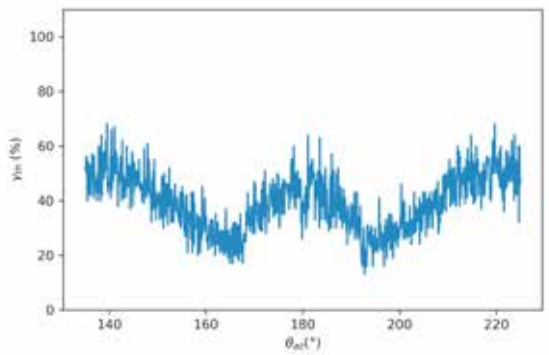
Οι εξισώσεις γραμμικής παλινδρόμησης έχουν ως εξής:

$$y = -0.0035\ (\pm 0.0001) \times x + 0.71\ (\pm 0.02),\quad 135° \le x \le 180° \quad (1)$$

$$y = 0.0037\ (\pm 0.0001) \times x - 0.59\ (\pm 0.02),\quad 180° < x \le 225° \quad (2)$$

Οι εξισώσεις (1) και (2) δίνουν τη θέση του απορροφητή κατά μήκος του άξονα συμμετρίας του κατόπτρου με σημείο αναφοράς το σημείο C στην Εικόνα 2, για μέγιστο intercept factor. Και στις δυο σχέσεις, οι τιμές της κλίσης και της τεταγμένης επί την αρχή είναι στατιστικά σημαντικές (p-value < 10^{-26}).

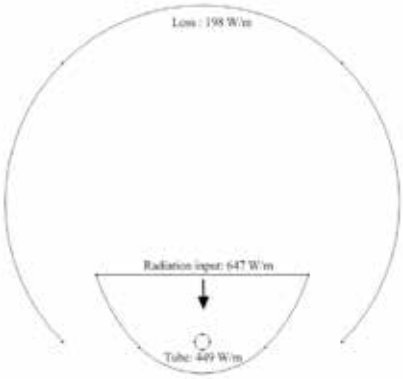
Ο απορροφητής τοποθετείται στις θέσεις που προκύπτουν από τις εξισώσεις (1) και (2) και το κλάσμα συλλογής υπολογίζεται εκ νέου για κάθε θέση.



Εικόνα 6: Κλάσμα συλλογής - γωνία πρόσπτωσης.

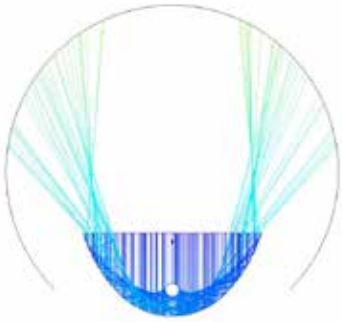
Παράλληλα με το Tonatiuh χρησιμοποιήθηκε και το Comsol.

Τα γεωμετρικά μοντέλα αποτελούνται από τέσσερις διαφορετικές γραμμές. Η πρώτη γραμμή είναι μια μικρή κλειστή κυκλική που αντιπροσωπεύει το σωλήνα. Η παραβολική σκάφη διαμορφώνεται μέσω κυκλικού τόξου και δύο παραβολικών κομματιών. Η ευθεία γραμμή αντιπροσωπεύει την πηγή ακτινοβολίας με ακτίνες κάθετες προς την κατεύθυνση της γραμμής. Εφαρμόζεται πηγή ακτινοβολίας που αντιστοιχεί σε 1000 W/m². Τέλος, δημιουργείται ένα περίβλημα με μορφή κυκλικού τόξου για να υπολογιστεί η διαφυγή της ακτινοβολίας. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για γωνία πρόσπτωσης 0° στην Εικόνα 7 και στην Εικόνα 8.



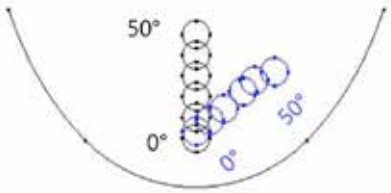
Εικόνα 7: Γεωμετρία και πρώτα αποτελέσματα.

Η συνολική προσπίπτουσα ακτινοβολία είναι 647 W/m^2 ενώ ο σωλήνας δέχεται 447 W/m^2. Η απώλεια μέσω του περιβλήματος είναι 198 W/m^2.



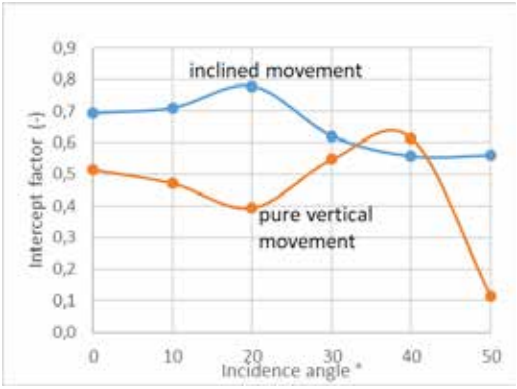
Εικόνα 8: Υπόδειγμα ακτίνων.

Στην Εικόνα 9 οι θέσεις του σωλήνα φαίνονται για τις δύο διευθετήσεις: με κεκλιμένη κίνηση (inclined movement) και με καθαρή κάθετη κίνηση (pure vertical movement) των σωλήνων. Ο κύκλος (σωλήνας) στο κάτω μέρος έχει γωνία πρόσπτωσης 0° και ο κορυφαίος κύκλος έχει γωνία πρόσπτωσης 50°.



Εικόνα 9: Διατάξεις σωλήνων με γωνία πρόσπτωσης 0° και 50°.

Η Εικόνα 10 δείχνει τα συγκριτικά αποτελέσματα του κλάσματος συλλογής για τις δύο μεθόδους μετατόπισης. Το κλάσμα συλλογής κυμαίνεται μεταξύ 56% και 78% για γωνίες πρόσπτωσης μεταξύ 0° και 50°.



Εικόνα 10: Σύγκριση του κλάσματος συλλογής για τις δύο μεθόδους μετατόπισης.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το κλάσμα συλλογής βρέθηκε να κυμαίνεται μεταξύ 56% και 78% για γωνίες πρόσπτωσης μεταξύ 0° και 50°. Η κίνηση του απορροφητή σε ευθεία γραμμή φέρνει λογικά αποτελέσματα. Το COMSOL και το Tonatiuh είναι κατάλληλα εργαλεία για συστηματικές έρευνες για την εφαρμογή που παρουσιάστηκε.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία χρηματοδοτείται από το ερευνητικό έργο “SCoSCo” της δράσης «Διμερής Ε & Τ Συνεργασία Ελλάδας – Γερμανίας». Οι συγγραφείς ευχαριστούν το Υπουργείο Παιδείας και Έρευνας της Ομοσπονδιακής Δημοκρατίας της Γερμανίας και τη Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας της Ελλάδας για την χρηματοδότησή του Ευχαριστούν επίσης τους ερευνητές του Solar-Institut Jülich και του Πανεπιστημίου Πατρών για τις εργασίες τους σε αυτόν τον τομέα των ΑΠΕ.

Η παρούσα εργασία στηρίχτηκε σε προηγούμενες μελέτες και έρευνες αείμνηστου Καθηγητή του Πανεπιστημίου Πατρών Ιωάννη Τρυπαναγνωστόπουλου. Οι συγγραφείς επιθυμούν να τονίσουν την πολύ σημαντική του συνδρομή κατά τη διαδικασία της προετοιμασίας και υποβολής της ερευνητικής πρότασης ScoSco.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Μ. Σουλιώτης, Ι Τρυπαναγνωστόπουλος: Οπτική ανάλυση ηλιακών συσκευών θέρμανσης νερού με καμπύλα κάτοπτρα και κυλινδρικούς απορροφητές Πρακτικά 8^{ο} Εθνικό Συνέδριο για τις Ήπιες Μορφές Ενέργειας σελ. 418-425 Θεσσαλονίκη 2006

[2] Y. Tripanagnostopoulos, P.Yianoulis: “CPC solar collectors with multi-channel absorber”. Solar Energy 58 (1-3), pp. 49-61, 1996.

[3] Y. Tripanagnostopoulos: New designs of building integrated solar energy systems Energy Procedia 57 (2014) 2186 – 2194

[4] Y. Tripanagnostopoulos and A. Iliopoulou. “Improved designs for low concentration photovoltaics” Int Conf. 22nd PVSEC, Milan, Italy, 3-7 Sep 2007

[5] William A. Beckman John A. Duffie. “Solar Engineering of Thermal Processes”. 4rth ed. Wiley, 2013.

[6] M. Souliotis, Y. Tripanagnostopoulos: “Study of the distribution of the absorbed solar radiation on the performance of a CPC type ICS water heater”. Renewable Energy 2008; 33: 846-858.

[7] Tonatiuh software: https://iat-cener.github.io/tonatiuh/

[8] Comsol software: https://www.comsol.com/

[9] J. Goettsche, S. Alexopoulos, A. Dümmler, G. Breitbach: The efficiency of a specular trough arrangment collecting solar radiation Comsol Conference 2020

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΗΛΙΑΚΟΥ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ ΑΣΒΕΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΓΙΑ ΘΕΡΜΟΧΗΜΙΚΗ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΣΩ ΤΟΥ ΚΥΚΛΟΥ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗΣ/ΑΣΒΕΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Στυλιανός Σπύρογλου, Αθανάσιος Σκαλτσογιάννης, Αγγελική Λεμονίδου*

Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
*e-mail: alemonidou@cheng.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η θερμοχημική αποθήκευση ενέργειας μέσω του κύκλου ενανθράκωσης/ασβεστοποίησης (CaL) έχει προταθεί για την αντιμετώπιση της εν γένει διαλείπουσας παροχής ενέργειας από τον ήλιο στα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα παραγωγής ισχύος (Concentrated Solar Power plants). Σύμφωνα με αυτή την προτεινόμενη τεχνολογία, η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται για την πραγματοποίηση της ενδόθερμης διάσπασης του ανθρακικού ασβεστίου σε έναν ηλιακό αντιδραστήρα ασβεστοποίησης, ενώ τα προϊόντα της αντίδρασης (CaO και CO_2) μπορούν να αποθηκευτούν για μεγάλες χρονικές περιόδους. Η αντίστροφη εξώθερμη αντίδραση ενανθράκωσης λαμβάνει χώρα σε ξεχωριστό αντιδραστήρα (ενανθρακωτής) εκλύοντας θερμότητα η οποία μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια. Ο ηλιακός αντιδραστήρας ασβεστοποίησης αποτελεί σημαντικό κομμάτι της διεργασίας και ο βέλτιστος σχεδιασμός του θα οδηγήσει στην μεγιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας. Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε σχεδιασμός ενός καθοδικού ηλιακού αντιδραστήρα παρασυρόμενης ροής. Η τροφοδοσία περιέχει στερεά σωματίδια ασβεστόλιθου μικρής κοκκομετρίας (<100 μm) και αέριο μίγμα CO_2/N_2 τα οποία εισέρχονται από την κορυφή του αντιδραστήρα στην ίδια θερμοκρασία και σε ατμοσφαιρική πίεση. Η αντίδραση διάσπασης πραγματοποιείται καθώς τα σωματίδια κατέρχονται εντός της κλίνης λόγω της βαρύτητας και της αλληλεπίδρασης με το φέρον αέριο. Ένα κινητικό μοντέλο δύο σταδίων σε συνδυασμό με το μοντέλο κόκκου (grain model) χρησιμοποιήθηκε για την περιγραφή της αντίδρασης ασβεστοποίησης. Αναπτύχθηκε μονοδιάστατο μοντέλο αντιδραστήρα εφαρμόζοντας διακριτοποίηση του μήκους στην αξονική διεύθυνση και θεωρώντας ομοιογενείς συνθήκες στην ακτινική. Οι παραδοχές στις οποίες στηρίχθηκε το μοντέλο ήταν η μονοδιάστατη εμβολική ροή, ομοιογενής θερμοκρασία στερεών/περιβάλλοντος αερίου σε κάθε μήκος του αντιδραστήρα και χαμηλή πυκνότητα κλίνης. Βρέθηκε ότι για την ρεαλιστική περίπτωση ατμόσφαιρας καθαρού CO_2, η θερμοκρασία του αντιδραστήρα πρέπει να διατηρείται στους 950 °C για ολοκληρωμένη μετατροπή. Η εγκυρότητα του μοντέλου ελέγχθηκε επιτυχώς χρησιμοποιώντας βιβλιογραφικά πειραματικά στοιχεία από πιλοτικό αντιδραστήρα μήκους 6.5 m και εσωτερικής διαμέτρου 80 mm υπό διάφορες συνθήκες μερικής πίεσης CO_2 και θερμοκρασίας.

Λέξεις Κλειδιά: Κύκλος ενανθράκωσης/ασβεστοποίησης (CaL), διάσπαση ανθρακικού ασβεστίου, σχεδιασμός ηλιακού αντιδραστήρα, θερμοχημική αποθήκευση ενέργειας

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας που χαρακτηρίζονται από υψηλή αποτελεσματικότητα και η κατασκευή [1] τους είναι οικονομικά συμφέρουσα αποτελούν αντικείμενο έρευνας των τελευταίων ετών, καθώς ανανεώσιμες πηγές διεισδύουν όλο και περισσότερο στην παραγωγή ενέργειας [2]. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα παραγωγής ισχύος (Concentrated Solar Power Plants, CSP) τα οποία αποθηκεύουν την ηλιακή ενέργεια υπό μορφή θερμότητας η οποία εν συνεχεία αξιοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας [3]. Υλικά με υψηλή θερμοχωρητικότητα όπως τηγμένα άλατα, ορυκτέλαια και κεραμικά υλικά χρησιμοποιούνται ήδη σε τέτοιες εγκαταστάσεις, ωστόσο η αναπόφευκτη απώλεια ενέργειας δεν τα καθιστά ιδανική επιλογή για μακροχρόνια χρήση μεγάλης κλίμακας [1]. Μέσω της θερμοχημικής αποθήκευσης ενέργειας αξιοποιείται η θερμότητα προερχόμενη από την ηλιακή ακτινοβολία για την πραγματοποίηση μιας ενδόθερμης αντίδρασης, αποθηκεύοντας την ενέργεια στα προϊόντα. Όταν υπάρχει αύξηση της ζήτησης για ενέργεια, τα προϊόντα αντιδρούν μεταξύ τους σε μια εξώθερμη αντίδραση, εκλύοντας ενέργεια υπό μορφή θερμότητας, η οποία μπορεί να αξιοποιηθεί για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με συμβατικούς τρόπους [1], [2], [4]. Μεγάλο πλεονέκτημα της μεθόδου θερμοχημικής αποθήκευσης ενέργειας είναι η μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα και η δυνατότητα μακροχρόνιας αποθήκευσης, σε σύγκριση με άλλες υπάρχουσες μεθόδους [5]. Μία αρκετά υποσχόμενη διαδικασία που εμπίπτει σε αυτή την κατηγορία είναι ο κύκλος ενανθράκωσης/ασβεστοποίησης, ο οποίος βασίζεται στην διάσπαση του ανθρακικού ασβεστίου και στην αντίστροφη αντίδρασή, της ενανθράκωσης [6]:

$$CaCO_{3_{(s)}} \rightleftharpoons CaO_{(s)} + CO_{2_{(g)}} \quad \Delta H_r = 178\ kJ/mol \tag{1}$$

Η θερμοκρασία του αντιδραστήρα ασβεστοποίησης κυμαίνεται περί τους 900 °C, θερμοκρασίες εντός του θερμοκρασιακού εύρους λειτουργίας των CSP [7]. Το υλικό το οποίο έχει προταθεί και μελετηθεί για αυτή την εφαρμογή είναι ο ασβεστόλιθος (limestone), ένα υλικό που χαρακτηρίζεται από αφθονία, χαμηλό κόστος, ελάχιστη τοξικότητα και έχει ως κύριο συστατικό το ανθρακικό ασβέστιο $CaCO_3$ [8]. Εναλλακτικό υποψήφιο υλικό αποτελεί και ο δολομίτης, εξίσου φθηνό και πλούσιο σε $CaCO_3$ το οποίο διαθέτει μεγαλύτερη επιφάνεια και παρουσιάζει υψηλότερη σταθερότητα σε κύκλους ασβεστοποίησης/ενανθράκωσης σε σχέση με τον ασβεστόλιθο [6], [9].Ο στόχος αυτής της εργασίας είναι ο σχεδιασμός ενός καθοδικού ηλιακού αντιδραστήρα διάσπασης του ανθρακικού ασβεστίου προερχόμενο από ορυκτό ασβεστόλιθο για εφαρμογές αποθήκευσης ηλιακής ενέργειας. Ευρήματα όπως η κατανομή της μετατροπής, της θερμικής ροής, ο χρόνος παραμονής θα καθορίσουν τις βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας ενός πρότυπου αντιδραστήρα για χρήση μεγάλης κλίμακας.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Για την μοντελοποίηση του αντιδραστήρα εφαρμόστηκε ένα μονοδιάστατο μοντέλο εμβολικής ροής σε κυλινδρική γεωμετρία. Ο αντιδραστήρας διακριτοποιήθηκε σε ισοθερμοκρασιακά τμήματα μήκους ΔL, στα οποία γίνεται η παραδοχή ότι οι θερμοφυσικές ιδιότητες παραμένουν σταθερές. Μέσω του χρόνου παραμονής των στερεών κόκκων ανθρακικού ασβεστίου, απαλείφεται ο χρόνος από τις εξισώσεις και το μοντέλο μετατρέπεται σε ψευδομόνιμη κατάσταση. Σχετικά με την μεταφορά θερμότητας, θεωρήθηκε ομοιογενής θερμοκρασία μεταξύ του φέροντος αέριου μείγματος και των στερεών κόκκων για κάθε τμήμα μήκους ΔL του αντιδραστήρα και ο μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας συνίσταται σε μεταφορά λόγω ακτινοβολίας και μεταφορά λόγω συναγωγής. Οι προσομοιώσεις έγιναν με χρήση του προγράμματος MATLAB® της MathWorks [10].

2.1 Υπολογισμός θερμοφυσικών ιδιοτήτων

Οι θερμοφυσικές ιδιότητες του αέριου μείγματος που υπεισέρχονται στις παραμέτρους μεταφοράς θερμότητας και μάζας, υπολογίζονται για κάθε διακριτό τμήμα ξεχωριστά. Λόγω της χαμηλής πίεσης της μίας ατμόσφαιρας και των υψηλών θερμοκρασιών στην περιοχή των 780 – 950 °C, η συμπεριφορά των αερίων μπορεί να θεωρηθεί αρκετά κοντά στην ιδανική, επομένως μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς σημαντικό σφάλμα η εξίσωση των ιδανικών αερίων [11].

2.1.1 Υπολογισμός ιξώδους αερίων για χαμηλές πιέσεις

Ο υπολογισμός του ιξώδους βασίζεται κυρίως στην θεωρία Chapman – Enskog και στον νόμο των αντίστοιχων καταστάσεων. Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση των Chung et al

(1984, 1988) [12] για αέρια χαμηλής πίεσης. Το ιξώδες του καθαρού συστατικού συσχετίζεται με το ολοκλήρωμα κρούσης στην ανηγμένη θερμοκρασία, με το δυναμικό Lennard - Jones και το μοριακό βάρος του αερίου. Ο υπολογισμός γίνεται λαμβάνοντας υπόψη την πολικότητα του μορίου μέσω μιας ημι-εμπειρικής εξίσωσης. Η μέθοδος αυτή χαρακτηρίζεται από ένα σφάλμα της τάξης του 0.3% σε σύγκριση με πειραματικές τιμές για τα συστατικά ενδιαφέροντος [12].

Το ιξώδες του αέριου μείγματος υπολογίζεται με βάση αυτό των καθαρών συστατικών χρησιμοποιώντας την ημι-εμπειρική εξίσωση Wilke για δυαδικά μείγματα [13].

2.1.2 Υπολογισμός συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας αερίων για χαμηλές πιέσεις

Με παρόμοιο τρόπο όπως και στην περίπτωση του ιξώδους, μπορεί να προβλεφθεί και η θερμική αγωγιμότητα αερίων. Η συμβατική θεωρία Chapman – Enskog δεν καλύπτει πολυατομικά αέρια, διότι πρέπει να ληφθεί υπόψη η συνεισφορά των μεταγραφικών και εσωτερικών βαθμών ελευθερίας. Οι Chung et al (1984, 1988) βασίστηκαν σε αυτή την προσέγγιση και ανέπτυξαν μια εξίσωση υπολογισμού της θερμικής αγωγιμότητας, η οποία περιέχει το ιξώδες [12].

Για το αέριο μείγμα χρησιμοποιείται ένας σταθμισμένος μέσος όρος των καθαρών συστατικών ανάλογα με τα μοριακά κλάσματα [14].

2.1.3 Υπολογισμός ειδικής θερμότητας

Χρησιμοποιήθηκε μια σειρά θερμοεξαρτούμενων εξισώσεων με διαφορετικούς συντελεστές για κάθε ένωση. Για την περίπτωση των αερίων, η θερμοκρασία είναι σε μονάδες Celsius, ενώ για τα στερεά σε Kelvin [15].

2.2 Υδροδυναμική ανάλυση

Το μαθηματικό μοντέλο ροής που χρησιμοποιήθηκε είναι ένας καθοδικός αντιδραστήρας συμπαρασυρόμενης ροής με κυλινδρική γεωμετρία σε μόνιμη κατάσταση, σε διάταξη ομορροής. Στην είσοδο του αντιδραστήρα στο επάνω μέρος εισάγεται ποσότητα αντιδρώντος κονιορτοποιημένου ανθρακικού ασβεστίου μαζί με το φέρον αέριο μείγμα CO_2/N_2 σε διαφορετικές αναλογίες, τα οποία έχουν προθερμανθεί στην ίδια θερμοκρασία. Για τον υπολογισμό του χρόνου παραμονής των στερεών, θεωρείται ένα μονοδιάστατο μοντέλο εμβολικής ροής [16].

2.2.1 Υπολογισμός ταχύτητας στερεής και αέριας φάσης

Η ταχύτητα του αερίου ανά πάσα χρονική στιγμή υπολογίζεται με βάση την γραμμομοριακή ροή του και την εγκάρσια επιφάνεια ροής.

$$u_g = \frac{\dot{n}_g MW_{mix}}{\rho_{mix} 4\pi R_r^2} \tag{2}$$

Για τον υπολογισμό της ταχύτητας του στερεού λαμβάνεται υπόψη η καθοδική ροή λόγω βαρύτητας και η οριακή ταχύτητα μέσω του νόμου του Stokes.

$$u_s = u_{s,0} e^{-bt} + \left(u_g + u_t\right)\left(1 - e^{-bt}\right) \tag{3}$$

$$u_{s,0} = \frac{\dot{M}_{CaCO_3}}{\rho_s \cdot 4\pi R_r^2} \tag{4}$$

$$u_t = \frac{(\rho_s + \rho_{mix}) d_p^2 g}{18\mu_{mix}} \tag{5}$$

$$b = \frac{18\mu_{mix}}{\rho_s d_p^2} \tag{6}$$

2.2.2 Υπολογισμός χρόνου παραμονής στερεών και αερίων

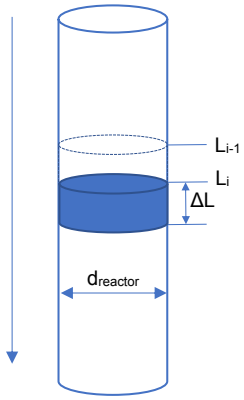
Ο χρόνος παραμονής των στερεών μπορεί να υπολογισθεί ολοκληρώνοντας την εξίσωση (23) ως προς τον χρόνο για δεδομένο μήκος [2] .

$$L = \int_0^{t_{res,s}} u_s \, dt = \frac{u_{s,0}}{b}\left(1 - e^{-bt_{res,s}}\right) + \left(u_g + u_t\right)\left(t_{res,s} - \frac{1 - e^{-bt_{res,s}}}{b}\right) \tag{7}$$

Θέτοντας μήκος ΔL στην εξίσωση (7) μπορεί να βρεθεί ο χρόνος παραμονής των στερεών σε κάθε διακριτό τμήμα του αντιδραστήρα.

Ο χρόνος παραμονής του αερίου βρίσκεται μέσω της γραμμομοριακής ροής και της γεωμετρίας της ροής

$$t_{res,g} = \frac{\rho_{mix}\pi R_r^2(\Delta L)}{\dot{n}_g \times MW_{mix}} \quad (8)$$



Σχήμα 1: Διακριτοποίηση ηλιακού αντιδραστήρα

2.3 Κινητικό μοντέλο

Χρησιμοποιήθηκε ένα κινητικό μοντέλο τύπου Langmuir – Hinshelwood δύο σταδίων [9] σε συνδυασμό το μοντέλο μεταβλητού κόκκου (changing grain model) για την περιγραφή της αντίδρασης ασβεστοποίησης [17].

$$CaCO_3 + nS \rightleftharpoons CaO^* + nS(CO_2) \quad (9)$$

$$CaO^* + nS(CO_2) \rightleftharpoons CaO + nS + CO_2 \quad (10)$$

Θεωρώντας ότι η διάσπαση του ανθρακικού ασβεστίου (εξ. (9)) είναι το καθοριστικό στάδιο, ο ρυθμός της αντίδρασης είναι:

$$r = V_{M,CaCO_3} k_{1L-H}(1-\theta)\left(1 - \frac{P_{CO_2}}{P_{eq}}\right) \quad (11)$$

$$\theta = \frac{K' P_{CO_2}}{1 + K' P_{CO_2}} \quad (12)$$

$$P_{eq} = 4.137 \times 10^9 e^{-\frac{20474}{T}} \quad (12)$$

Οι σταθερές k_{1L} και K' παρουσιάζουν θερμοκρασιακή εξάρτηση Arrhenius και οι παράμετροί τους παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 1: Σταθερές μοντέλου Langmuir – Hinshelwood για τον ρυθμό της αντίδρασης [9]

$k_{1L-H}\ (\frac{kmol}{m^2 s})$	$k_{01L}\ (\frac{kmol}{m^2 s})$	31,940
	$E_{1L}\ (\frac{kJ}{mol})$	217
$K'\ (\frac{10^{-6}}{kPa})$	$K^{0\prime}\ (\frac{10^{-6}}{kPa})$	4.52
	$\Delta H^{0\prime}\ (\frac{kJ}{mol})$	-91

Σχήμα 2: Μοντέλο μεταβλητού κόκκου (CGM) [18].

Το μοντέλο μεταβλητού κόκκου θεωρεί την ύπαρξη μη πορωδών σφαιρικών κόκκων αρχικής ακτίνας r_0. Καθώς η αντίδραση προχωράει, το προϊόν CaO σχηματίζει κόκκους γύρω από τον πυρήνα $CaCO_3$ που δεν έχει αντιδράσει, σχηματίζοντας μια πορώδη δομή. Για μικρή κοκκομετρία (d_p < 100 μm), η αντίσταση στην εσωτερική και εξωτερική μεταφορά μάζας μπορεί να αγνοηθεί και ο ρυθμός της διεργασίας ασβετοποίησης ελέγχεται πλήρως από τον ρυθμό της χημικής αντίδρασης [9], [17].

Η ακτίνα r_2 του κόκκου που δεν έχει αντιδράσει, δίνεται για κάθε χρονική στιγμή από την εξίσωση [17]

$$\frac{dr_2}{dt} = -r \tag{13}$$

Με αρχική συνθήκη την χρονική στιγμή t = 0

$$r_0 = \frac{3(1-\varepsilon_0)}{S_0} \tag{14}$$

Η διαθέσιμη ειδική επιφάνεια για την αντίδραση εξαρτάται από τις μορφολογικές ιδιότητες του υλικού

$$S_0 = S_{BET,CaCO_3} \times \rho_{th,CaCO_3}(1-\varepsilon_o) \tag{15}$$

Το πορώδες αλλάζει με την πρόοδο της αντίδρασης και υπολογίζεται ως συνάρτηση του αρχικού πορώδους ε_0

$$\varepsilon = \varepsilon_0 - (Z-1)(1-\varepsilon_0)X(t) \tag{16}$$

$$Z = 1 + \frac{\rho_{r,CaCO_3}(V_{M,CaO} - V_{M,CaCO_3})}{MW_{CaCO_3}} \tag{17}$$

Η μετατροπή σε κάθε χρονική στιγμή υπολογίζεται [17]

$$X(t) = 1 - \left(\frac{r_2(t)}{r_0}\right)^3 \tag{18}$$

Λόγω της μικρής κοκκομετρίας, η χωρική εξάρτηση της μετατροπής είναι αμελητέα [4], [9].

2.4 Μοντέλο αντιδραστήρα

Τα μακροσκοπικά ισοζύγια μάζας και ενέργειας υπολογίζονται με βάση τις γραμμομοριακές ροές σε κάθε διακριτό κομμάτι του αντιδραστήρα.

2.4.1 Μεταφορά μάζας

Οι γραμμομοριακές ροές των συστατικών ανά πάσα χρονική στιγμή βρίσκονται μέσω της ποσότητας ανθρακικού ασβεστίου που έχει αντιδράσει

$$\dot{n}_{CaCO_3,i} = (1 - X(t)) \cdot \dot{n}_{CaCO_3,0} \quad (19)$$

$$\dot{n}_{CaO,i} = X(t) \cdot \dot{n}_{CaCO_3,0} \quad (20)$$

$$\dot{n}_{CO_2,i} = \dot{n}_{CO_2,0} + X(t) \cdot \dot{n}_{CaCO_3,0} \quad (21)$$

Οι αρχικές γραμμομοριακές ροές υπολογίζονται ανάλογα με την παροχή του αερίου μείγματος και των στερεών αντίστοιχα. Η ποσότητα του αζώτου, καθώς αυτό δεν συμμετέχει στην αντίδραση, παραμένει σταθερή.

2.4.2 Μεταφορά θερμότητας

Η μεταφορά θερμότητας συνίσταται στην θερμική ροή από το τοίχωμα προς το νέφος αερίου – στερεών, στην θερμότητα που απορροφάει η αντίδραση και στο θερμικό περιεχόμενο των συστατικών. Για κάθε διακριτό τμήμα του αντιδραστήρα εφαρμόζεται το ισοζύγιο ενέργειας [2]

$$\sum_j \dot{n}_{j,\,L_i} C_{p,j} \cdot \left(T_i - T_{i-1}\right) = \Delta H_r \left(\dot{n}_{CaCO_3,\,i} - \dot{n}_{CaCO_3,\,i-1}\right) + \dot{q}_i \cdot (L_i - L_{i-1}) \quad (22)$$

Η θερμική ροή από το τοίχωμα προς το νέφος αναλογεί στην ροή λόγω ακτινοβολίας και στην ροή λόγω συναγωγής

$$\dot{q}_i = q_{conv,i} + q_{rad,i} \quad (23)$$

$$\dot{q}_{conv,i} = h_g \left(T_{w,i} - T_{,i}\right) \cdot 2\pi R_r \quad (24)$$

$$\dot{q}_{rad,i} = \frac{\varepsilon_w}{a_{g+p} + \varepsilon_w - a_{g+p}\varepsilon_w} \sigma \left[\varepsilon_{g+p} T_{w,i}^4 - a_{g+p} T_i^4\right] \cdot 2\pi R_r \quad (25)$$

Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή υπολογίζεται μέσω του αδιάστατου αριθμού Nusselt, ο οποίος είναι συνάρτηση των Reynolds, Prandtl και Graetz για κυλινδρική γεωμετρία [19]. Σχετικά με τους συντελεστές εκπομπής και απορροφητικότητας, υπολογίζονται μέσω του συντελεστή εκπομπής του CO_2 λαμβάνοντας υπόψη την γεωμετρία, την μερική πίεση και την θερμοκρασία για χαμηλή πυκνότητα κλίνης [20].

3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Το παραπάνω μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για μια σειρά προσομοιώσεων με στόχο τον καθορισμό των ενεργειακών απαιτήσεων για πλήρη μετατροπή του αντιδρώντος, προσδιορίζοντας ταυτοχρόνως το απαιτούμενο μήκος αντιδραστήρα, την κατανομή της θερμικής ροής και τον χρόνο για ολοκλήρωση της αντίδρασης. Μελετήθηκε η επίδραση της μερικής πίεσης του CO_2 και της θερμοκρασίας για έναν ισοθερμοκρασιακό αντιδραστήρα. Υπολογίσθηκε η απαιτούμενη θερμική ροή από το τοίχωμα προς το νέφος στερεών-αερίου, ώστε να διατηρείται σταθερή η θερμοκρασία του αντιδραστήρα. Οι προσομοιώσεις έγιναν για υλικό ασβεστόλιθο Granicarb 0.1/0.8 της εταιρίας ΟΜΥΑ [9]. Τέλος, εξετάσθηκε η συμφωνία των προβλέψεων και η εγκυρότητα του μοντέλου με πειραματικά δεδομένα πιλοτικού αντιδραστήρα της βιβλιογραφίας.

Πίνακας 2: Συνθήκες λειτουργίας προσομοιώσεων

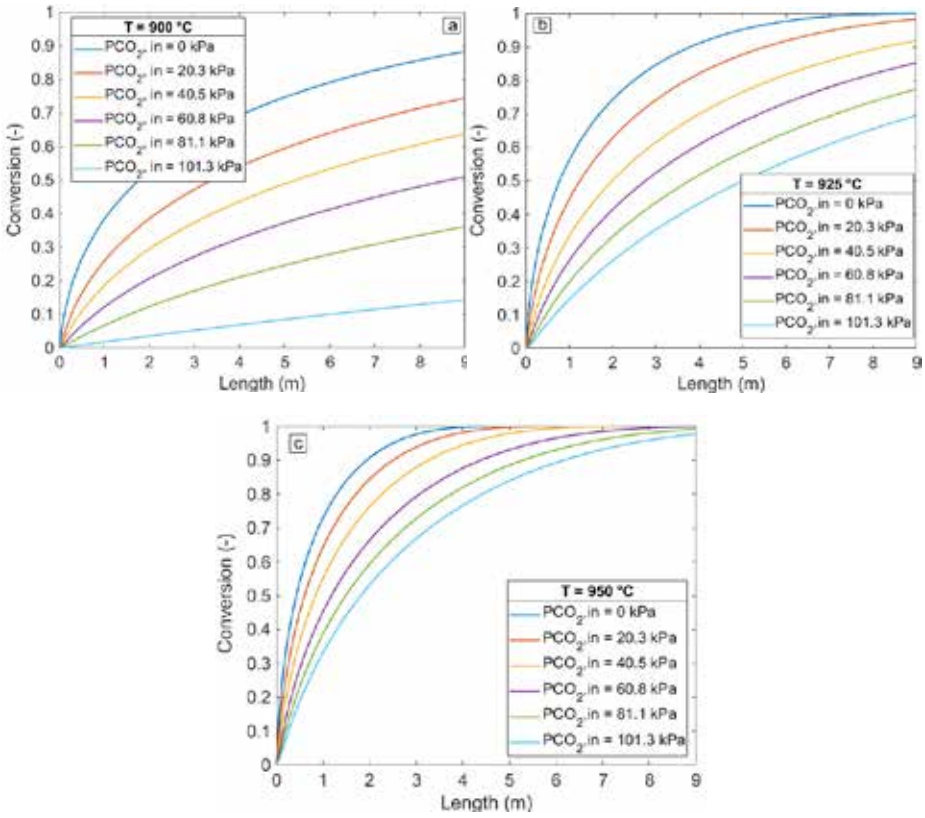
Ιδιότητα	Τιμή
Παροχή στερεού $CaCO_3$ (kg/h)	5
Παροχή αερίου (Nm^3/h)	0.52 – 0.81
Αρχική Μερική πίεση διοξειδίου (kPa)	0.5 – 101.3
Διάμετρος αντιδραστήρα (mm)	40
Κλάσμα κενού όγκου κλίνης, ε_{bed} (-)	0.99

Πίνακας 2: Συνθήκες λειτουργίας προσομοιώσεων (συνέχεια)

Ιδιότητα	Τιμή
Επιφάνεια BET υλικού (m^2/g)	1.2
Αρχικό πορώδες ε_0 (-)	0.034
Μέση διάμετρος σωματιδίων (μm)	50
Ταχύτητα αερίου (m/s)	0.8 – 1.42
Μήκος αντιδραστήρα (m)	9

3.1 Επίδραση μερικής πίεσης CO_2

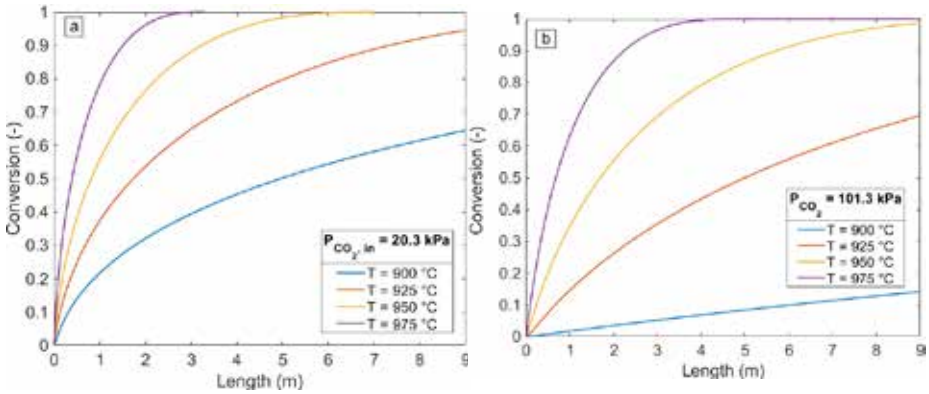
Προσομοιώθηκαν περιπτώσεις διαφορετικής μερικής πίεσης CO_2, μεταξύ 0% και 100% για τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες, 900, 950 και 975°C αντίστοιχα. Είναι φανερό ότι με την αύξηση της μερικής πίεσης, επιβραδύνεται ο ρυθμός διάσπασης του ανθρακικού ασβεστίου με μη γραμμικό τρόπο. Οι παρατηρήσεις αυτές συμφωνούν με πειραματικά ευρήματα και θεωρητικές προβλέψεις στην βιβλιογραφία [9], [17], [21].



Διάγραμμα 1: Επίδραση της μερικής πίεσης του CO_2 στον ρυθμό διάσπασης στους (a) 900, (b) 925 και (c) 950 °C.

3.2 Επίδραση της θερμοκρασίας

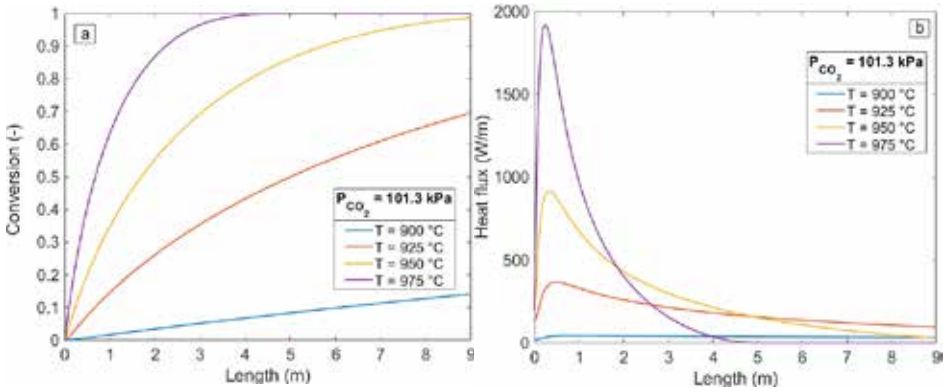
Με παρόμοιο τρόπο μελετήθηκε και η επίδραση της θερμοκρασίας στον ρυθμό της αντίδρασης, για δεδομένη μερική πίεση CO_2. Προσομοιώθηκαν συνθήκες θερμοκρασιακού εύρους 900 – 975 °C και για μερική πίεση CO_2 20.3 kPa και 101.3 kPa αντίστοιχα. Όπως αναμενόταν [9], [17], ο ρυθμός της αντίδρασης ασβεστοποίησης αυξάνεται με την άνοδο της θερμοκρασίας.



Διάγραμμα 2: Επίδραση της θερμοκρασίας στον ρυθμό διάσπασης για (a) μερική πίεση CO_2 20.3 και (b) 101.3 kPa.

3.3 Ισοθερμοκρασιακή λειτουργία

Οι θερμικές ανάγκες ανά μονάδα μήκους του αντιδραστήρα ασβεστοποίησης αποτελούν σημαντική παράμετρο για το σχεδιασμό ενός ολοκληρωμένου συστήματος αποθήκευσης ενέργειας. Για να διατηρείται σταθερή η θερμοκρασία στον αντιδραστήρα, πρέπει να υπολογισθεί η απαραίτητη θερμική ροή από το θερμότερο τοίχωμα προς το νέφος αερίου – σωματιδίων για ισοθερμοκρασιακή λειτουργία. Αυτό θα αποτελέσει βάση για το μοτίβο κατανομής της ροής και για τη συνολική θερμική ροή, παράμετροι που θα ληφθούν υπόψη για τον σχεδιασμό και την διαστασιολόγηση των ηλιοστατών [2]. Εξετάσθηκε το προφίλ της μετατροπής και της θερμικής ροής για διαφορετικές θερμοκρασίες σε ατμόσφαιρα καθαρού CO_2. Παρατηρείται ότι η θερμική ροή είναι μεγαλύτερη στα πρώτα μέτρα του αντιδραστήρα όπου παρουσιάζει ένα μέγιστο και σταδιακά μειώνεται με την πρόοδο της αντίδρασης. Επιπλέον, για να επιτευχθεί πλήρης μετατροπή του ανθρακικού ασβεστίου για την ρεαλιστική περίπτωση ατμόσφαιρας CO_2, αλλά και η θερμική ροή να παρέχεται κατά το δυνατόν ομοιόμορφα σε όλο το μήκος, η θερμοκρασία πρέπει να διατηρηθεί περί τους 925-950 °C.



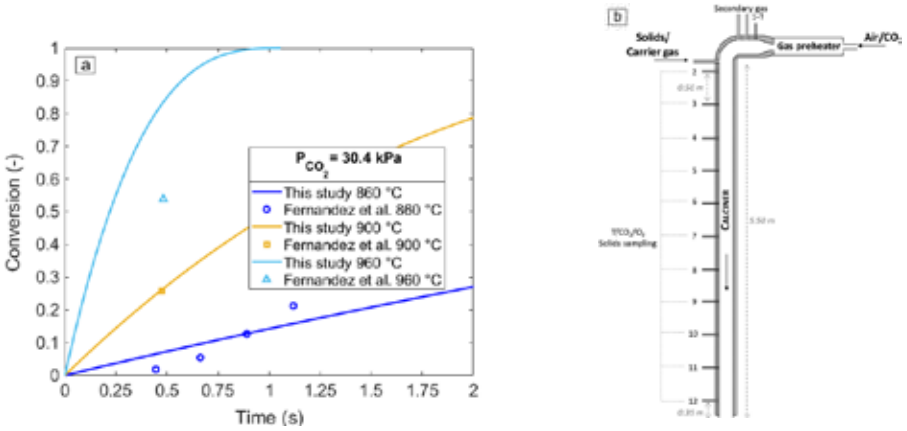
Διάγραμμα 3: (a) Προφίλ μετατροπής συναρτήσει του μήκους και (b) θερμική ροή ανά μονάδα μήκους για διαφορετικές θερμοκρασίες σε ατμόσφαιρα καθαρού CO_2.

3.4 Επαλήθευση με βιβλιογραφικά δεδομένα

Η εγκυρότητα του μοντέλου επαληθεύτηκε χρησιμοποιώντας βιβλιογραφικά δεδομένα πειραματικών διατάξεων. Οι Fernandez et al. [22] μελέτησαν την διάσπαση του ανθρακικού ασβεστίου σε καθοδικό αντιδραστήρα 6.5 μέτρων εσωτερικής διαμέτρου 80 mm, σε ευρεία θερμοκρασιών και μερικών πιέσεων CO_2. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε χαρακτηρίζεται από επιφάνεια BET 3.1 m^2/g και μέση διάμετρο σωματιδίων 51 μm. Το παραπάνω μοντέλο βρίσκεται σε καλή συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα.

Πίνακας 3: Συνθήκες λειτουργίας πειραμάτων των Fernandez et al.

Ιδιότητα	Τιμή
Παροχή στερεών (kg/h)	0.4
Παροχή αερίου (Nm^3/h)	7.0
Ταχύτητα αερίου (m/s)	1.1 – 2.2



Διάγραμμα 4: (a) Επαλήθευση με πειραματικά δεδομένα των Fernandez et al [22] *σε πιλοτικό αντιδραστήρα και (b) σχήμα του αντιδραστήρα.*

4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αναπτύχθηκε ένα ολοκληρωμένο μοντέλο αντιδραστήρα ασβεστοποίησης μήκους 9 μέτρων και εσωτερικής διαμέτρου 40 mm, χρησιμοποιώντας την θεωρία του μεταβλητού κόκκου (CGM), ένα κινητικό μοντέλο Langmuir – Hinshelwood δύο σταδίων και υδροδυναμικά χαρακτηριστικά καθοδικού αντιδραστήρα. Η ροή των στερεών και του φέροντος αερίου στην είσοδο ήταν 5 και 1 kg/h αντίστοιχα, με πορώδες κλίνης 0.99. Προσομοιώθηκε μια σειρά από συνθήκες διαφόρων θερμοκρασιών και μερικών πιέσεων CO_2 για να μελετηθεί η επίδραση των εν λόγω παραμέτρων. Βρέθηκε ότι με την αύξηση της μερικής πίεσης του CO_2 ο ρυθμός της διάσπασης του ανθρακικού ασβεστίου επιβραδύνεται, ενώ αντίστοιχα η αντίδραση ευνοείται σε υψηλότερες θερμοκρασίες, περί τους 925-950 °C. Καθώς προοδεύει η αντίδραση, ο ρυθμός μετατροπής μειώνεται καθώς αυξάνεται η ταχύτητα του αερίου και μειώνεται ο χρόνος παραμονής. Στην περίπτωση ισοθερμοκρασιακής λειτουργίας, υπολογίσθηκε η απαιτούμενη θερμική ροή για να τροφοδοτείται η ενδόθερμη αντίδραση και να διατηρείται σταθερή θερμοκρασία στον αντιδραστήρα. Οι υπολογισμοί αυτοί αποτελούν βάση για τον πλήρη σχεδιασμό ενός ηλιακού αντιδραστήρα θερμαινόμενο από ηλιακά κάτοπτρα. Το παραπάνω μοντέλο επαληθεύτηκε με πειραματικά δεδομένα πιλοτικού αντιδραστήρα μήκους 6.5 m και εσωτερικής διαμέτρου 80 mm, σε τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες, για ένα διαφορετικό υλικό χαρακτηριζόμενο από επιφάνεια BET 3.1 m^2/g. Τα πειραματικά ευρήματα βρίσκονται σε καλή συμφωνία με τις προβλέψεις του μοντέλου που αναπτύχθηκε.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αυτή η έρευνα έλαβε χρηματοδότηση από το έργο της Ευρωπαϊκής Ένωσης HORIZON 2020: SOCRATCES - SOlar Calcium looping integration for Thermo Chemical Energy Storage (Grant Agreement Number: 727348).

ΣΥΜΒΟΛΑ

b	παράμετρος, 1/s
d_p	διάμετρος σωματιδίων, m
E_{1L}	όρος ενέργειας ενεργοποίησης της σταθεράς $k_{1L,}$ kJ/mol
g	επιτάχυνση βαρύτητας, m/s^2
h_g	συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, W/m^{2}K
k_{01L}	προεκθετικός παράγοντας ρυθμού αντίδρασης, kmol/m^2 s
k_{1L-H}	κινητική σταθερά αντίδρασης διάσπασης, kmol/m^2 s
$K^{0\prime}$	προεκθετικός παράγοντας σταθεράς K', 1/kPa
K'	σταθερά συμπλόκου, 1/kPa
L	μήκος αντιδραστήρα, m
MW	μοριακό βάρος, kg/mol
$\dot{n}$	μοριακός ρυθμός ροής, mol/s
$\dot{q_i}$	θερμική ροή, W/m^2
P_{CO_2}	μερική πίεση $CO_{2,}$ kPa
P_{eq}	πίεση ισορροπίας αντίδρασης ασβεστοποίησης, kPa
$\dot{M}$	μαζική παροχή, kg/h
R_r	ακτίνα αντιδραστήρα, m
r_0	αρχική ακτίνα κόκκου, m
r_2	ακτίνα κόκκου, m
r	ρυθμός αντίδρασης ασβεστοποίησης, m/s
S_0	αρχική ειδική επιφάνεια, m^2/m^3
S_{BET}	επιφάνεια BET, m^2/g
T	θερμοκρασία, K
T_w	θερμοκρασία τοιχώματος αντιδραστήρα, K
t_{res}	χρόνος παραμονής, s
u_g	ταχύτητα αερίου, m/s
u_s	ταχύτητα στερεών, m/s
u_t	οριακή ταχύτητα Stokes, m/s
V_M	γραμμομοριακός όγκος, m^3/mol
X	μετατροπή, αδιάστατο
Z	λόγος στοιχειομετρικών όγκων, αδιάστατο
$\Delta H^{0\prime}$	όρος ενθαλπίας της σταθεράς K', kJ/mol
ΔH_r	ενθαλπία αντίδρασης, kJ/mol

Δείκτες

b	κλίνη
$conv$	συναγωγή
eq	ισορροπία
g	αέριο
i	δείκτης διακριτοποίησης
in	εισόδου
j	συστατικό
mix	μείγμα
p	σωματίδιο
rad	ακτινοβολία
s	στερεά
th	θεωρητική
0	αρχική τιμή

Ελληνικά σύμβολα

a_{g+p}	συντελεστής απορρόφησης νέφους στερεών – αερίου, αδιάστατο
ε	πορώδες, αδιάστατο
ε_{g+p}	συντελεστής εκπομπής νέφους στερεών – αερίου, αδιάστατο
ε_w	συντελεστής εκπομπής τοιχώματος, αδιάστατο
θ	κλάσμα ενεργών θέσεων καλυμμένες από το $CO_{2,}$ αδιάστατο
μ	ιξώδες, kg/ ms
ρ	πυκνότητα, kg/m^3
σ	σταθερά Stefan – Boltzmann, W/m^2 K^4

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Chacartegui, R., et al., 2016, “Thermochemical energy storage of concentrated solar power by integration of the calcium looping process and a CO2 power cycle,” *Appl. Energy*, p. 17.

[2] Lisbona, P., Bailera, M., Hills, T., Sceats, M., Díez, L. I., and Romeo, L. M., 2020, “Energy consumption minimization for a solar lime calciner operating in a concentrated solar power plant for thermal energy storage,” *Renew. Energy*, vol. 156, pp. 1019–1027, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.04.129.

[3] Anthony, E. J. B., 2011, “Ca looping technology: current status, developments and future directions,” *Greenh. Gases Sci. Technol.*, vol. 1, no. 1, pp. 36–47, Mar. 2011, doi: 10.1002/ghg3.2.

[4] Karasavvas, E. *et al.*, 2020, “One-Dimensional Heterogeneous Reaction Model of a Drop-Tube Carbonator Reactor for Thermochemical Energy Storage Applications,” *Energies*, vol. 13, no. 22, p. 5905, Nov. 2020, doi: 10.3390/en13225905.

[5] Pardo, P., Deydier, A., Anxionnaz-Minvielle, Z., Rougé, S., Cabassud, M. and Cognet, P., 2014, “A review on high temperature thermochemical heat energy storage,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 32, pp. 591–610, Apr. 2014, doi: 10.1016/j.rser.2013.12.014.

[6] Scaltsoyiannes, A. , Antzaras, A., Koilaridis, G. and Lemonidou, A., 2021, “Towards a generalized carbonation kinetic model for CaO-based materials using a modified random pore model,” *Chem. Eng. J.*, vol. 407, p. 127207, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.cej.2020.127207.

[7] Ortiz, C., Valverde, J. M., Chacartegui, R., Perez-Maqueda, L. A., and Giménez, P., 2019, “The Calcium-Looping (CaCO3/CaO) process for thermochemical energy storage in Concentrating Solar Power plants,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 113, pp. 126–139, Oct. 2019, doi: https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109252.

[8] Papalas, T., Antzaras, A. N. and Lemonidou, A. A., 2020, “Evaluation of Calcium-Based Sorbents Derived from Natural Ores and Industrial Wastes for High-Temperature CO_2 Capture,” *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 59, no. 21, pp. 9926–9938, May 2020, doi: 10.1021/acs.iecr.9b06834.

[9] Scaltsoyiannes, A. A., and Lemonidou, A. A., 2020, “CaCO3 decomposition for calcium-looping applications: Kinetic modeling in a fixed-bed reactor,” *Chem. Eng. Sci.*, p. 14, 2020.

[10] *MATLAB*. The MathWorks Inc.

[11] Çengel, Y. A. and Boles, M. A., 2015, *Thermodynamics: an engineering approach*, 8. edition in SI units. New York, NY: McGraw-Hill Education.

[12] Poling, B. E., Prausnitz, J. M., and O’Connell, J. P., 2001, *The properties of gases and liquids*, 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2001.

[13] Brodkey, R. and Hershey, H., 2016, *Transport Phenomena, A Unified Approach*. New York, NY: McGraw-Hill.

[14] Udoetok, E. S. , 2013, “THERMAL CONDUCTIVITY OF BINARY MIXTURES OF GASES,” *Front. Heat Mass Transf.*, vol. 4, no. 2, Sep. 2013, doi: 10.5098/hmt.v4.2.3008.

[15] Himmelblau, D. and Riggs, J., 2017, *Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering*, 8th ed. Pearson Education, Inc.

[16] Wen, C. and Chaung, T., 1979, “Entrainment Coal Gasification Modeling,” *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, vol. 18, no. 4.

[17] García-Labiano, F., Abad, A., de Diego, L. F., Gayán, P. and Adánez, J., 2002, “Calcination of calcium-based sorbents at pressure in a broad range of CO2 concentrations,” *Chem. Eng. Sci.*, p. 13.

[18] Moustafa, A. F., 2017, “Isothermal reduction process and kinetic of nanomaterials in reducing atmosphere_ A review,” *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, p. 14.

[19] Nellis, G. and Klein, S. A., 2009, *Heat transfer*. Cambridge ; New York: Cambridge University Press.

[20] *VDI Heat Atlas*. Heidelberg: Springer, 2010.

[21] Parkkinen, J. , et al., 2017, “Modelling a Calciner with High Inlet Oxygen Concentration for a Calcium Looping Process,” *Energy Procedia*, p. 8.

[22] Fernandez, J. R., Turrado, S. and Abanades, J. C. , 2019, “Calcination kinetics of cement raw meals under various CO2 concentrations,” p. 12.

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΩΝ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ ΣΕ ΚΤΙΡΙΟ ΥΠΟ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Λ .Γεωργίου[1] , Π. Α. Φωκαΐδης[1]
[1]Σχολή Μηχανικής και Εφαρμοσμένων Επιστημών, Πανεπιστήμιο Frederick

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το αντικείμενο αυτής της εργασίας είναι η μελέτη της θερμικής απόδοσης ηλιακών συλλεκτών υπό μεταβαλλόμενες οριακές συνθήκες με εφαρμογή πεπερασμένων στοιχείων. Συγκεκριμένα στα πλαίσια της εργασίας αναπτύχθηκε μοντέλο προσομοίωσης με την χρήση πεπερασμένων στοιχείων των οποίων η απόδοση μελετήθηκε για μεταβαλλόμενες οριακές συνθήκες. Στα πλαίσια της μελέτης λήφθηκε υπόψη συγκεκριμένο μοτίβο κατανάλωσης ζεστού νερού χρήσης για ανάγκες μεμονωμένης κατοικίας, και η απόδοση των προτεινόμενων διατάξεων υπολογίστηκε, λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη την κατανάλωση. Η ιδιαιτερότητα των συστημάτων τα οποία μελετήθηκαν, είναι ότι αυτά είναι δομοστοιχειωτά και ενσωματωμένα στο κτηριακό κέλυφος, σε κάθετη διάταξη. Μελετήθηκε η συμπεριφορά των πλαισίων για τους τέσσερις προσανατολισμούς κτηρίου και για τέσσερις τυπικούς μήνες του έτους, οι οποίοι προσομοιώνουν όλες τις εποχές. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε για το ηλιακό δυναμικό και μετεωρολογικά δεδομένα της επαρχίας Λευκωσίας στην Κύπρο, τα οποία προσομοιώνουν την Κλιματική Ζώνη Α της Ελλάδος. Τα αποτελέσματα της εργασίας αναμένεται να στηρίξουν τις προσπάθειες περαιτέρω ανάπτυξης της τεχνολογίας των ηλιακών θερμικών πλαισίων και της ενσωμάτωσης τους στο κτηριακό κέλυφος.

1.Εισαγωγή

Η χρήση ηλιακών θερμικών συλλεκτών χρονολογείται από τη δεκαετία του '60. Σε χώρες της Νότιας Ευρώπης και της Μέσης Ανατολής, όπως η Κύπρος, η Ελλάδα, η Ιταλία, η Ισπανία και το Ισραήλ, η χρήση ηλιακών θερμικών συλλεκτών για την παραγωγή ζεστού νερού οικιακής χρήσης αποτελεί μέρος της καθημερινής ζωής. Το ποσοστό εγκατεστημένων ηλιακών θερμικών συλλεκτών ανά κάτοικο σε ορισμένες περιπτώσεις υπερβαίνει το ένα m^2 / κατά κεφαλή, όπως στην περίπτωση της Κύπρου. Η χρήση ηλιακών θερμικών συλλεκτών αποδείχθηκε οικονομικά βιώσιμη, για αυτό τον λόγο και σήμερα η τεχνολογία αυτή ευδοκιμεί σε άλλα μέρη της Κεντρικής και Βόρειας Ευρώπης, όπως στην Αυστρία και τη Γερμανία **[1]**. Η χρήση αυτών των συστημάτων επεκτείνεται και σε άλλες εφαρμογές, όπως τη βιομηχανική παραγωγή θερμότητας, τη θέρμανση χώρου κ.λπ. **[2]**.

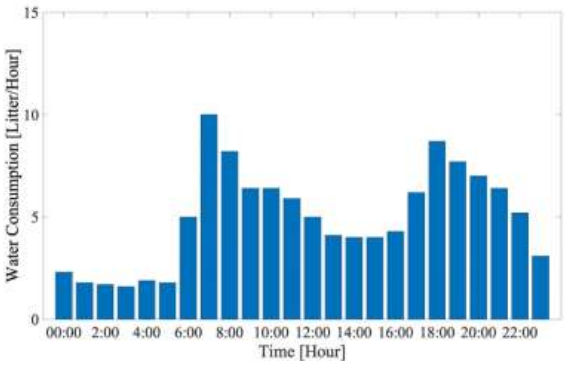
2.Μεθοδολογία

2.1 Οριακές Συνθήκες

Σε αυτή τη μελέτη αναπτύχθηκε ένα αριθμητικό μοντέλο για την προσομοίωση της θερμικής απόδοσης των ενσωματωμένων ηλιακών θερμικών πάνελ. Το μοντέλο βασίστηκε στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων και χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό προσομοίωσης ροής του εμπορικού κώδικα Solidworks **[3]**. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε για τέσσερις ημερολογιακούς μήνες (Ιανουάριος, Μάρτιος, Αύγουστος και Νοέμβριος), παρέχοντας αποτελέσματα για όλες τις εποχές του έτους στους τέσσερις προσανατολισμούς (Βόρεια, Νότια, Δυτικά και Ανατολικά) **[4]**. Η παροχή μάζας του θερμικού μέσου καθορίστηκε με βάση τις απαιτήσεις του προτύπου ISO 12975, και η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για βεβιασμένη κυκλοφορία. Μια άλλη παράμετρος η οποία λήφθηκε υπόψη κατά την προσομοίωση, αφορούσε στην κατανάλωση του ζεστού νερού χρήσης **[5]**. Στο ***Σχήμα 1*** δίνονται πληροφορίες σε σχέση με το προφίλ κατανάλωσης του ζεστού νερού χρήσης από το σύστημα, δηλαδή ο ρυθμός αφαίρεσης ρευστού σε δεδομένο χρόνο από το σύστημα. Στον **Πίνακας 1**, παρέχονται πληροφορίες σχετικά με τις οριακές συνθήκες των προσομοιωμένων μοντέλων. Τα μετεωρολογικά δεδομένα της περιοχής και ειδικότερα η συνολική ηλιακή ακτινβολία ,καθώς και η θερμοκρασία περιβάλλοντος, και τα δύο σε ωριαίο βήμα, λήφθηκαν από την βάση δεδομένων του JRC PVGIS.

Πίνακας 1 Οριακές Συνθήκες

Ιδιότητα	Τιμή	Μονάδες
Παροχή μάζας θερμικού ρευστού	0.038	[kg/s]
Ηλιακή θερμική ακτινοβολία	Από μετεωρολογικό αρχείο (PVGIS)	[W/m²]
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	Από μετεωρολογικό αρχείο (PVGIS)	[°C]
Προφίλ κατανάλωσης νερού	Σύμφωνα με Σχήμα 1	[L/h]
Αρχική θερμοκρασία νερού	Ρυθμιζόμενη (24 ώρες αρχική λειτουργία)	[°C]
Κλίση	0,45,90	°



Σχήμα 1 Ωριαίο προφίλ κατανάλωσης ζεστού νερού χρήσης.

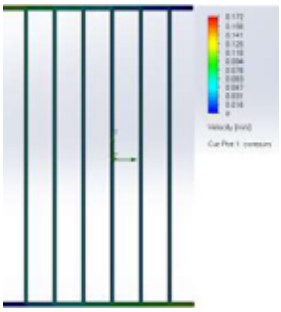
2.2 Γεωμετρία και πλέγμα

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας, διερευνήθηκε γεωμετρία ηλιακού θερμικού πλαισίου με εμβαδό 1 x 1,6 m^2. Τα κύρια μέρη της γεωμετρίας που διερευνήθηκαν είναι η πλάκα απορρόφησης, οι σωλήνες μεταφοράς θερμικού μέσου, το περίβλημα, η θερμομόνωση, το προστατευτικό γυαλί, ο αέρας μεταξύ του γυαλιού και του απορροφητή, και η δεξαμενή αποθήκευσης ζεστού νερού. Πληροφορίες για τη γεωμετρία και τα σχέδια του πλέγματος που ερευνήθηκε παρέχονται στον **Πίνακας 2**.
Το επίπεδο καμπυλότητας σχετικά με το πλέγμα ορίστηκε στα 0,5548 και η τιμή κριτηρίου ανοχής ήταν 0,0005 m. Τα χαρακτηριστικά του πλέγματος καθορίστηκαν στην προκαταρκτική διερεύνησης, αναφορικά με τις ελάχιστες απαιτήσεις του πλέγματος, προκείμενου τα αποτελέσματα από την αύξηση της λεπτομέρειας του να μην διαφέρουν αισθητά. Η ρύθμιση αυτή έγινε με στόχο την επίτευξη βέλτιστων δυνατών αποτελεσμάτων σε ελάχιστο δυνατό χρόνο. Το μοντέλο του ηλιακού συλλέκτη θεωρήθηκε ότι ήταν ενσωματωμένο σε κτηριακή δομή, με αποτέλεσμα να ληφθεί υπόψη τόσο το ανάλογο βαρυτικό πεδίο, όσο και η αντίστοιχη μετάδοση θερμότητας από το πίσω μέρος του πλαισίου προς το κτηριακό κέλυφος . Πληροφορίες σχετικά με τα υλικά κατασκευής του ηλιακού συλλέκτη παρέχονται στον **Πίνακας 3**, καθώς και στο **Σχήμα 2**. Το προφίλ ταχύτητας του θερμικού ρευστού εντός του υδραυλικού συστήματος του συλλέκτη απεικονίζεται στο **Σχήμα 3**.

Πίνακας 2 Πληροφορίες Γεωμετρίας και Πλέγματος

Γεωμετρικό Μοντέλο	Πλέγμα (Απεικόνιση)	Πληροφορίες πλέγματος
		Μέγεθος κελιών στον άξονα X: 0.0841 (m) Μέγεθος κελιών στον άξονα Y: 0.0845 (m) Μέγεθος κελιών στον άξονα Z: 0.0841 (m) Ελάχιστο μέγεθος διακένου: 0.0222 (m) Σύνολο κελιών: 423,235 Σύνολο κελιών ρευστού: 230,906 Σύνολο κελιών στερεού: 192,329 Αριθμός κελιών ρευστού που είναι σε επαφή με κελία στερεού: 101,890

Σχήμα 2 Δομή ενσωματωμένου ηλιακού συλλέκτη στο κτήριο



Σχήμα 3 Κατανομή ταχύτητας ρευστού στον ηλιακό συλλέκτη

2.3 Θεμελιώδεις εξισώσεις

Οι θεμελιώδεις εξισώσεις που αξιοποιήθηκαν για την αριθμητική ανάλυση αφορούν στην μη μόνιμη μετάδοση θερμότητας, καθώς και σε τυρβώδεις ροές. Ο απορροφητής υποβλήθηκε σε μη μόνιμη ηλιακή ακτινοβολία, η οποία ως οριακή συνθήκη μεταφράστηκε σε επιφανειακή θερμοκρασία, στην λογική υπολογισμού της θερμοκρασίας Tsol σε ωριαία χρονική βάση. Μεταξύ του απορροφητήρα και του υδραυλικού δικτύου, θεωρήθηκε μετάδοση θερμότητας με θερμική αγωγή, λόγω της φυσικής επαφής των δύο στοιχείων. Οι θεμελιώδεις εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ο νόμος διατήρησης της μάζας, ο νόμος διατήρησης της ορμής και ο νόμος διατήρησης της ενέργειας για βεβιασμένη κυκλοφορία ρευστού με βάση την προσέγγιση Navier-Strokes:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad [1]$$

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) + \frac{\partial P}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i \quad [2]$$

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i H}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(u_j(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i\right) + \frac{\partial \rho}{\partial t} - \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho\varepsilon + S_i u_i + Q_H \quad [3]$$

$$H = h + \frac{u^2}{2} \quad [4]$$

Πίνακας 3 Υλικά τοιχοποιίας και ενσωματωμένου ηλιακού συλλέκτη

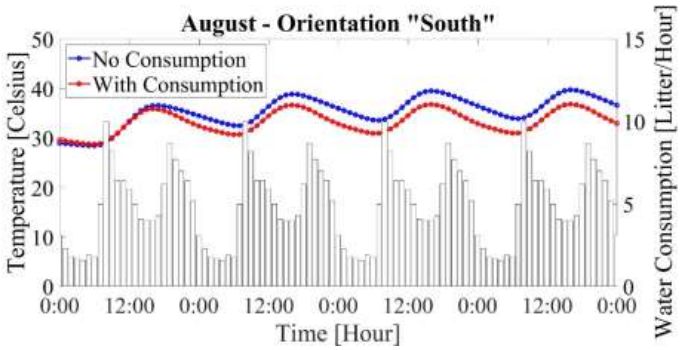
Ηλιακός Συλλέκτης		**Τοιχοποιία**	
Περιγραφή Τμήματος	**Υλικό**	**Περιγραφή Τμήματος**	**Υλικό**
Μπροστινό κάλυμμα	Γυαλί	Εξωτερικά	Σοβάς 2.5 cm
Κιβώτιο	Αλουμίνιο	Εσωτερικά	Σοβάς 2.5cm
Υδραυλικό Δίκτυο	Χαλκός	Τούβλο	Διάτρητο τούβλο 30 cm
Μόνωση σωλήνων	Πολυουρεθάνη		
Δεξαμενή	Χαλκός		
Μόνωση δεξαμενής	Ορυκτοβάμβακας		

Όσον αφορά την μετάδοση θερμότητας μεταξύ του υδραυλικού δικτύου και του απορροφητήρα, αυτή θεωρήθηκε ότι συντελέστηκε με θερμική αγωγή, και το μέτρο της υπολογίστηκε με την βοήθεια της ακόλουθης διαφορικής εξίσωσης:

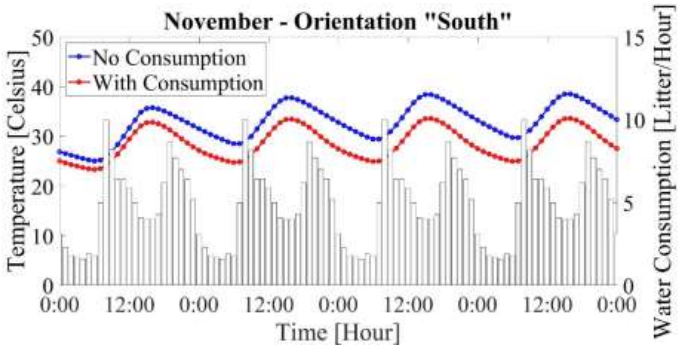
$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\lambda_i \frac{\partial T}{\partial x_i}\right) + Q_H \quad [5]$$

3.Αποτελέσματα και συζήτηση

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των προφίλ θερμοκρασίας του θερμικού ρευστού παρουσιάζονται στο **Σχήμα 4** και στο **Σχήμα 5** σε δύο σενάρια, για τον μήνα Αύγουστο και τον μήνα Νοέμβριο, συμπεριλαμβανομένης και εξαιρούμενης της κατανάλωσης νερού. Αυτά τα αποτελέσματα υποδεικνύουν την σημασία της θεώρησης της κατανάλωσης νερού από το ηλιοθερμικό σύστημα, μια προσέγγιση η οποία στο παρόν στάδιο δεν ακολουθείται από την επιστημονική βιβλιογραφία της περιοχής, οδηγώντας σε εσφαλμένα συμπεράσματα. Η ταυτόχρονη κατανάλωση ζεστού νερού στην λογική ρεαλιστικών μοτίβων κατανάλωσης, αντιπροσωπεύει ρεαλιστικές συνθήκες, για αυτό και η συμπερίληψη αυτής της παραμέτρου έχει ως αποτέλεσμα την εξαγωγή πιο αξιόπιστων αποτελεσμάτων Στις χειμερινές συνθήκες, η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δύο σεναρίων ήταν υψηλότερη λόγω των χαμηλότερων περιβαλλοντικών θερμοκρασιών και της μειωμένης μεταφοράς θερμότητας, λόγω ηλιακής ακτινοβολίας. Αντίθετα, η διαφορά θερμοκρασίας στις θερινές συνθήκες είναι χαμηλότερη δεδομένου ότι ο ηλιακός συλλέκτης εκτίθεται σε παρατεταμένους χρόνους ηλιακής ακτινοβολίας και η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι υψηλότερη.



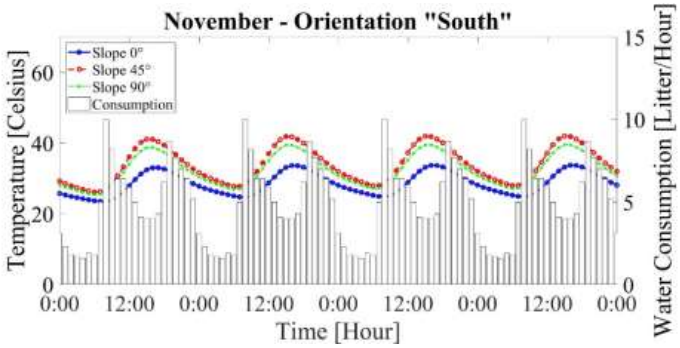
Σχήμα 4 Μέση θερμοκρασία υγρού συστήματος - Αύγουστος - Νότος - Κλίση 90°



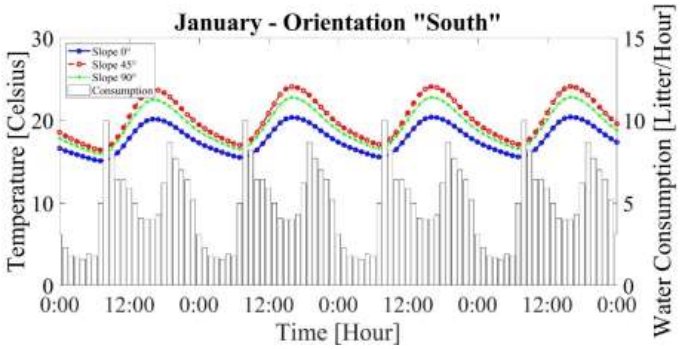
Σχήμα 5 Μέση θερμοκρασία υγρού συστήματος - Νοέμβριος - Νότος - Κλίση 90°

Στη μελέτη, διερευνήθηκε η απόδοση ηλιακού θερμικού πλαισίου σε οροφή κτιρίου για γωνίες τοποθέτησης θερμικού ηλιακού συλλέκτη στις 0° και 45°. Τα αποτελέσματα προσομοίωσης θερμικής απόδοσης για τον Ιανουάριο και τον Ιούλιο παρουσιάζονται στο **Σχήμα 7** και στο **Σχήμα 7**, αντίστοιχα. Στις καλοκαιρινές συνθήκες, η θερμοκρασία υγρού για τις κλίσεις 0° και 45° είναι σημαντικά υψηλότερη συγκρινόμενα με την κλίση των 90°, λόγω της μεγαλύτερης έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας σε αυτές τις γωνίες. Σε αντίθεση με τη διαφορά απόδοσης της θερινής κατάστασης, τα αποτελέσματα υπό χειμερινές συνθήκες έδειξαν παρόμοια θερμική απόδοση των ενσωματωμένων ηλιακών συλλεκτών με αυτούς που θεωρήθηκαν ως ενσωματωμένοι στην οροφή του κτηρίου, λόγω των συνθηκών της ηλιακής ακτινοβολίας κατά την περίοδο αυτή.

Τα εγκατεστημένα στη στέγη συστήματα εκτίθενται σε σημαντικά υψηλότερη ηλιακή ακτινοβολία λόγω της θέσης τους. Παρόλο ότι παρατηρείται χαμηλότερη θερμική απόδοση στην κλίση 0° σε σύγκριση με την κλίση 45°, στην κλίση 0° η μέγιστη θερμοκρασία υγρού είναι 54C°. Αυτή η θερμοκρασία είναι και η υψηλότερη που επιτυγχάνεται από όλες τις κλίσεις. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα προσομοίωσης της κλίσης 45°, ο βέλτιστος προσανατολισμός για τη μέγιστη θερμική απόδοση είναι ο νότιος. Όσον αφορά όλες τις εποχές, στον παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που ελήφθησαν για την κλίση 90°, όπου φαίνεται πως ο νότιος προσανατολισμός συνδέεται με την καλύτερη απόδοση για το φθινόπωρο, το χειμώνα και την άνοιξη, καθώς ο ανατολικός προσανατολισμός είχε την καλύτερη απόδοση για τη θερινή περίοδο.



Σχήμα 6 Μέση θερμοκρασία υγρού συστήματος - Νοέμβριος - Νότος - Κλίση 0° έναντι 45° έναντι 90°



Σχήμα 7 Μέση θερμοκρασία υγρού συστήματος - Ιανουάριος - Νότος - Κλίση 0° έναντι 45° έναντι 90°

4.Συμπεράσματα

Αυτή η μελέτη εξέτασε τη θερμική απόδοση ενός ηλιακού συλλέκτη ενσωματωμένου στο κτηριακό κέλυφος υπό διαφορετικές καιρικές συνθήκες. Αναπτύχθηκε αριθμητικό μοντέλο με βάση τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων με την χρήση εμπορικού εργαλείου υπολογιστική ρευστοδυναμικής στο λογισμικό (Solidworks 2019). Οι δυναμικές παράμετροι λειτουργίας που εξετάστηκαν κατά την προσομοίωση ήταν η γωνία τοποθέτησης του ηλιακού συλλέκτη, η θερμοκρασία του περιβάλλοντος και η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Τα αριθμητικά αποτελέσματα προσομοίωσης απεικονίζουν τις θερμοκρασίες του ρευστού κατά τη περίπτωση βόρειου, νότιου, δυτικού και ανατολικού προσανατολισμού. Ο συντελεστής κατανάλωσης νερού λήφθηκε υπόψη σε όλες τις προσομοιώσεις και οι αριθμητικές προσομοιώσεις έδειξαν την επίδραση της κατανάλωσης νερού στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Ένα σημαντικό συμπέρασμα που εξάχθηκε από τα ευρήματα των υπολογισμών, είναι ότι η θερμική απόδοση των ενσωματωμένων ηλιακών συλλεκτών στο κτηριακό κέλυφος, είναι αρκετά ικανοποιητική για εποχές του χρόνου όπου απαιτείται η παραγωγή θερμότητας για σκοπούς ζεστού νερού ή και θέρμανσης χώρου. Συνεπώς η συγκεκριμένη πρακτική δύναται να δώσει αξιόπιστες λύσεις, η σημασία των οποίων θα πρέπει να διερευνηθεί περαιτέρω.

Βιβλιογραφικές αναφορές

[1] Eicker, U., Pietruschka, D., Haag, M., & Schmitt, A. (2014). Energy and economic performance of solar cooling systems world-wide. *Energy Procedia*, 57, 2581-2589.
[2] Kylili, A., Fokaides, P. A., Ioannides, A., & Kalogirou, S. (2018). Environmental assessment of solar thermal systems for the industrial sector. Journal of Cleaner Production, 176, 99-109.
[3] SOLIDWORKS® (2019). Technical Reference. Solidworks Flow Simulation 2019. http://help.solidworks.com/2019/english/WhatsNew/c_flow_simulation.htm?id=1ff1e1d6a9434c19b2657f4446d43822. Last accessed 02.10.2020
[4] Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis.
[5] Trust, E. S. (2008). Measurement of domestic hot water consumption in dwellings. *Energy Sav Trust*.

ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΣΥΛΛΕΚΤΗ – ΑΠΟΘΗΚΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ.

Ν. Αρναουτάκης[1], Μ. Σουλιώτης[2*], Σ. Παπαευθυμίου[1]

[1] Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης
[2] Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας,
*e-mail: msouliotis@uowm.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

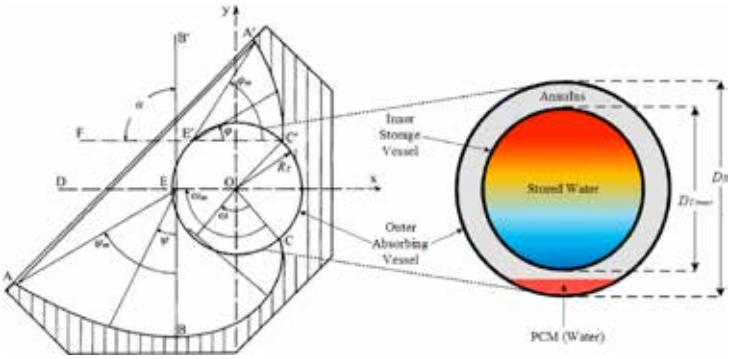
Στη παρούσα εργασία γίνεται βέλτιστη σχεδίαση σε συνδυασμό με τεχνοοικονομική και περιβαλλοντική μελέτη ενός ηλιακού θερμικού συστήματος ICS (Integrated Collector Storage) που συνδυάζει συλλέκτη και αποθήκη θερμότητας σε ενιαία διάταξη και το οποίο διαθέτει δεξαμενή με διπλό τοίχωμα και ασύμμετρο καμπύλο κάτοπτρο γεωμετρίας CPC (Compound Parabolic Concentrator). Το διάκενο μεταξύ των δύο τοιχωμάτων της δεξαμενής βρίσκεται υπό μερικό κενό και περιέχει μια μικρή ποσότητα νερού, το οποίο λειτουργεί ως υλικό αλλαγής φάσης και ταυτόχρονα ως μέσο θέρμανσης του νερού χρήσης. Στόχος της εργασίας είναι ο καθορισμός των διαστάσεων της ανακλαστικής επιφάνειας του καμπύλου κατόπτρου, οι οποίες συντελούν στη διαμόρφωση του τελικού σχήματος του κατόπτρου καθώς και η πρόβλεψη του ελάχιστου αριθμού των υπό σχεδίαση συστημάτων ICS για εγκατάσταση σε κατοικία, έχοντας σαν βασικά κριτήρια τη μέγιστη ενεργειακή απόδοση και ταυτόχρονα το μικρότερο συνολικό κόστος κατασκευής του συστήματος. Η βέλτιστη σχεδίαση του κατόπτρου γίνεται με χρήση μίας εφαρμογής που χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο πολυκριτήριας ανάλυσης για τον υπολογισμό των διατάσεων της ανακλαστικής επιφάνειας ο οποίος συνδυάζει θεωρία βελτιστοποίησης με γραφική σχεδίαση σε υπολογιστή (CAD) για τη κατασκευή του κατόπτρου στη βιομηχανία. Η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους οδηγεί σε οικονομικότερα και περισσότερα φιλικά προς περιβάλλον, συστήματα. Για τον καθορισμό των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται στη διαδικασία σχεδίασης, χρησιμοποιήθηκε ως βάση η θεωρία της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (AKZ), η οποία αρχικά εφαρμόστηκε σε ένα πρότυπο σύστημα ICS με ασύμμετρο καμπύλο κάτοπτρο και δεξαμενή με διπλό τοίχωμα. Στη συνέχεια, για το προτεινόμενο από τον αλγόριθμο σύστημα ICS, γίνεται τεχνοοικονομική και περιβαλλοντική μελέτη με τη χρήση του αλγόριθμου καθώς και σύγκριση με ένα ηλιακό θερμικό σύστημα με επίπεδο συλλέκτη (FPTU) ίδιας κλίμακας για να διαπιστωθεί κατά πόσο η διαδικασία σχεδίασης οδηγεί τελικά σε βελτιωμένα ICS συστήματα ικανά να προσεγγίσουν ή ακόμα και να ξεπεράσουν την ενεργειακή απόδοση των συμβατικών συστημάτων της αγοράς.

Λέξεις Κλειδιά: Σύστημα ICS, Αλγόριθμος πολυκριτήριας ανάλυσης, Ανάλυση Κύκλου Ζωής (AKZ), Τεχνοοικονομική μελέτη, Περιβαλλοντική μελέτη

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα Ηλιακά Θερμικά Συστήματα (ΗΘΣ) συντελούν στη μείωση των εκπομπών αερίων που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, οδηγώντας με αυτό τον τρόπο στη παραγωγή «καθαρής» και χαμηλού κόστους θερμικής ενέργειας. Τα βασικά είδη των ΗΘΣ που χρησιμοποιούνται σήμερα για τη θέρμανση νερού χρήσης κατοικιών είναι τρία: Ηλιακά θερμικά θερμοσιφωνικά συστήματα με επίπεδο συλλέκτη (Flat Plate Thermosyphonic Unit, FPTU), ηλιακά θερμικά θερμοσιφωνικά συστήματα με συλλέκτη σωλήνων κενού (Evacuated Tube Thermosyphonic Units, ETTU) και ηλιακά θερμικά συστήματα που συνδυάζουν συλλέκτη και αποθήκη θερμότητας σε ενιαία διάταξη, γνωστά και ως ολοκληρωμένες ηλιακές συσκευές συλλέκτη αποθήκης θερμότητας (Integrated Collector Storage, ICS). Μια υποκατηγορία των ICS συστημάτων είναι και αυτά που ενσωματώνουν και κάτοπτρα σύνθετης γεωμετρίας, με τα πιο διαδεδομένα να είναι εκείνα με παραβολικό κάτοπτρο ή συνδυασμό παραβολικών κατόπτρων, γνωστά και ως κάτοπτρα CPC (Compound Parabolic Concentrators). Συχνά, οι καμπύλες κατοπτρικές διατάξεις είναι ασύμμετρες με στόχο τον περιορισμό των θερμικών απωλειών μέσω συναγωγής και τελικά την πληρέστερη θερμική προστασία της δεξαμενής αποθήκευσης.

Μία τέτοια σύνθετη διάταξη αποτυπώνεται στο Σχήμα 1 [1], [2], όπου εκτός της σύνθετης γεωμετρικής διάταξης δοχείο – κάτοπτρο, το δοχείο αποθήκευσης έχει ένα επιπλέον λειτουργικό χαρακτηριστικό, διαθέτει διπλό τοίχωμα (ομόκεντρα κυλινδρικά δοχεία). Το διάκενο που υπάρχει μεταξύ των δύο κυλινδρικών δοχείων βρίσκεται υπό μερικό κενό, ενώ την όλη διάταξη συμπληρώνει η ύπαρξη μια μικρής ποσότητας νερού, το οποίο λειτουργεί ως υλικό αλλαγής φάσης (Phase Change Material, PCM) και τελικά ως το μέσο θέρμανσης του νερού χρήσης, μέσω του μηχανισμού της εξάτμισης – συμπύκνωσης. Το συγκεκριμένο ηλιακό θερμικό σύστημα χρησιμοποιείται ως πρότυπο στη παρούσα εργασία, με σκοπό την ελαχιστοποίηση του κόστους, τη μεγιστοποίηση της αποδοτικότητας και τη μείωση του περιβαλλοντικού του αποτυπώματος.



Σχήμα 1: ICS σύστημα με ασύμμετρο παραβολικό ανακλαστήρα που φέρει δεξαμενή με διπλό τοίχωμα και μερικό κενό στο μεταξύ των τοιχωμάτων της διάκενο

Αρχικός στόχος της εργασίας είναι ο καθορισμός των βέλτιστων διαστάσεων του παραβολικού τμήματος του καμπύλου κατόπτρου που οδηγούν σε μεγιστοποίηση της μέσης ημερήσιας απόδοσης, στην ελαχιστοποίηση των θερμικών απωλειών, στο προσδιορισμό του βέλτιστου αριθμού συστημάτων που θα τοποθετηθούν στην κατοικία καθώς και στην ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής του συστήματος ICS. Η μελέτη εξετάζει επίσης διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές της Ελλάδας με στόχο την εξαγωγή συγκριτικών αποτελεσμάτων. Για την πραγματοποίηση όλων των ανωτέρω χρησιμοποιείται ένας αλγόριθμος πολυκριτήριας ανάλυσης σε συνδυασμό με γραφική σχεδίαση σε υπολογιστή (CAD) για την παραμετροποίηση του καμπύλου ανακλαστήρα και την τελική διαμόρφωση της πολύπλοκης γεωμετρίας του συγκεντρωτικού κατόπτρου (CPC).

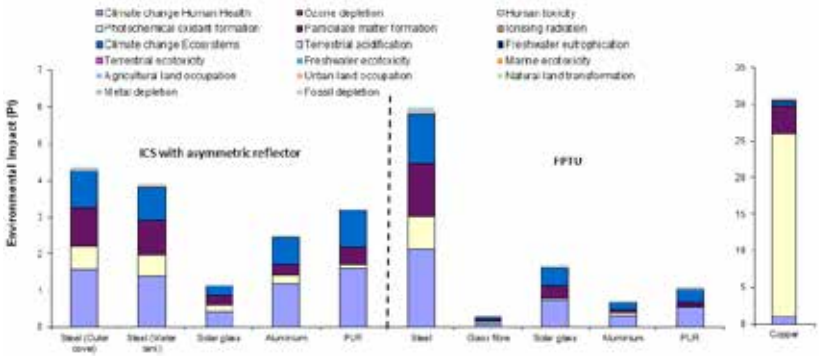
Δεύτερος στόχος της εργασίας είναι η τεχνοοικονομική, ενεργειακή και περιβαλλοντική μελέτη του υπό σχεδίαση ICS συστήματος στο στάδιο χρήσης η οποία γίνεται μέσω κατάλληλων ρουτινών του αλγόριθμου που αναφέρθηκε παραπάνω, στις οποίες γίνεται προσομοίωση της λειτουργίας του υπό σχεδίαση συστήματος σε διαφορετικές κλιματολογικές συνθήκες. Η

βασική καινοτομία της μελέτης είναι ο συνδυασμός της παραπάνω τεχνικής βέλτιστης σχεδίασης της σύνθετης καμπύλης διάταξης του ανακλαστήρα του ICS συστήματος με την τεχνοοικονομική και περιβαλλοντική ανάλυση στο στάδιο χρήσης του. Ο συνδυασμός των παραπάνω οδηγεί στη σχεδίαση και κατασκευή βελτιωμένων συστημάτων περισσότερο αποδοτικών, οικονομικότερων και τα οποία επιβαρύνουν λιγότερο το περιβάλλον.

Στην επόμενη ενότητα (ενότητα 2) παρουσιάζονται οι περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις μαζί με την αντίστοιχη ενέργεια που δαπανάται στα στάδια κατασκευής-εγκατάστασης του αρχικού ICS συστήματος το οποίο χρησιμοποιείται ως πρότυπο για τη μελέτη σχεδίασης. Στην ενότητα 3 παρουσιάζονται οι τεχνοοικονομικοί παράμετροι για τη μελέτη στο στάδιο χρήσης του συστήματος. Στην ενότητα 4 παρουσιάζεται ο αλγόριθμος του πολυκριτήριου προβλήματος βελτιστοποίησης, μαζί με τις εξισώσεις του προβλήματος, ο οποίος χρησιμοποιείται στον καθορισμό της βέλτιστης γεωμετρίας του καμπύλου κατόπτρου καθώς και του ελάχιστου αριθμού ICS συστημάτων που θα τοποθετηθούν στην εκάστοτε οικία που μελετάται ανά περιοχή μελέτης. Στην ίδια ενότητα περιγράφεται η τεχνοοικονομική και περιβαλλοντική μελέτη στο στάδιο χρήσης των υπό σχεδίαση ICS συστημάτων με χρήση υπολογιστικών τεχνικών. Στην ενότητα 5 αποτυπώνονται τα αποτελέσματα του αλγόριθμου, οι περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις και η οικονομική απόδοση του προτεινόμενου ICS συστήματος. Στην τελική ενότητα (ενότητα 6) παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας.

2. ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΒΑΡΥΝΣΕΙΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ICS

Τα βασικά τμήματα του ICS συστήματος είναι: Το εξωτερικό κέλυφος, ο παραβολικός ανακλαστήρας και η δεξαμενή αποθήκευσης με το διπλό τοίχωμα και η οποία λειτουργεί και ως απορροφητής της ηλιακής ενέργειας. Τα στάδια κατασκευής ενός παρόμοιου συστήματος έχουν αναλυθεί σε προηγούμενη εργασία των Arnaoutakis et al. [3] και στην παρούσα εργασία δεν κρίνεται σκόπιμο η αναλυτική παρουσίαση της σύνθετης γεωμετρικής διάταξης. Για την εύρεση του περιβαλλοντικού φορτίου στα στάδια κατασκευής και εγκατάστασης χρησιμοποιείται η μέθοδος της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (Life cycle analysis: LCA) η οποία ακολουθεί τα πρότυπα ISO 14040, 14044 [4], [5] καθώς και το λογισμικό πρόγραμμα SimaPro 8.5 [6] μαζί με τη βάση δεδομένων Ecoinvent 3.4 [7]. Με βάση τα παραπάνω, το περιβαλλοντικό φορτίο (Environmental Impact) στα στάδια κατασκευής και εγκατάστασης του συστήματος του Σχήματος 1 σε σύγκριση με το αντίστοιχο περιβαλλοντικό φορτίο ενός συνήθους FPTU συστήματος (με συλλεκτική επιφάνεια 1.766 m^2 και χωρητικότητα δεξαμενής του νερού 96 λίτρα [1]) παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 1.



Διάγραμμα 1: Περιβαλλοντικό φορτίο στο στάδιο κατασκευής και εγκατάστασης των συστημάτων ICS και FPTU

3. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΙ ΚΑΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΣΤΟ ΣΤΑΔΙΟ ΧΡΗΣΗΣ

Η παραγόμενη θερμική ενέργεια του ICS συστήματος δίνεται από την εξίσωση [8]:

$$Q_{THE_{/Year}} = (\kappa\acute{\varepsilon}\rho\delta\eta) - (\alpha\pi\acute{\omega}\lambda\varepsilon\iota\varepsilon\varsigma) = \sum_{k=1}^{k=12}\{D_k \cdot A \cdot t \cdot [G_m \cdot n_d - U_S \cdot (T_{i,m} - T_{a,m})]\} \quad (1)$$

όπου $Q_{THE_{/Year}}$: ωφέλιμο ενεργειακό κέρδος/έτος (joules/year), G_m: μέση ημερήσια ένταση της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια ανοίγματος του συστήματος (W/m^2), n_d: μέση ημερήσια απόδοση του ηλιακού θερμικού συστήματος, U_S: συντελεστής θερμικών απωλειών δεξαμενής νερού χρήσης (W·m^{-2}·°C^{-1}), $T_{i,m}$: η μέση αρχική θερμοκρασία του νερού χρήσης κατά τη νυκτερινή λειτουργία, $T_{a,m}$: η μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος στη διάρκεια της νυκτερινής λειτουργίας του συστήματος, D_k αριθμός ημερών κάθε μήνα, *A*: επιφάνεια ανοίγματος της ηλιακής συσκευής (m^2) και *k*: δείκτης που αντιστοιχεί σε κάθε μήνα για χρονικό διάστημα ενός έτους λειτουργίας του υπό μελέτη συστήματος. Οι οικονομικοί παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη του ICS συστήματος είναι: η καθαρή παρούσα αξία (NPV: στην εκάστοτε χρηματοπιστωτική μονάδα κάθε χώρας = Ευρώ, δολάρια ή οποιοδήποτε άλλο νόμισμα) και ο χρόνος αποπληρωμής (Payback period: σε έτη) [9], [10].

4. ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ICS ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, στόχος της βέλτιστης σχεδίασης είναι η κατασκευή νέων ICS συστημάτων υψηλότερης απόδοσης από τα υπάρχοντα συστήματα, με μειωμένο κόστος παραγωγής και φιλικότερα στο περιβάλλον. Οι παράμετροι σχεδίασης ενός όμοιου ICS συστήματος έχουν ήδη περιγραφεί από τους Tripanagnostopoulos & Souliotis [1]. Με βάση το Σχήμα 1, το πρόβλημα πολυκριτήριας βελτιστοποίησης περιγράφεται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

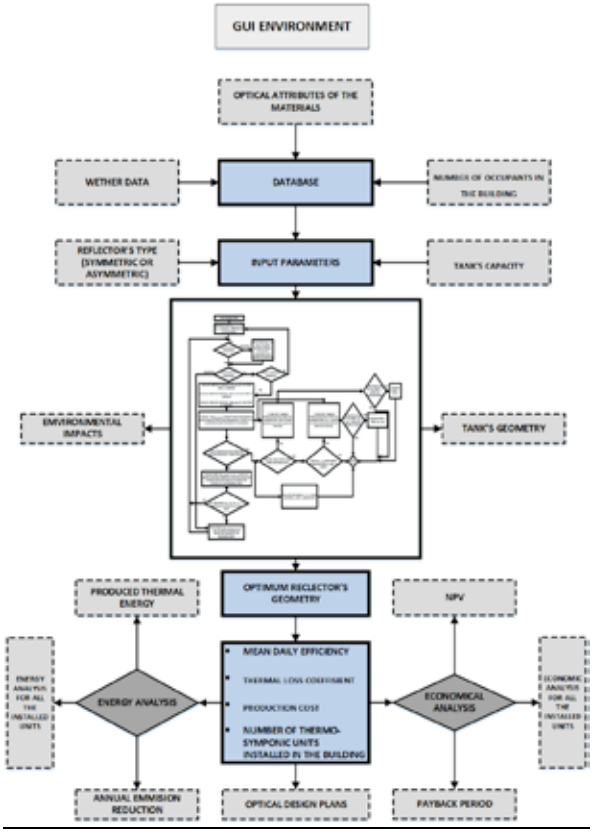
$$\begin{Bmatrix} max[z \cdot n_d(\psi_m, \varphi_m, B, C)] \\ max[-(z \cdot U_S(D,F))] \\ max[-(z \cdot C_p(\psi_m, \varphi_m))] \\ 58.24^o \le \psi_m < 90^o \\ 57.95^o \le \varphi_m < 90^o \\ 0 \le B \le 7.03 \\ 0 \le C \le 4.95 \\ 0 \le D \le 6.08 \\ 0 \le F \le 0.024 \\ 1 \le z \le e \\ 0.74 \le \frac{\left[z\left(Q_{THE_{/Year}}(\psi_m, \varphi_m, B, C, D, F)\right)\right]}{10^6} \le f \cdot 2.02 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

Οι παράμετροι ενός όμοιου προβλήματος έχουν αναλυθεί από τους Arnaoutakis et al. [11]. Οι κυριότερες διαφορές από το προηγούμενο πρόβλημα είναι η ύπαρξη τριών αντικειμενικών συναρτήσεων αντί δύο οι οποίες είναι: Η μέση ημερήσια απόδοση, ο συντελεστής θερμικών απωλειών και το κόστος παραγωγής. Επιπλέον διαφορές είναι ότι το πρόβλημα της βιβλιογραφίας αναφέρεται στη σχεδίαση ενός μόνο ICS συστήματος ενώ επιπλέον οι παράμετροι *B, C, D* και *F* δεν είναι σταθερές αλλά μεταβλητές απόφασης του προβλήματος, οι οποίοι μεταβάλλονται μεταξύ συγκεκριμένων ορίων τα οποία καθορίζονται από προηγούμενες εργασίες [12], [1]. Αυτοί οι παράμετροι μαζί με τους $\underline{\psi_m}$, $\underline{\varphi_m}$ (οι γωνίες $\underline{\psi_m}$, $\underline{\varphi_m}$ καθορίζονται στο Σχήμα 1) αποτελούν τις μεταβλητές απόφασης του πολυκριτήριου προβλήματος που ορίζεται με τις εξισώσεις (2), του οποίου στόχος είναι ο προσδιορισμός της βέλτιστης γεωμετρίας του κατόπτρου του συστήματος ICS του Σχήματος 1 καθώς και του αριθμού των σχεδιαζόμενων μονάδων που θα τοποθετηθούν σε μία κατοικία. Συγκεκριμένα, οι σταθερές *e* και *f* στους περιορισμούς της εξίσωσης (2) εξαρτώνται από τον αριθμό των ατόμων που διαμένουν στην οικία εγκατάστασης του σχεδιαζόμενου ICS συστήματος με στόχο τη μέγιστη απόδοση του συστήματος ή των συστημάτων, αν το πρόβλημα προτείνει περισσότερες από μία σχεδιαζόμενες μονάδες, με ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής του συστήματος ή των συστημάτων, αντίστοιχα. Η βέλτιστη γεωμετρία του κατόπτρου ορίζεται μέσω των διαστάσεων της παραβολικής επιφάνειας οι οποίοι, με βάση το Σχήμα 1 [12], [1], [11] και τη γεωμετρία [13], [14] καθορίζονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$d_{AB,X} = \frac{-R_T\left[1+\left(\frac{3\pi}{2}\right)\cdot sin\psi_m\right]}{1+cos\psi_m}$$
$$d_{AB,Y} = \frac{-R_T\left(\frac{3\pi}{2}\right)\cdot cos\psi_m}{1+cos\psi_m} \quad (3)$$

$$d_{C'A',X} = R_T\left[\frac{\sqrt{2}}{2} - \frac{(2\sqrt{2})\cdot cos\varphi_m}{1+cos\varphi_m}\right]$$
$$d_{C'A',Y} = R_T\left[\frac{\sqrt{2}}{2} + \frac{(2\sqrt{2})\cdot sin\varphi_m}{1+cos\varphi_m}\right] \quad (4)$$

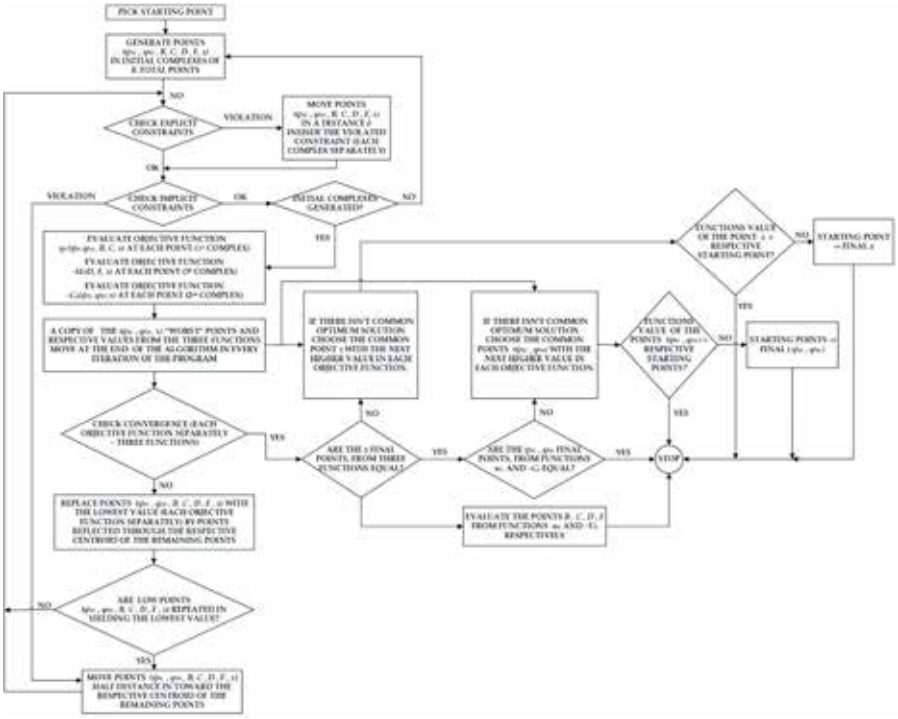
Ο αλγόριθμος του προβλήματος εκτελείται μέσα σε ένα λογισμικό πρόγραμμα το υλοποιείται σε περιβάλλον *Fortran* and *Visual Basic* (Σχήματα 2 και 3). Το πρόγραμμα υποστηρίζει γραφικό περιβάλλον "windows" (Graphical User Interface: GUI) έτσι ώστε να είναι φιλικό στον χρήστη. Επιπροσθέτως, το πρόγραμμα περιέχει μία βάση δεδομένων με διαφορετικά υλικά για την επιφάνεια απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας, τον παραβολικό ανακλαστήρα, τη δεξαμενή του νερού, τη μόνωση και το εξωτερικό κάλυμμα. Στη βάση δεδομένων υπάρχουν έξι πίνακες: οι πέντε είναι για κάθε υλικό που χρησιμοποιείται στη κατασκευή του συστήματος και ο ένας για τις τιμές της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας διάφορων περιοχών της Ελλάδας [15].



Σχήμα 2: Διάγραμμα ροής του GUI περιβάλλοντος

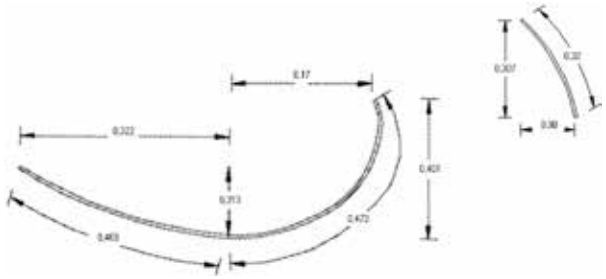
Με βάση την υφιστάμενη βιβλιογραφία [2] ο αλγόριθμος εξετάζει πέντε περιπτώσεις αρχικής συνολικής πίεσης μερικού κενού στο διάκενο μεταξύ των δύο τοιχωμάτων της δεξαμενής του νερού: 86 ± 2 mbar (at 19.5 ± 1 ^{o}C), 245 ± 6 mbar (at 24.0 ± 1 ^{o}C), 490 ± 11 mbar (at 23.0 ± 1 ^{o}C), 670 ± 16 mbar (at 22.0 ± 1 ^{o}C), 790 ± 18 mbar (at 20.0 ± 1 ^{o}C) και 990 ± 23 mbar (at 24 ±

1 °C). Μετά την εκτέλεση του αλγόριθμου του Σχήματος 3 προκύπτουν οι βέλτιστες διαστάσεις των παραβολικών αλλά και των υπόλοιπων τμημάτων του ανακλαστήρα οι οποίες παρουσιάζονται στα Σχήματα 4, 5 και 6.

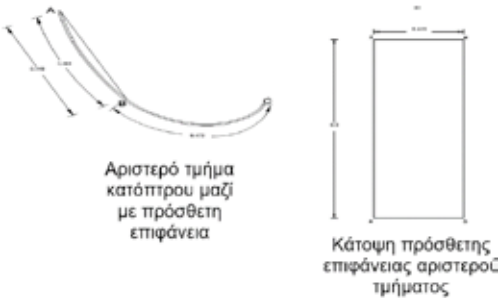


Σχήμα 3: Αναλυτική παρουσίαση του πολυκριτήριου προβλήματος βελτιστοποίησης

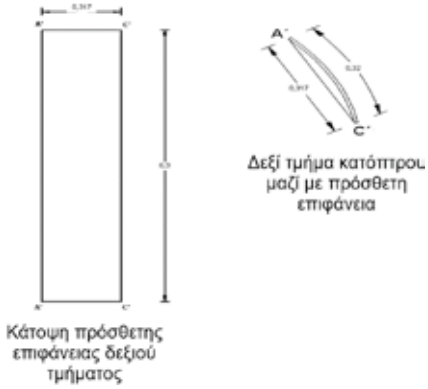
Με τη βοήθεια λογισμικού πακέτου CAD και λαμβάνοντας υπόψη τα στοιχεία της γεωμετρίας σχεδίασης, προκύπτουν για το μη συμμετρικό τμήμα του ανακλαστήρα, οι διαστάσεις μίας πρόσθετης επιφάνειας που τοποθετείται (υποθετικά) στο φύλλο του ανακλαστήρα για τη διαμόρφωση της κλίμακας της παραβολικής επιφάνειας στο περιβάλλον CAD (Σχήματα 5 και 6). Στη συνέχεια το τελικό σχέδιο που προκύπτει (αφού αφαιρεθεί η υποθετική πρόσθετη επιφάνεια στο περιβάλλον CAD) τοποθετείται σε μία εργαλειομηχανή αριθμητικού ελέγχου CNC: Computerized Numerical Control) που χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση και κοπή του παραβολικού φύλλου του ανακλαστήρα.



Σχήμα 4: Βέλτιστες διαστάσεις παραβολικών τμημάτων και συνολικές διαστάσεις κατόπτρου συστήματος ICS με μη συμμετρικό ανακλαστήρα



Σχήμα 5: Πρόσθετη επιφάνεια (γεωμετρικές λεπτομέρειες) για το αριστερό τμήμα του κατόπτρου



Σχήμα 6: Πρόσθετη επιφάνεια (γεωμετρικές λεπτομέρειες) για το δεξιό τμήμα του κατόπτρου

Η τελική επιλογή για τα σχεδιαζόμενα συστήματα ICS (μαζί με την ενεργειακή και περιβαλλοντική ανάλυση για το στάδιο χρήσης), με βάση τον αλγόριθμο του Σχήματος 3 (γίνεται επιλογή από τον αλγόριθμο, μεταξύ των μερικών πιέσεων της δεξαμενής του νερού χρήσης κάθε σχεδιαζόμενου ICS συστήματος, εκείνων που δίνουν τα καλύτερα αποτελέσματα: μεγαλύτερη απόδοση συστήματος ICS με το μικρότερο κόστος παραγωγής), παρουσιάζεται στο πίνακα 1 για περιοχές της Ελλάδας. Για λόγους απλούστευσης ακολουθείται η ακόλουθη κωδικοποίηση: C: Κρήτη, Α: Αθήνα και Τ: Θεσσαλονίκη. Επίσης όσον αφορά τον ελάχιστο αριθμό συστημάτων ICS για μία συνήθη οικία 4 ατόμων ο αλγόριθμός προτείνει τρία ή τέσσερα συστήματα (ανάλογα με τη κλιματική ζώνη στην οποία γίνεται η εγκατάσταση).

Πίνακας 1: Αποτελέσματα περιβάλλοντος GUI για τα σχεδιαζόμενα συστήματα ICS (μαζί με τη προσομοίωση της ενεργειακής και περιβαλλοντικής τους ανάλυσης για το στάδιο χρήσης) για τρεις κλιματικές ζώνες: Κρήτη (Κ), Αθήνα (Α) και Θεσσαλονίκη (Θ)

Αρχική συνολική πίεση (mbar)	Αριθμός ICS			Παραγόμενη ενέργεια (MWh/Year)			Μείωση εκπομπών αερίων (tn CO_2/Year)			Κόστος Παραγωγής (Euros)			Συνολικό πλάτος κατόπτρου (m)		
	Κ	Α	Θ	Κ	Α	Θ	Κ	Α	Θ	Κ	Α	Θ	Κ	Α	Θ
670±16	3	4	4	4.14	4.92	4.89	0.87	1.04	1.04	583.35	835.93	854.27	1.168	1.262	1.39
990±23	3	4	4	4.25	5.12	5.09	0.93	1.04	1.04	593.24	842.96	861.16	1.193	1.295	1.423

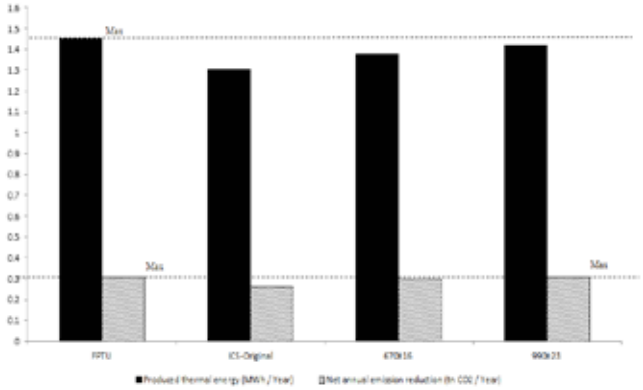
Στη συνέχεια με τη βοήθεια του περιβάλλοντος GUI, αξιοποιώντας τις δυνατότητες του για οικονομική ανάλυση, γίνεται υπολογισμός των οικονομικών συντελεστών για την κλιματική ζώνη της Κρήτης (καλύτερη περίπτωση πίνακα 2), για τα προτεινόμενα από τον αλγόριθμο ICS συστήματα.

Πίνακας 2: Χρόνος Αποπληρωμής και Καθαρή Παρούσα Αξία, για τη καλύτερη περίπτωση σχεδιαζόμενων συστημάτων ICS, που προκύπτουν από τον αλγόριθμό (Κλιματική ζώνη Κρήτης)

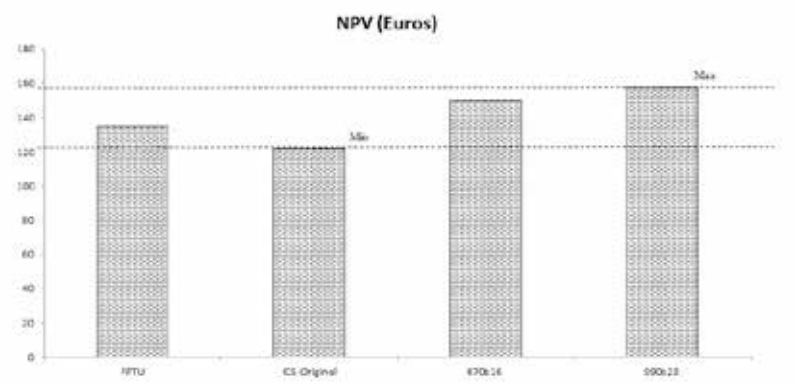
Αρχική συνολική πίεση (mbar)	Χρόνος αποπληρωμής (Years)	Καθαρή Παρούσα Αξία (Euros)
670±16	4.4	149.84
990±23	4.3	157.77

5. ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

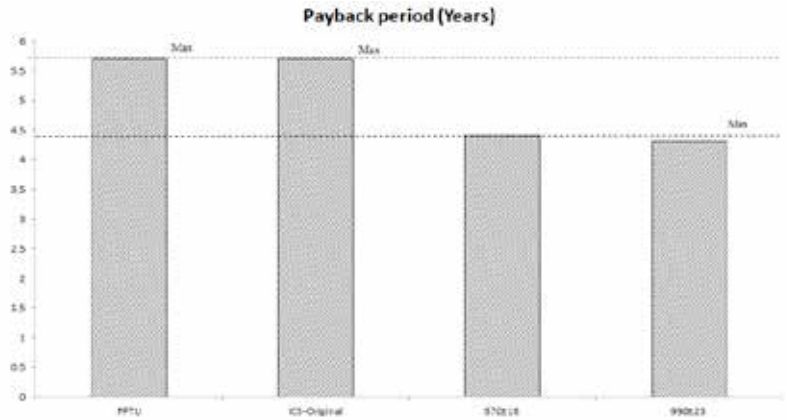
Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα του προηγούμενου κεφαλαίου προκύπτουν τα διαγράμματα των Σχημάτων 7 - 9. Στα διαγράμματα αυτά θα γίνει η σύγκριση μίας μονάδας, από τα σχεδιαζόμενα από τον αλγόριθμο ICS συστήματα, με το FPTU σύστημα που μελετήθηκε ως προς την περιβαλλοντική του συμπεριφορά στην ενότητα, για την περιοχή της Κρήτης (καλύτερη περίπτωση που προκύπτει από τον αλγόριθμο).



Σχήμα 7: Σύγκριση παραγόμενης θερμικής ενέργειας και ετήσιας μείωσης αέριων εκπομπών



Σχήμα 8: Σύγκριση καθαρής παρούσας αξίας



Σχήμα 9: Σύγκριση χρόνου αποπληρωμής

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτήν την εργασία παρουσιάστηκε μια λεπτομερή τεχνοοικονομική και περιβαλλοντική μελέτη καθώς και μια διαδικασία σχεδίασης ICS συστημάτων τα οποία θα χρησιμοποιηθούν για παραγωγή ζεστού νερού σε κατοικίες που βρίσκονται στον Ελλαδικό χώρο. Το πρωτότυπο ICS σύστημα που χρησιμοποιείται σαν βάση στη διαδικασία σχεδίασης είναι ένα σύστημα με ασύμμετρο παραβολικό ανακλαστήρα που φέρει δεξαμενή με διπλό τοίχωμα και μερικό κενό στο μεταξύ των τοιχωμάτων της δεξαμενής διάκενο.

Αρχικά χρησιμοποιείται μία μέθοδος πολυκριτήριας βελτιστοποίησης με στόχο τη βελτίωση της ενεργειακής, οικονομικής και περιβαλλοντικής συμπεριφοράς συστημάτων τέτοιου τύπου. Με τη βοήθεια αυτής της μεθοδολογίας γίνεται η σχεδίαση της παραβολικής επιφάνειας του ανακλαστήρα του ICS συστήματος καθώς και του ελάχιστου αριθμού μονάδων που θα τοποθετηθούν σε μία συνήθη οικία τεσσάρων ατόμων. Σύμφωνα με τη διαδικασία αυτή μεγιστοποιείται η ενεργειακή και περιβαλλοντική απόδοση του συστήματος ενώ ταυτόχρονα ελαχιστοποιείται το κόστος παραγωγής. Τα αποτελέσματα της μεθόδου αυτής παράγουν νέα ICS συστήματα τα οποία μπορούν να προσεγγίσουν την απόδοση των ηλιακών θερμικών συστημάτων με επίπεδο συλλέκτη που έχουν μεγαλύτερο κόστος αγοράς.

Στη συνέχεια η προσομοίωση της τεχνοοικονομικής και περιβαλλοντικής ανάλυσης που γίνεται για το στάδιο χρήσης, για τα «σχεδιαζόμενα» από τον αλγόριθμο συστήματα, αποδεικνύει ότι τα συστήματα αυτά προσεγγίζουν από τη μία την ενεργειακή και

περιβαλλοντική συμπεριφορά, στο στάδιο χρήσης, των FPTU συστημάτων ενώ επιπλέον εμφανίζονται να έχουν μικρότερο κόστος κατασκευής και γενικότερα καλύτερη οικονομική συμπεριφορά στο στάδιο λειτουργίας τους, από τα ανωτέρω ηλιακά θερμικά συστήματα (FPTU).

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία υλοποιήθηκε στο πλαίσιο της Δράσης ΕΡΕΥΝΩ – ΔΗΜΙΟΥΡΓΩ – ΚΑΙΝΟΤΟΜΩ και συγχρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση και εθνικούς πόρους μέσω του Ε.Π. Ανταγωνιστικότητα, Επιχειρηματικότητα & Καινοτομία (ΕΠΑνΕΚ) (κωδικός έργου: Τ1ΕΔΚ-01740).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] M. Souliotis *et al.*, "Heat retaining integrated collector storage solar water heater with asymmetric CPC reflector," *Sol. Energy*, vol. 85, no. 10, pp. 2474–2487, 2011, doi: 10.1016/j.solener.2011.07.005.

[2] M. Souliotis, S. Papaefthimiou, Y. G. Caouris, A. Zacharopoulos, P. Quinlan, and M. Smyth, "Integrated collector storage solar water heater under partial vacuum," *Energy*, vol. 139, pp. 991–1002, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.08.074.

[3] N. Arnaoutakis, M. Souliotis, and S. Papaefthimiou, "Comparative experimental Life Cycle Assessment of two commercial solar thermal devices for domestic applications," *Renew. Energy*, vol. 111, pp. 187–200, 2017, doi: 10.1016/j.renene.2017.04.008.

[4] "ISO - ISO 14040:2006 - Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework." https://www.iso.org/standard/37456.html (accessed Feb. 23, 2020).

[5] "ISO - ISO 14044:2006 - Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines." https://www.iso.org/standard/38498.html (accessed Feb. 23, 2020).

[6] "SimaPro | The World's Leading LCA Software." https://simapro.com/ (accessed May 02, 2020).

[7] "ecoinvent." https://www.ecoinvent.org/ (accessed Feb. 23, 2020).

[8] "Engineering ToolBox." https://www.engineeringtoolbox.com/ (accessed Feb. 14, 2020).

[9] G. C. I. Lin and S. V. Nagalingam, *CIM justification and optimisation*. Taylor & Francis, 2000.

[10] "Theory and Problems in Financial Management : M. Y. Khan : 9780074636831." https://www.bookdepository.com/Theory-Problems-Financial-Management-M-Y-Khan/9780074636831 (accessed Feb. 23, 2020).

[11] N. Arnaoutakis, M. Milousi, S. Papaefthimiou, P. A. Fokaides, Y. G. Caouris, and M. Souliotis, "Life cycle assessment as a methodological tool for the optimum design of integrated collector storage solar water heaters," *Energy*, vol. 182, pp. 1084–1099, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.06.097.

[12] Y. Tripanagnostopoulos and M. Souliotis, "Integrated collector storage solar systems with asymmetric CPC reflectors," *Renew. Energy*, vol. 29, no. 2, pp. 223–248, 2004, doi: 10.1016/S0960-1481(03)00195-2.

[13] "Schaum's mathematical handbook of formulas and tables - PDF Free Download." https://epdf.pub/schaums-mathematical-handbook-of-formulas-and-tablesdc2f86032724919 41b362853bbce940385159.html (accessed Feb. 14, 2020).

[14] J. McCleary, *Geometry from a differentiable viewpoint, second edition*. Cambridge University Press, 2010.

[15] "The Skylighting Guidelines | Build Up." https://www.buildup.eu/en/practices/publications (accessed Feb. 14, 2020).

ΜΙΑ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ ΓΙΑ ΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΗΛΙΑΚΩΝ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Μ. Μιλούση*, Εμμ. Σουλιώτης

Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, Κοζάνη, Ελλάδα

* e-mail: mmilousi@uowm.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το γραμμικό οικονομικό μοντέλο που εφαρμόζεται στις τεχνολογίες των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας θα υπονομεύσει αναπόφευκτα τη βιωσιμότητά τους χωρίς μια αποτελεσματική στρατηγική διαχείρισης του τέλους ζωής τους. Η φιλοσοφία της κυκλικής οικονομίας προσπαθεί να κλείσει το βρόχο της αλυσίδας εφοδιασμού, μειώνοντας την ανάγκη για πρώτες ύλες μέσω του οικολογικού σχεδιασμού και με βάση τις αρχές "μείωση – επαναχρησιμοποίηση – ανακύκλωση".

Από την άλλη πλευρά, παρόλο που η ηλιακή ενέργεια θεωρείται "καθαρή" μορφή ενέργειας, τόσο οι διαδικασίες κατασκευής όσο και η τελική διάθεση των ηλιακών θερμικών συστημάτων σχετίζονται με περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις. Αυτό οφείλεται στην ενέργεια που απαιτείται για την εξαγωγή πρώτων υλών, το σχηματισμό, τη συναρμολόγηση των συλλεκτών καθώς και την τελική τους απόρριψη ή/και ανακύκλωση στο τέλος της ωφέλιμης ζωής τους. Επομένως, είναι απαραίτητο να αξιολογηθούν οι συγκεκριμένες τεχνολογίες για τις έμμεσες περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκαλούν σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής τους.

Ο στόχος της εργασίας είναι να παρουσιάσει μια ολιστική αξιολόγηση του ενεργειακού και περιβαλλοντικού προφίλ ηλιακών θερμικών συστημάτων επίπεδου συλλέκτη και συλλέκτη σωλήνων κενού. Οι δύο τεχνολογίες είναι ευρέως διαθέσιμες και μπορούν να καλύψουν ουσιαστικά σημαντικές θερμικές απαιτήσεις για οικιακές εφαρμογές, ειδικά για παραγωγή ζεστού νερού χρήσης. Προκειμένου να επικυρωθούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των υπό μελέτη τεχνολογιών, εφαρμόστηκε μια Ανάλυση Κύκλου Ζωής από την εξόρυξη πρώτων υλών έως τη χρήση κατασκευής και το τέλος ζωής του εκάστοτε συλλέκτη.

Από περιβαλλοντική άποψη, η εφαρμογή των αρχών οικολογικού σχεδιασμού στις συγκεκριμένες τεχνολογίες μπορεί να συμβάλει είτε στην αύξηση της ανακύκλωσης τους είτε στην εκτεταμένη επαναχρησιμοποίηση επιλεγμένων εξαρτημάτων τους, δημιουργώντας έτσι μια νέα γενιά ηλιακών θερμικών συστημάτων. Επιπλέον, η υιοθέτηση αυτών των αρχών βρίσκεται ακόμη σε αρχικά στάδια και πρέπει να βελτιωθεί καθώς το δυναμικό ανακύκλωσης των ηλιακών συλλεκτών είναι υψηλό λόγω των μεγάλων ποσοτήτων κυρίως μετάλλων από τα οποία αποτελούνται. Επομένως, ο οικολογικός σχεδιασμός και η Ανάλυση Κύκλου Ζωής είναι σημαντικά και συναφή εργαλεία που καθιστούν ικανή την εφαρμογή των αρχών κυκλικής οικονομίας στα ηλιακά θερμικά συστήματα.

Λέξεις Κλειδιά: *Ανάλυση Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ); Κυκλική Οικονομία; Ηλιακά Θερμικά Συστήματα; Οικολογικός Σχεδιασμός*

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ηλιακή ενέργεια αποτελεί καθαρή ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, η οποία μπορεί να αξιοποιηθεί με αρκετούς τρόπους και σε πληθώρα εφαρμογών, αντικαθιστώντας την ενέργεια από ορυκτά καύσιμα. Με δεδομένο ότι η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε θερμότητα, μέσω ηλιακών θερμικών συστημάτων, έχει τυπική απόδοση μεταξύ 40 και 60%, ανάλογα με την επιθυμητή θερμοκρασία λειτουργίας και η αξιοποίησή της για την άμεση παραγωγή θερμότητας αποτελεί την πλέον ενδεδειγμένη ενεργειακά επιλογή. Οι ηλιακές θερμικές τεχνολογίες είναι ευρέως διαδεδομένες και συμβάλλουν σημαντικά στη μείωση της οικιακής ενεργειακής απαίτησης, καθώς ουσιαστικά αφορούν στην παραγωγή ζεστού νερού οικιακής χρήσης και επομένως μπορούν να καλύψουν σημαντικές θερμικές ανάγκες. Όμως παρόλα τα πλεονεκτήματα τους τα παραπάνω συστήματα, πρέπει να τροποποιήσουν τις σχεδιαστικές τους προτεραιότητες, διαφορετικά χωρίς αποτελεσματική διαχείριση στο τέλος του κύκλου ζωής τους, θα υπονομεύσουν αναπόφευκτα τη βιώσιμη κατάστασή τους.

Σημαντικός παράγοντας για την ανάπτυξη των ηλιακών θερμικών συστημάτων είναι η δυνατότητα αξιοποίησης της φθηνής και άφθονης ενέργειας του ηλίου, χρησιμοποιώντας ελάχιστη επιφάνεια συλλογής. Αντίθετα, τόσο η κατασκευή τους όσο και η τελική τους διάθεση συνδέονται με περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις. Αυτό οφείλεται στην ενέργεια που απαιτείται για την εξόρυξη πρώτων υλών, τη συναρμολόγηση του τελικού προϊόντος, καθώς και την τελική διάθεση ή/και ανακύκλωση του συλλέκτη. Γι' αυτό το λόγο είναι απαραίτητο να αξιολογηθούν οι έμμεσες περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκαλούνται από τις διατάξεις σε όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους. Το μεθοδολογικό εργαλείο της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ) έχει χρησιμοποιηθεί σε αρκετές επιστημονικές εργασίες προκειμένου να αποτυπωθεί το περιβαλλοντικό προφίλ ηλιακών θερμικών συστημάτων, μερικές από τις οποίες αποτυπώνονται στην παρούσα εργασία [1]–[7]. Από την άλλη πλευρά, η εφαρμογή των αρχών οικολογικού σχεδιασμού στα ηλιακά θερμικά συστήματα βρίσκεται ακόμη σε αρχικά στάδια και πρέπει να βελτιωθεί, καθώς το δυναμικό ανακύκλωσής τους είναι υψηλό λόγω των μεγάλων ποσοτήτων μετάλλων από τα οποία αποτελούνται.

Στην εργασία, προκειμένου να υπολογιστούν οι περιβαλλοντικές πιέσεις των επιλεγμένων ηλιακών συστημάτων, εφαρμόστηκε η μεθοδολογία της ΑΚΖ από την εξόρυξη πρώτων υλών, στην κατασκευή, τη χρήση και το τέλος ζωής τους. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε συγκριτική τεχνοοικονομική αξιολόγηση για τον ποσοτικό προσδιορισμό της ενεργειακής παραγωγής και του οικονομικού οφέλους που συνδέεται με καθέναν από τους υπό μελέτη ηλιακούς συλλέκτες. Στόχος της συνδυασμένης ανάλυσης των δύο τύπων ηλιακών συλλεκτών ήταν η εκτίμηση κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους, των περιβαλλοντικών και οικονομικών επιπτώσεων τους. Τα συγκεκριμένα συστήματα είναι αποδεδειγμένες τεχνολογίες, με αυξημένη δυνατότητα εξοικονόμησης ενέργειας, μειωμένο κόστος συντήρησης και μικρές περιόδους ολικής αποπληρωμής. Από την άλλη πλευρά, η εφαρμογή του οικολογικού σχεδιασμού σε τέτοιες διατάξεις συμβάλει είτε στην αυξημένη υιοθέτηση λύσεων ανακύκλωσής τους, είτε στην εκτεταμένη επαναχρησιμοποίηση επιλεγμένων εξαρτημάτων τους, κλείνοντας έτσι το βρόχο της αλυσίδας εφοδιασμού τους και μειώνοντας την ανάγκη για πρωτογενή υλικά. Επομένως, ο οικολογικός σχεδιασμός και η ΑΚΖ μπορούν και πρέπει να αποτελούν σημαντικά εργαλεία που συμβάλουν στην εφαρμογή των αρχών της κυκλικής οικονομίας σε ενεργειακά συστήματα.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1. Κυκλική οικονομία

Το σημερινό γραμμικό οικονομικό μοντέλο «λήψη – κατασκευή – διάθεση», το οποίο βασίζεται σε μεγάλες ποσότητες φθηνών και προσβάσιμων υλικών και ενέργειας, βρίσκεται στο επίκεντρο της βιομηχανικής ανάπτυξης. Ωστόσο, η αυξημένη αστάθεια των τιμών, οι κίνδυνοι στην αλυσίδας εφοδιασμού και οι αυξανόμενες πιέσεις από την εξάντληση των πόρων αναγκάζουν τις επιχειρήσεις και τους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής για επανεξέταση της λογικής χρήσης υλικών αλλά και ενέργειας.

Η κυκλική οικονομία στοχεύει να διατηρεί τα προϊόντα, τα συστατικά και τα υλικά στην υψηλότερη χρησιμότητα και αξία τους ανά πάσα στιγμή μέσω εσωτερικών κλειστών βρόχων. Αυτό το νέο οικονομικό μοντέλο αντικαθιστώντας την έννοια του «τέλους της ζωής» με την «αποκατάσταση», μετακινείται προς τη χρήση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, μειώνει στο ελάχιστο τη χρήση τοξικών χημικών ουσιών που επηρεάζουν την επαναχρησιμοποίηση και στοχεύει στην ελαχιστοποίηση παραγωγής αποβλήτων μέσω του βέλτιστου σχεδιασμού υλικών, προϊόντων και συστημάτων.

Προκειμένου να γίνει μετάβαση σε ένα πιο βιώσιμο και αειφόρο σύστημα στο οποίο δεν θα σπαταλιέται τίποτα ή σχεδόν τίποτα, πρέπει να υιοθετηθεί η αρχή ότι τα απόβλητα μπορούν να μετατραπούν σε πρώτες ύλες. Η μετάβαση σε μία κυκλική οικονομία προϋποθέτει αλλαγή της εστίασης στην επαναχρησιμοποίηση, επισκευή, ανανέωση και ανακύκλωση υλικών και προϊόντων, ενώ παράλληλα επιδιώκει να αποσυνδέσει την παγκόσμια οικονομική ανάπτυξη από την πεπερασμένη κατανάλωση πόρων.

Η εφαρμογή των αρχών της κυκλικής οικονομίας σε τεχνολογίες όπως τα ηλιακά θερμικά συστήματα απαιτεί τη συνδυασμένη υλοποίηση δράσεων που εδράζονται στους παρακάτω δύο βασικούς πυλώνες: **i.** Ανάλυση Κύκλου Ζωής, **ii.** Οικολογικός (επανα)σχεδιασμός.

2.2. Ανάλυση Κύκλου Ζωής

Η ΑΚΖ είναι μια διεθνώς αναγνωρισμένη μέθοδος για την ποσοτικοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ενός προϊόντος, μιας διεργασίας ή ενός συστήματος. Πρόκειται για μία μεθοδολογία που πρέπει να χρησιμοποιείται κατά τη σύγκριση των περιβαλλοντικών επιδόσεων (πλεονεκτημάτων και αδυναμιών) και των ενεργειακών τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας, μεταξύ των οποίων και των συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας [4]. Η ιδέα πίσω από μια προοπτική κύκλου ζωής στο πλαίσιο της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι ότι οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της δεν οφείλονται μόνο στην ίδια την διαδικασία παραγωγής, αλλά προέρχονται επίσης από τις αλυσίδες παραγωγής των εγκατεστημένων εξαρτημάτων, των χρησιμοποιούμενων υλικών, των ενεργειακών φορέων και των αναγκαίων υπηρεσιών. Ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής της μελέτης ΑΚΖ, τα στάδια ζωής των συστημάτων παραγωγής ενέργειας μπορούν να περιλαμβάνουν το σύνολο ή μέρος των: **i.** παραγωγή καυσίμου και μεταφορά στο εργοστάσιο, **ii.** κατασκευή εγκαταστάσεων, **iii.** λειτουργία και συντήρηση των εγκαταστάσεων και **iv.** αποσυναρμολόγηση.

Τα πρότυπα ISO 14040-43 αναφέρονται στην ΑΚΖ ως εργαλεία περιβαλλοντικής διαχείρισης και περιγράφουν τα στάδια που εφαρμόζονται για την πλήρη διεξαγωγή μιας ΑΚΖ. Πιο συγκεκριμένα:

- ISO 14040: Αρχές και οριοθέτηση συστήματος [5]
- ISO 14041: Προσδιορισμός στόχου και πεδίου εφαρμογής και απογραφή δεδομένων [6].
- ISO 14042: Αξιολόγηση των επιπτώσεων κύκλου ζωής [7].
- ISO 14043: Ερμηνεία αποτελεσμάτων [8].

Μια μελέτη ΑΚΖ διεξάγεται γενικά με τη συνεχή επανάληψη και διάδραση των τεσσάρων ανωτέρω φάσεων.

2.2.1. Προσδιορισμός στόχου και πεδίου εφαρμογής

Κατά τη διάρκεια του πρώτου βήματος ορίζονται ο στόχος και το πεδίο εφαρμογής της μελέτης καθώς και η επιλογή της λειτουργικής μονάδας και των ορίων του συστήματος. Η ουσιαστική επιλογή και ορισμός των ορίων του συστήματος αποτελούν σημαντικά βήματα σε κάθε ΑΚΖ. Η λειτουργική μονάδα σχετίζεται με τη λειτουργία του προϊόντος και όχι με μια συγκεκριμένη φυσική ποσότητα και είναι συνήθως χρονικά περιορισμένη.

Για τους δύο τύπους ηλιακών συλλεκτών η λειτουργική μονάδα ορίζεται ως η εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας 1 kWh για την παραγωγή ζεστού νερού οικιακής χρήσης μιας τετραμελούς οικογένειας. Τα όρια του συστήματος αντιπροσωπεύουν όλες τις επιπτώσεις από την εξόρυξη και επεξεργασία υλικών, την κατασκευή, τη μεταφορά, τη χρήση και τη διάθεση και για τα δύο ηλιακά συστήματα (εκτός από το βοηθητικό σύστημα θέρμανσης ζεστού νερού), συμπεριλαμβανομένων των διαφόρων τεχνικών στοιχείων, υγρό ανταλλαγής θερμότητας, εγκατάσταση σωλήνων χαλκού, μεταφορά εξαρτημάτων, παράδοση με φορτηγό και τοποθέτηση-στερέωση στην οροφή. Τα κύρια μέρη των συστημάτων μελέτης είναι: **i**. οι ηλιακοί συλλέκτες (με επιφάνεια ανοίγματος 2.32 m^2 και 2.61 m^2 για τον επίπεδο συλλέκτη και το συλλέκτη σωλήνων κενού, αντίστοιχα), **ii**. η δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας χωρητικότητας 200l και **iii**. το σύστημα στερέωσης στην οροφή. Η διάρκεια λειτουργίας θεωρείται ότι είναι 20 χρόνια και για τα δύο συστήματα.

2.2.2. Ανάλυση απογραφής

Στο δεύτερο βήμα, μια ανάλυση απογραφής κύκλου ζωής, εισροών ενέργειας και υλικών και περιβαλλοντικών εκλύσεων, συνίσταται στην αναγνώριση και την ποσοτικοποίηση των εισροών και των εκροών σε κάθε στάδιο του κύκλου ζωής. Επιπλέον, καθορίζονται τα χαρακτηριστικά των διαδικασιών συλλογής δεδομένων και υπολογισμών.

Το πλήρες σύνολο των δεδομένων απογραφής κύκλου ζωής συντάχθηκε σύμφωνα με τις κατευθυντήριες γραμμές ποιότητας της ecoinvent v.3.4 παρέχοντας λεπτομερή και διαφανή δεδομένα

για μια σειρά υλικών και υπηρεσιών που χρησιμοποιούνται στην αλυσίδα παραγωγής των επιλεγμένων διατάξεων και περιλαμβάνεται ήδη στο λογισμικό SimaPro 8.5 που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση της μελέτης AKZ [13].

2.2.3. Αξιολόγηση των επιπτώσεων κύκλου ζωής

Κατά τη διάρκεια του σταδίου εκτίμησης επιπτώσεων, η εκπόνηση των οποίων έχει παραμείνει σκόπιμα ανοικτή από τις κατευθυντήριες γραμμές των ISO, οι δυνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με προσδιορισμένες εισροές και εκλύσεις κατηγοριοποιούνται σε διαφορετικές κατηγορίες επιπτώσεων.

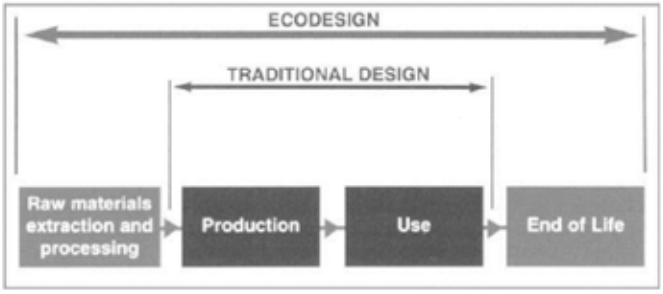
Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση των επιπτώσεων κύκλου ζωής των ηλιακών συλλεκτών ήταν η ReCiPe Midpoint, καθώς παρέχει το πιο εκτεταμένο σύνολο κατηγοριών επιπτώσεων, με στόχο την ανάδειξη του δυναμικού θέρμανσης του πλανήτη και των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, των ορυκτών καυσίμων και των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής που σχετίζονται με κάθε τεχνολογία [14].

2.2.4. Ερμηνεία των αποτελεσμάτων

Στο τελευταίο βήμα, τα αποτελέσματα της ανάλυσης απογραφής και της εκτίμησης των επιπτώσεων ερμηνεύονται και συνδυάζονται, ώστε οι υπεύθυνοι λήψης αποφάσεων να καταλήγουν σε πιο σωστές ετυμηγορίες. Επιπλέον, σε αυτό το σημείο, πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας για την επικύρωση της συνέπειας των αποτελεσμάτων.

2.3. Οικολογικός σχεδιασμός

Ο οικολογικός σχεδιασμός ορίζεται ως η ενσωμάτωση των περιβαλλοντικών πτυχών στον σχεδιασμό και την ανάπτυξη προϊόντων με στόχο τη μείωση των αρνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής τους, διατηρώντας ταυτόχρονα τις λειτουργικές τους ιδιότητες. Αν και αρχικά είχε επικεντρωθεί κυρίως στην ενεργειακή αποδοτικότητα των προϊόντων, πλέον ασχολείται με την αποδοτικότητα των πόρων τους και με κυκλικές οικονομικές εκτιμήσεις όπως δυνατότητα αποκατάστασης και αναβάθμισης, αντοχή και ανακύκλωση. Το σημείο εφαρμογής του εντοπίζεται στα αρχικά στάδια της δημιουργίας του προϊόντος καθώς η αντοχή, η δυνατότητα επισκευής, ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης ενός προϊόντος και των υλικών του, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον αρχικό σχεδιασμό του (Εικόνα 1).



Εικόνα 1: Οικολογικός σχεδιασμός - η ευρύτερη εικόνα [15].

Ο οικολογικός σχεδιασμός (Εικόνα 2) επικεντρώνεται στις ακόλουθες κατηγορίες που πρέπει να χρησιμοποιηθούν ως δομικά στοιχεία για το κλείσιμο των βρόχων ενέργειας και υλικών: **1.** μείωση του αριθμού των διαφορετικών υλικών και επιλογή των καταλληλότερων, **2.** μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων στη φάση παραγωγής, **3.** βελτιστοποίηση της φάσης διανομής, **4.** μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων στη φάση χρήσης, **5.** παράταση της διάρκειας ζωής του προϊόντος, **6.** απλοποίηση της αποσυναρμολόγησης προϊόντων, **7.** σχεδιασμός για επαναχρησιμοποίηση, **8.** σχεδιασμός για ανακύκλωση [16].
Παρακάτω αναφέρονται οι πιθανές βελτιώσεις των ηλιακών θερμικών συστημάτων μέσα από προτεινόμενα σενάρια οικολογικού σχεδιασμού, όπως αυτά υλοποιήθηκαν σε διάφορες επιστημονικές εργασίες. Η ανακύκλωση έχει υιοθετηθεί προκειμένου να επιβεβαιωθούν τα οφέλη της στη περιβαλλοντική απόδοση των ηλιακών θερμικών συστημάτων, καθώς περιλαμβάνουν μεγάλες ποσότητες μετάλλων που έχουν ποσοστό ανάκτησης έως και 90%, π.χ. χάλυβας, χαλκός, αλουμίνιο,

ενώ στην περίπτωση μεικτών υλικών το ποσοστό ανάκτησης μέσω ανακύκλωσης είναι περίπου 60% [3]. Έχει επίσης αναφερθεί η αντικατάσταση κατά τη φάση παραγωγής των σωλήνων χαλκού με γαλβανισμένους χαλύβδινους στο δευτερεύον κύκλωμα του συλλέκτη, και του γυάλινου καλύμματος με πολυκαρβονικό φύλλο πολλαπλών θαλάμων, ενώ αυξήθηκε παράλληλα το ποσοστό χρήσης ανακυκλωμένου αλουμινίου για το πλαίσιο του συλλέκτη [4]. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι το αλουμίνιο, ο χαλκός και ο ανοξείδωτος χάλυβας, είναι τα υλικά με το μεγαλύτερο ποσοστό μάζας σε διατάξεις σαν και αυτές που μελετάμε και επομένως έχουν τη μεγαλύτερη συνεισφορά στη μείωση των επιπτώσεων λόγω της πιθανής ανακύκλωσής τους [5]–[7], [17], [18].

Εικόνα 2: Στρατηγικές οικολογικού σχεδιασμού για το τέλος ζωής προϊόντος.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1. Συνδυασμένη περιβαλλοντική και τεχνοοικονομική ανάλυση

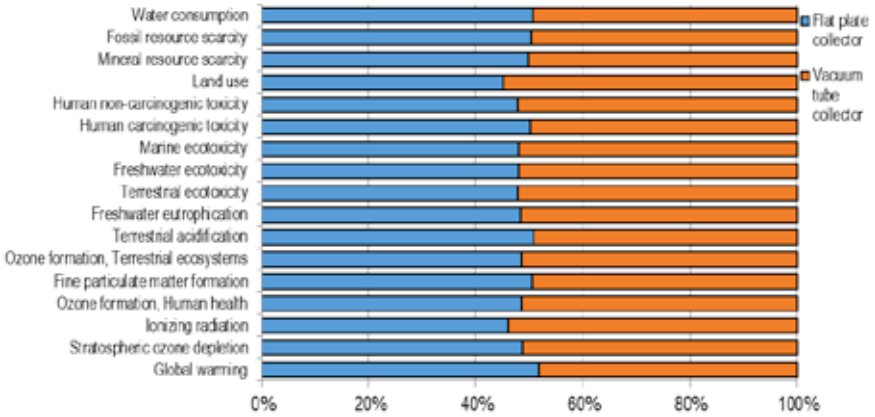
Προκειμένου να επικυρωθούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις, έχει εφαρμοστεί ΑΚΖ (cradle-to-grave) των ηλιακών θερμικών συλλεκτών. Τα δύο συστήματα που μελετήθηκαν είναι: **i.** επίπεδος συλλέκτης και **ii.** συλλέκτης σωλήνων κενού.

3.1.1. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις

Τα αποτελέσματα της περιβαλλοντικής αξιολόγησης για το σύστημα επίπεδου συλλέκτη έδειξαν ότι το 57% και το 27,1% όλων των συνολικών εισροών και εκροών οφείλονταν στην παραγωγή του συλλέκτη και της δεξαμενής αντίστοιχα, ενώ για το σύστημα σωλήνων κενού οι αντίστοιχες τιμές ήταν 45,3% και 34,8%. Έτσι, το στάδιο παραγωγής του συλλέκτη συνέβαλε στο σημαντικότερο μέρος των περιβαλλοντικών επιπτώσεων στον κύκλο ζωής και για τα δύο συστήματα που μελετήθηκαν.

3.1.2. Σύγκριση αποτελεσμάτων Ανάλυσης Κύκλου Ζωής

Ο στόχος της διεξαγωγής μιας μελέτης ΑΚΖ είναι να γίνει μια συγκριτική περιβαλλοντική ανάλυση των ηλιακών συστημάτων με έμφαση στη σύγκριση επίπεδου συλλέκτη και συλλέκτη σωλήνων κενού. Τα αποτελέσματα χρησιμοποιούνται για την επικύρωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του κάθε ηλιακού συστήματος. Στην Εικόνα 3 απεικονίζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα απογραφής ΑΚΖ για τα ηλιακά θερμικά συστήματα που μελετήθηκαν. Πρόκειται για τα αποτελέσματα της ΑΚΖ (για κάθε κατηγορία επιπτώσεων) ανά συνολική ενέργεια που παράγεται, ανά επιφάνεια συλλέκτη (σε kWh/m^2) από κάθε ηλιακό σύστημα. Κατ' αυτόν τον τρόπο, παρέχεται ένας ολιστικός δείκτης αξιολόγησης (δηλαδή περιβαλλοντική επιβάρυνση ανά συνολική παραγόμενη ενέργεια). Είναι σημαντικό να τονιστεί το γεγονός ότι η ηλεκτρική ενέργεια που αναφέρεται παραπάνω σε kWh αντιστοιχεί στην απαραίτητη ενέργεια για τη θέρμανση νερού, η οποία αντικαθίσταται από τη λειτουργία των ηλιακών συλλεκτών που μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε θερμότητα και η οποία μεταφέρεται σε αποθηκευμένο ζεστό νερό στη δεξαμενή τους. Όπως απεικονίζεται παρακάτω, οι σωρευτικές εκπομπές CO_2eq σε όλο τον κύκλο ζωής του ηλιακών θερμικών συστημάτων ήταν αρκετά κοντά, με τιμές να κυμαίνονταν μεταξύ $2{,}22\times10^{-2}$ και $2{,}38\times10^{-2}$ kg CO_2eq/kWh·m^2 και η χαμηλότερη τιμή αντιστοιχούσε στον συλλέκτη σωλήνων κενού (Εικόνα 3).



Εικόνα 3: Συγκριτικά αποτελέσματα AKZ (σχετικές συνεισφορές ανά κατηγορία επιπτώσεων) για τα υπό μελέτη ηλιακά θερμικά συστήματα.

3.1.3. Τεχνοοικονομική ανάλυση

Η συγκριτική τεχνοοικονομική αξιολόγηση της εγκατάστασης των δύο ηλιακών θερμικών συλλεκτών πραγματοποιήθηκε μέσω του RETScreen. Ο χώρος εγκατάστασης επιλέχθηκε να είναι τα η περιοχή των Χανίων στην Κρήτη, ενώ όλα τα μετεωρολογικά δεδομένα (ετήσιες χρονοσειρές μέσων κλιματικών συνθηκών) έχουν εξαχθεί από το ίδιο λογισμικό που αναφέρεται σε μετεωρολογικό σταθμό στα Χανιά. Η ανάλυση αυτή περιλάμβανε τα ακόλουθα διακριτά βήματα: **i.** προσδιορισμό των ετήσιων αναγκών ζεστού νερού για την υπό μελέτη οικία **ii.** επιλογή του βοηθητικού συστήματος θέρμανσης ζεστού νερού, **iii.** επιλογή της τεχνολογίας ηλιακών συλλεκτών (π.χ. επίπεδος και συλλέκτης σωλήνων κενού) και προσδιορισμός των τεχνικών παραμέτρων, **iv.** ενεργειακή ανάλυση (βλέπε συγκεντρωτικά αποτελέσματα στην Εικόνα 3), **v.** οικονομική ανάλυση (Εικόνα 4).

*Εικόνα 4: Αποτελέσματα οικονομικής ανάλυσης: **α.** επίπεδου ηλιακού συλλέκτη, **β.** ηλιακού συλλέκτη σωλήνων κενού.*

Για την οικονομική ανάλυση θεωρήσαμε ότι η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας είναι 0,15€/kWh και η εγκατάσταση χρηματοδοτήθηκε με δικά της μέσα. Οι ανάγκες για ζεστό νερό για μια τυπική οικία μιας

τετραμελούς οικογένειας έχουν εκτιμηθεί σε 2.817kWh ανά έτος. Ως εφεδρικό έχει εξεταστεί ένα βοηθητικό σύστημα θέρμανσης ζεστού νερού με καύση πετρελαίου. Στην Εικόνα 4 έχουν συγκεντρωθεί τα κύρια αποτελέσματα της ανάλυσης RETScreen για τους επιλεγμένους ηλιακούς θερμικούς συλλέκτες. Και τα δύο συστήματα μπορούν να θεωρηθούν ως κορυφαία προϊόντα, ενώ το κόστος αγοράς του συλλέκτη σωλήνων κενού είναι σημαντικά υψηλότερο, δηλαδή 1300€ έναντι 900€.

Ο συντελεστής θερμικών απωλειών, F_rU_L, αυξήθηκε για τον επίπεδο συλλέκτη σε σύγκριση με το σύστημα σωλήνων κενού, δηλαδή 4,6 έναντι 1,7 $(W/m^2)/°C$ αντίστοιχα. Αυτό οφείλεται στο εντελώς διαφορετικό σχέδιο καταστολής θερμικών απωλειών που ακολουθείται σε κάθε σύστημα, το οποίο καθιστά πρακτικά τον κενό συλλέκτη σωλήνων ανεπηρέαστο από τις διακυμάνσεις στη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Επιπλέον, η τιμή του ηλιακού κλάσματος για το σύστημα των σωλήνων κενού ήταν υψηλότερη από τον επίπεδο συλλέκτη (δηλαδή 62,7% έναντι 55,3% αντίστοιχα). Από την άλλη πλευρά, είναι προφανές ότι συνολικά αυτή η παράμετρος δεν διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην ενεργειακή έκβαση των συστημάτων, καθώς τελικά ο επίπεδος συλλέκτης παρείχε ελαφρώς περισσότερη ενέργεια ανά επιφάνεια καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Αυτό οφείλεται κυρίως σε δύο λόγους: **i.** οι καιρικές συνθήκες στην Κρήτη (υψηλής έντασης ηλιακή ακτινοβολία για παρατεταμένες χρονικές περιόδους και με αυξημένες θερμοκρασίες περιβάλλοντος όλο το χρόνο) είναι ευνοϊκές για τα ηλιακά συστήματα και έτσι, η επιπλέον θερμομόνωση και η ικανότητα επίτευξης υψηλών θερμοκρασιών του συστήματος κενού δεν ήταν απαραίτητες, **ii.** η αντλία στο σύστημα κενού απαιτεί περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια λόγω αυξημένης τριβής στο συλλέκτη (πιο σύνθετο σύστημα κυκλοφορίας).

3.2. Οικολογικός σχεδιασμός

Όπως γίνεται αντιληπτό, οι έννοιες της κυκλικής οικονομίας και του οικολογικού σχεδιασμού θα πρέπει να συνδέοντα άρρηκτα μεταξύ τους. Ο οικολογικός σχεδιασμός θα πρέπει να αποτελεί υψίστης σημασίας εργαλείο για τη μετάβαση σε μία κυκλική οικονομία. Ο μακροπρόθεσμος σχεδιασμός ηλιακών συστημάτων θα πρέπει να επικεντρώνεται στις ακόλουθες κατηγορίες – στρατηγικές που θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν ως πυλώνες για το κλείσιμο των βρόγχων ύλης και ενέργειας.

Πίνακας 1: Στρατηγικές οικολογικού σχεδιασμού για ηλιακά συστήματα.

Κατηγορίες	Περιγραφή - Ορισμός	Εφαρμογή σε ηλιακά συστήματα	Αποτέλεσμα - όφελος
Επαναχρησιμοποίηση (Reuse)	Η λήψη ενός υλικού που έχει ήδη χρησιμοποιηθεί και η εκ νέου χρήση του για τον ίδιο σκοπό σε ένα νέο σύστημα.	Η μέση διάρκεια ζωής των σωλήνων χαλκού είναι 50-70 χρόνια. Μετά από αυστηρούς ποιοτικούς ελέγχους, μπορεί να επαναχρησιμοποιηθούν σε νέα ηλιακά συστήματα για τον ίδιο σκοπό. Απαιτεί καθαρισμό και πιθανή επισκευή.	Σημαντική εξοικονόμηση υλικών, εργασίας και κατανάλωσης ενέργειας.
Ανακατασκευή (Remanufacturing)	Πλήρης αποσυναρμολόγηση ολόκληρου του συστήματος, όλα τα μέρη καθαρίζονται καλά, επιθεωρούνται, και συναρμολογούνται εκ νέου. Ευκαιρία να επιστρέψει το προϊόν στον κύκλο ζωής σε κατάσταση «καινούργιου».	Ο σχεδιασμός και τα πρότυπα ποιότητας του συλλέκτη ελέγχονται αυστηρά. Οι ανακατασκευασμένοι συλλέκτες πρέπει να ακολουθούν αυστηρά πρότυπα (π.χ. η πιστοποίηση EN ISO 9806 είναι απαραίτητη για την πώληση ανακατασκευασμένων προϊόντων στο Ηνωμένο Βασίλειο). Κατά μέσο όρο, θα ανακατασκευασθούν 5-7 kg παλιού υλικού για κάθε 1 kg νέου.	Σημαντική εξοικονόμηση στην αγορά υλικών, λιγότερη ενέργεια για την κατασκευή, συμπεριλαμβανομένης της εργασίας και δημιουργία νέας αγοράς-εσόδων (π.χ. σετ επισκευής). Μπορεί να μην έχει θετική αντιμετώπιση από τους καταναλωτές. Πιθανώς να απαιτείται βελτιωμένη αισθητική στα νέα προϊόντα.

Βελτιστοποιημένη ανακατασκευή **(Upward Remanufacturing)**	Μορφή ανακατασκευής που ακολουθεί την ίδια ακριβώς επεξεργασία, εκτός από το ότι εισάγονται στο προϊόν νέα τεχνολογικά προηγμένα τμήματα σε κάποια σημεία του. Προστιθέμενη αξία στο προϊόν, χωρίς απαραίτητα να υπάρχει προσθήκη κόστους (εκτός από το R&D τμήμα).	Απαιτείται συνεχής εξέλιξη στα ηλιακά συστήματα, όπως προσαρμογή σε διαφορετικές κλιματικές συνθήκες (π.χ. παγετός) ή διαφορετικές εφαρμογές (π.χ. συλλέκτες για ηλιακή ψύξη).	Διατήρηση πελατών ή/και μακροπρόθεσμα δημιουργία νέων αγορών με περισσότερους πελάτες. Προσθήκη εσόδων βελτιώνοντας το προϊόν και διατηρώντας παράλληλα χαμηλότερο το εισαγωγικό κόστος.
Ανακύκλωση κλειστού βρόχου **(Closed Loop Recycling)**	Αποσυναρμολόγηση χρησιμοποιούμενων υλικών/τμημάτων με σκοπό την ανακύκλωση για χρήση στο ίδιο ή σε παρόμοιο προϊόν.	Το δυναμικό ανακύκλωσης στα ηλιακά θερμικά συστήματα είναι υψηλό λόγω των μεγάλων ποσοτήτων μετάλλων που περιλαμβάνονται.	Σημαντική εξοικονόμηση υλικών, εργασίας και κατανάλωσης ενέργειας. Μείωση κόστους παραγωγής.
Ανακύκλωση ανοικτού βρόχου **(Open Loop Recycling)**	Αποσυναρμολόγηση χρησιμοποιούμενων υλικών/τμημάτων προκειμένου να παραχθεί ένα εντελώς διαφορετικό προϊόν.	Δημιουργία μεταλλικών υπολειμμάτων (scrap) για άλλες χρήσεις. Τμήματα συσκευασίας (π.χ. κουτιά του απορροφητή) μπορούν να πωλούνται για άλλες χρήσεις.	Δημιουργία νέων πηγών εσόδων.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τη σύγκριση των δύο ηλιακών θερμικών συστημάτων (επίπεδων συλλεκτών και συλλεκτών σωλήνων κενού) προκύπτει ότι σε ότι αφορά στο περιβαλλοντικό προφίλ τους, το στάδιο παραγωγής του απορροφητή συμβάλει στο σημαντικότερο μέρος των επιπτώσεων στον κύκλο ζωής τους (και για τα δύο συστήματα), ενώ δευτερεύοντα ρόλο είχε η παραγωγή της δεξαμενής. Οι δύο τεχνολογίες παρουσίασαν παρόμοιες περιβαλλοντικές επιπτώσεις στις περισσότερες κατηγορίες, αλλά ο συλλέκτης σωλήνων κενού είχε τις υψηλότερες τιμές στις περισσότερες περιπτώσεις. Όσον αφορά στην τεχνοοικονομική αξιολόγηση και τα δύο συστήματα θα μπορούσαν να καλύψουν περισσότερο από το ήμισυ των ετήσιων αναγκών για ζεστό νερό μιας τετραμελούς οικογένειας, καθώς η τιμή του ηλιακού κλάσματος, η οποία ουσιαστικά δηλώνει το ποσοστό των αναγκών ζεστού νερού που καλύπτονται από το σύστημα ετησίως, ήταν ικανοποιητική. Επιπλέον, ο συλλέκτης σωλήνων κενού ήταν πρακτικά ανεπηρέαστος από τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας περιβάλλοντος λόγω του σημαντικά χαμηλότερου συντελεστή θερμικών απωλειών, αλλά αυτό το τεχνικό πλεονέκτημα δεν επηρέασε το τελικό ενεργειακό του αποτέλεσμά. Αυτό συνέβη τόσο λόγω των ευνοϊκών καιρικών συνθηκών στην επιλεγμένη τοποθεσία εγκατάστασης, κάτι που έκανε τον επίπεδο συλλέκτη εξίσου αποδοτικό, όσο και στην αυξημένη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας της αντλίας του. Επιπλέον, το κόστος αγοράς του συλλέκτη σωλήνων κενού είναι σχεδόν 45% υψηλότερο, τονίζοντας έτσι το γεγονός ότι για τις τυπικές εγκαταστάσεις στην Κρήτη το σύστημα επίπεδου συλλέκτη θα πρέπει να είναι η κύρια επιλογή. Ωστόσο, η οικονομική βιωσιμότητα και των δύο συστημάτων αποδείχθηκε εξαιρετική καθώς η απλή περίοδος αποπληρωμής εκτιμάται ότι είναι 2,6 και 3,8 έτη για τον επίπεδο και το συλλέκτη σωλήνων κενού αντίστοιχα. Η εφαρμογή των αρχών του οικολογικού σχεδιασμού, στα ηλιακά θερμικά συστήματα, βρίσκεται ακόμη σε αρχικά στάδια και πρέπει να βελτιωθεί, προκειμένου να μπορούν να ενσωματωθούν στα πρότυπα κυκλικής οικονομίας. Το δυναμικό ανακύκλωσης, σε

ηλιακούς συλλέκτες για οικιακές εφαρμογές, είναι υψηλό, λόγω των μεγάλων ποσοτήτων μετάλλων, που περιλαμβάνονται. Από την άλλη, αυτό το δυναμικό παραμένει ανεκμετάλλευτο. Ο οικολογικός σχεδιασμός, μπορεί να συμβάλει, είτε στην αυξημένη υιοθέτηση της ανακύκλωσης, είτε στην εκτεταμένη επαναχρησιμοποίηση, σε επιλεγμένα συστατικά, ενός ηλιακού θερμικού συλλέκτη νέας γενιάς. Η μελλοντική έρευνα, θα επικεντρωθεί στη διερεύνηση των σχετικών δυνατοτήτων σε βιομηχανικά προϊόντα τα οποία θα ενσωματώνουν προτεινόμενες επιλογές οικολογικού σχεδιασμού.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία υλοποιήθηκε στο πλαίσιο του ερευνητικού έργου με τίτλο: «Εργαλείο ελέγχου λογισμικών διαχείρισης ενέργειας» και ακρωνύμιο: «SECT», ΚΩΔΙΚΟΣ ΠΡΑΞΗΣ (ΕΡΓΟΥ): ΔΕΡ7-0019898 του Επιχειρησιακού Προγράμματος Δυτική Ελλάδα 2014 – 2020 της Δράσης: Ενίσχυση Σχεδίων Έρευνας Ανάπτυξης & Καινοτομίας στον τομέα Προτεραιότητας RIS3 «Ενεργειακές Εφαρμογές».

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] M. Milousi, M. Souliotis, G. Arampatzis, and S. Papaefthimiou, “Evaluating the Environmental Performance of Solar Energy Systems Through a Combined Life Cycle Assessment and Cost Analysis,” *Sustainability*, vol. 11, no. 9, p. 2539, May 2019, doi: 10.3390/su11092539.

[2] N. Arnaoutakis, M. Milousi, S. Papaefthimiou, P. A. Fokaides, Y. G. Caouris, and M. Souliotis, “Life cycle assessment as a methodological tool for the optimum design of integrated collector storage solar water heaters,” *Energy*, vol. 182, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.06.097.

[3] D. Zambrana-Vasquez *et al.*, “Environmental assessment of domestic solar hot water systems: A case study in residential and hotel buildings,” *J. Clean. Prod.*, vol. 88, pp. 29–42, 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.06.035.

[4] J. Albertí *et al.*, “Life Cycle Assessment of a solar thermal system in Spain, eco-design alternatives and derived climate change scenarios at Spanish and Chinese National levels,” *Sustain. Cities Soc.*, vol. 47, May 2019, doi: 10.1016/j.scs.2019.101467.

[5] F.-Z. Morsink-Georgali, A. Kylili, and P. A. Fokaides, “Life Cycle Assessment of Flat Plate Solar Thermal Collectors,” *J. Sustain. Archit. Civ. Eng.*, vol. 21, no. 4, Feb. 2018, doi: 10.5755/j01.sace.21.4.18299.

[6] C. Lamnatou, F. Motte, G. Notton, D. Chemisana, and C. Cristofari, “Building-integrated solar thermal system with/without phase change material: Life cycle assessment based on ReCiPe, USEtox and Ecological footprint,” *J. Clean. Prod.*, vol. 193, pp. 672–683, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.05.032.

[7] F. G. Uctug and A. Azapagic, “Life cycle environmental impacts of domestic solar water heaters in Turkey: The effect of different climatic regions,” *Sci. Total Environ.*, vol. 622–623, pp. 1202–1216, May 2018, doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.12.057.

[8] M. A. Curran, *LCA Methodology, Environmental Life-Cycle Assesment*. New York: Mc-Graw-Hill, 1996.

[9] ISO, “EN ISO 14040, Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework,” 2006.

[10] ISO, “EN ISO 14041, Environmental management - Life cycle assessment - Goal and scope definition and inventory analysis,” 1998.

[11] ISO, “EN ISO 14042, Environmental management-Life cycle assessment-Life cycle impact assessment Management environnemental,” 2000.

[12] ISO, “EN ISO 14043, Environmental management-Life cycle assessment-Life cycle interpretation Management environnemental,” 2000.

[13] “ecoinvent.” https://www.ecoinvent.org/ (accessed Feb. 23, 2020).

[14] M. Goedkoop, R. Heijungs, A. De Schryver, J. Struijs, and R. Van Zelm, “ReCiPe 2008. A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. Characterisation.,” 2013.

[15] P. Calow, L. Holloway, and A. Owen, “Ecodesign from the ground up: taking steps without footprints. A step by step guide to greener product development,” Shot in the Dark, Brighouse, 2001.

[16] R. Wever and J. Vogtlander, *Design for the Value of Sustainability*, Springer S. Springer, 2014.

[17] R. M. Saint, F. Pomponi, C. Garnier, and J. I. Currie, “Whole-life design and resource reuse of a solar water heater in the UK,” *Proc. Inst. Civ. Eng. Eng. Sustain.*, vol. 172, no. 3, pp. 153–164, Jul. 2018, doi: 10.1680/jensu.17.00068.

[18] B. Greening and A. Azapagic, “Domestic solar thermal water heating: A sustainable option for theUK?,” *Renew. Energy*, vol. 63, pp. 23–36, Mar. 2014, doi: 10.1016/j.renene.2013.07.048.

ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΟΧΙΑΚΩΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΘΕΡΜΑΝΣΗ (SCOP) ΣΕ ΑΝΤΛΙΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΑΕΡΑ – ΝΕΡΟΥ

Γ. Α. Μουζεβίρης[1], Κ.Τ. Παπακώστας,

[1]Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, ΑΠΘ

541 24 Θεσσαλονίκη, e-mail:gmouzeviris@gmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα συστήματα θέρμανσης με αντλίες θερμότητας αέρα-νερού αποτελούν μία πολύ καλή επιλογή για κτίρια του οικιακού και του τριτογενούς τομέα. Η τεχνολογία τους είναι ώριμη και αξιόπιστη, έχουν υψηλούς βαθμούς απόδοσης, λειτουργούν σε ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών, έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν θέρμανση και ζεστό νερό χρήσης, και για τη λειτουργία τους χρησιμοποιούν ΑΠΕ (ενέργεια από αέρα, νερό ή έδαφος). Η απόδοσή τους επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, όπως το κλίμα της περιοχής, η θερμοκρασία προσαγωγής του νερού στο δίκτυο θέρμανσης, το θερμικό φορτίο σχεδιασμού του κτιρίου, το σύστημα ελέγχου της αντλίας θερμότητας (ΑΘ) και του συστήματος θέρμανσης, και η τεχνολογία συμπιεστή της ΑΘ. Κάθε ένας από αυτούς τους παράγοντες έχει μια διαφορετική επίδραση στον εποχιακή απόδοση των ΑΘ και επομένως στη χρήση πρωτογενούς ενέργειας και στις εκπομπές CO_2.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η παρουσίαση μιας λεπτομερούς συγκριτικής ανάλυσης των εποχιακών συντελεστών αποδοτικότητας σε θέρμανση (Seasonal Coefficient of Performance, SCOP) ΑΘ αέρα-νερού, οι οποίες είναι διαθέσιμες στην ελληνική αγορά. Το δείγμα περιλαμβάνει συνολικά 100 μοντέλα, σε ένα εύρος θερμικής ισχύος έως 50kW, από 12 κατασκευαστικές εταιρείες. Η συγκριτική ανάλυση γίνεται με βάση: α) τις τεχνικές προδιαγραφές των διαφόρων μοντέλων που δίνονται στα τεχνικά εγχειρίδια της κάθε εταιρείας, β) το κλίμα της τοποθεσίας που είναι εγκατεστημένη η ΑΘ, γ) τη θερμοκρασία προσαγωγής του νερού στο σύστημα θέρμανσης και δ) το σύστημα ελέγχου της ΑΘ και του συστήματος θέρμανσης (με αντιστάθμιση ή χωρίς αντιστάθμιση). Για τον υπολογισμό του εποχιακού βαθμού απόδοσης ακολουθήθηκε η μεθοδολογία που ορίζει το πρότυπο EN14825 και χρησιμοποιήθηκε ειδικό λογισμικό, το οποίο αναπτύχθηκε με βάση αυτή τη μεθοδολογία.

Τα αποτελέσματα της εργασίας δείχνουν τον βαθμό επίδρασης του κλίματος της περιοχής, της θερμοκρασίας προσαγωγής του νερού, του συστήματος ελέγχου καθώς επίσης και της θερμικής ισχύος στον SCOP των διαφόρων μοντέλων που παρέχουν οι κατασκευαστές ΑΘ αέρα-νερού. Θέτοντας ως κριτήριο την τιμή SCOP≥3, η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε σε τέσσερις αντιπροσωπευτικές πόλεις των κλιματικών Ζωνών Α, Β, Γ και Δ της Ελλάδας δείχνει ότι υπάρχουν πολλά μοντέλα ΑΘ που εκπληρώνουν αυτό το κριτήριο και μάλιστα ο αριθμός του αυξάνει από τα ψυχρότερα στα θερμότερα κλίματα, σε συνδυασμό με χαμηλότερες θερμοκρασίες νερού προσαγωγής στο σύστημα θέρμανσης και σε συστήματα με λειτουργία αντιστάθμισης. Επίσης, η ανάλυση δείχνει ότι η μείωση της θερμοκρασίας νερού προσαγωγής καθώς επίσης και η εφαρμογή της λειτουργίας της αντιστάθμισης αυξάνουν τον εποχιακό βαθμό απόδοσης από 2%÷27%, ανάλογα με τη θερμοκρασία του νερού στο σύστημα θέρμανσης, την κλιματική ζώνη και την τεχνολογία συμπιεστή της ΑΘ. Τα αποτελέσματα μπορούν να ληφθούν υπόψη σε ενεργειακές μελέτες και στο σχεδιασμό συστημάτων θέρμανσης κτιρίων, δεδομένου ότι εξάγονται με κλιματικά δεδομένα διαφόρων περιοχών της Ελλάδος.

Λέξεις κλειδιά: αντλίες θερμότητας, συστήματα θέρμανσης, εποχιακός συντελεστής αποδοτικότητας SCOP, εξοικονόμηση ενέργειας, πρότυπο EN14825

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Καθώς εκτυλίσσεται ο 21ος αιώνας, οι κυβερνητικές πολιτικές σε όλο σχεδόν τον κόσμο επικεντρώνονται όλο και περισσότερο στην αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και στοχεύουν στη μείωση των εκπομπών CO_2. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ), οι προτεραιότητες της ενεργειακής πολιτικής τα τελευταία χρόνια είναι η χαμηλότερη εξάρτηση από ορυκτά καύσιμα, με παρεπόμενο τη μείωση των εκλυόμενων ρύπων από την καύση τους, η βελτίωση στην ενεργειακή αποδοτικότητα, και η βιωσιμότητα στην κατανάλωση ενέργειας με αύξηση της συμμετοχής των ΑΠΕ στην τελική κατανάλωση ενέργειας. Ένας από τους σημαντικότερους καταναλωτές ενέργειας, και από τους κύριους συντελεστές των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου (GHG), είναι ο κτιριακός τομέας. Το 2018, στα κτίρια της ΕΕ καταναλώθηκε περίπου το 40.8% της συνολικής τελικής κατανάλωσης ενέργειας [1]. Για το ίδιο έτος, στα κτίρια του οικιακού τομέα, η θέρμανση χώρων και η παραγωγή ζεστού νερού χρήσης αντιπροσώπευαν το 63.6% και 14.8% αντίστοιχα της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας [2]. Επίσης το 2019 στην Ελλάδα, τα κτίρια συμμετείχαν στην τελική κατανάλωση ενέργειας με ποσοστό 40.6% (26.7% και 13.9% για τα κτίρια κατοικιών και τριτογενή τομέα αντίστοιχα) [1]. Ένας μεγάλος αριθμός μελετών έχει δείξει ότι ο κτιριακός τομέας προσφέρει μεγάλες δυνατότητες για εξοικονόμηση ενέργειας. Η κατασκευή και ανακαίνιση κτιρίων με προηγμένες τεχνικές σχεδιασμού και χρήση κατάλληλων υλικών, η ενεργειακή αναβάθμιση συστημάτων θέρμανσης και ψύξης και η επέκταση της χρήσης τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, είναι μέτρα που μπορούν να ελαχιστοποιήσουν την κατανάλωση ενέργειας, να βελτιώσουν την ενεργειακή απόδοση και να μειώσουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.

Στην πορεία προς τα έτη 2030 και 2050, η ΕΕ έχει θέσει φιλόδοξους στόχους για τη μείωση της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας από ορυκτά καύσιμα και των σχετικών εκπομπών CO_2 [3], [4], [5]. Για την επίτευξη αυτών των στόχων, η ΕΕ εισήγαγε μια σειρά οδηγιών [6], [7], [8], [9], [10], [11] που επιβάλλουν τη σημαντική μείωση της χρήσης ενέργειας τόσο σε νέα όσο και σε παλιά κτίρια και προωθούν την ενσωμάτωση τεχνολογιών θέρμανσης, αερισμού και κλιματισμού υψηλής απόδοσης που χρησιμοποιούν για τη λειτουργία τους ΑΠΕ. Ιδιαίτερα η [11] στοχεύει στην επιτάχυνση της ενεργειακής αναβάθμισης των υπαρχόντων κτιρίων, με στόχο ένα κτιριακό απόθεμα με μηδενικό ανθρακικό αποτύπωμα έως το 2050.

Είναι πολύ πιθανό, από κάποια χρονική στιγμή στο μέλλον και μετά, το δίκτυο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας να είναι πλήρως «απανθρακοποιημένο» και η ενέργεια που θα χρησιμοποιείται από τα μελλοντικά συστήματα θέρμανσης και κλιματισμού στα κτίρια να προέρχεται όλο και περισσότερο από ηλεκτρική ενέργεια παραγόμενη από ΑΠΕ, όπως ηλιακά φωτοβολταϊκά συστήματα, αιολικά πάρκα και υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις, ενώ η ενέργεια από την καύση ορυκτών καυσίμων να τείνει να μηδενισθεί. Επίσης, η διεύρυνση της εφαρμογής προγραμμάτων εξοικονόμησης ενέργειας και ενεργειακής αναβάθμισης κτιρίων, με οικονομικά κίνητρα από κυβερνητικές υπηρεσίες και φορείς, και η ανάπτυξη της αγοράς των κτιρίων σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας (ΚΣΜΚΕ), θα οδηγήσει στη συνεχή και μεγάλη μείωση των θερμικών φορτίων σχεδιασμού κτιρίων, με αποτέλεσμα σε πολλές περιπτώσεις να είναι δύσκολο (ή αδύνατο) να βρεθούν συσκευές παραγωγής θερμότητας με υγρά ή αέρια καύσιμα που δεν θα είναι σημαντικά υπερδιαστασιολογημένες για αυτά τα φορτία, και επομένως θα λειτουργούν με μειωμένο βαθμό απόδοσης.

Η ελληνική και ευρωπαϊκή αγορά θέρμανσης και ψύξης θα επηρεαστεί από αυτές τις τάσεις και τις συνθήκες. Η αυξανόμενη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας θα συντελέσει στη διάδοση των αντλιών θερμότητας (ΑΘ) και την εγκατάστασή τους σε συστήματα θέρμανσης και ψύξης κτιρίων. Οι σημερινές ΑΘ είναι συσκευές με υψηλούς βαθμούς απόδοσης, χωρίς επιβλαβείς εκπομπές ρύπων τοπικά, οικονομικά ανταγωνιστικές εάν λάβει κανείς υπόψη του το χαμηλό λειτουργικό τους κόστος σε σχέση με άλλα συστήματα θέρμανσης, η τεχνολογία τους είναι ώριμη και αξιόπιστη [12], και μπορούν να συμβάλουν σημαντικά στην επίτευξη των στόχων της ΕΕ. Το μεγαλύτερο ποσοστό της θερμότητας που παρέχουν προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές (αέρα, νερό και έδαφος) ενώ με την «απανθρακοποίηση» της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας θα θεωρούνται ως συσκευές που λειτουργούν αποκλειστικά με ΑΠΕ. Επιπλέον, οι ΑΘ έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιούν ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται επί τόπου στα κτίρια.

Οι ΑΘ αέρα-νερού είναι ο τύπος των συσκευών παραγωγής θερμότητας που αναμένεται να αντικαταστήσει ευρέως τους λέβητες πετρελαίου ή φυσικού αερίου στα συμβατικά συστήματα θέρμανσης, ειδικά στα κτίρια των μεγαλουπόλεων, όπου η εγκατάσταση ΑΘ εδάφους-νερού παρουσιάζει μεγάλες δυσκολίες. Με τη σταδιακή μείωση των θερμικών φορτίων των κτιρίων, λόγω της

ενεργειακής αναβάθμισης, οι ΑΘ προσφέρουν περισσότερες επιλογές σε εύρος θερμικής ισχύος που μπορούν να συνδυαστούν με τα χαμηλότερα φορτία θέρμανσης. Γενικά, οι ΑΘ αέρα-νερού μπορούν να λειτουργούν σε ένα ευρύ φάσμα εξωτερικών θερμοκρασιών, έχουν χαμηλό κόστος λειτουργίας σε χαμηλές θερμοκρασίες ζεστού νερού, το μέγεθός τους είναι μικρό και εγκαθίστανται εύκολα με σχετικά χαμηλό κόστος. Με την εγκατάσταση θερμικής αποθήκευσης στα συστήματα θέρμανσης και ψύξης, θα μπορούν να λειτουργούν σε συνθήκες υψηλού βαθμού απόδοσης [13] και να γεφυρώνουν τις διαφορές μεταξύ της παραγωγής και της χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας, λειτουργώντας ως θερμικές μπαταρίες. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η αγορά των ΑΘ αναμένεται να αναπτυχθεί με ταχύ ρυθμό. Σύμφωνα με πρόσφατα στατιστικά στοιχεία [14], ο αριθμός των μονάδων ΑΘ αέρα-νερού που πωλήθηκαν το 2018 στην Ευρώπη (ΕΕ-28) ήταν 21.5% υψηλότερος σε σύγκριση με εκείνες του έτους 2017.

Η αποδοτικότητα των ΑΘ χαρακτηρίζεται από τους συντελεστές απόδοσης στη λειτουργία θέρμανσης COP και στη λειτουργία ψύξης EER. Οι συντελεστές COP και το EER αντιπροσωπεύουν στιγμιαίες τιμές που μετριούνται σε συνθήκες λειτουργίας σταθερής κατάστασης σε εργαστηριακό περιβάλλον και μεταβάλλονται ανάλογα με τη θερμοκρασία της πηγής και του αποδέκτη θερμότητας. Μία λεπτομερής καταγραφή και σύγκριση των συντελεστών COP και EER σε σχέση με τη θερμική και ψυκτική ισχύ και τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ θερμικής πηγής και αποδέκτη, βασισμένη στα τεχνικά χαρακτηριστικά 308 διαφορετικών μοντέλων ΑΘ αέρα-νερού και 122 μοντέλων εδάφους-νερού που διατίθενται στην ελληνική αγορά, δίνεται στην [5].

Η εποχιακή αποδοτικότητα κατά τη χειμερινή και θερινή περίοδο δίνεται από τον εποχιακό συντελεστή απόδοσης στη λειτουργία θέρμανσης (SCOP) και τον εποχιακό συντελεστή απόδοσης στη λειτουργία ψύξης (SEER) αντίστοιχα [5]. Οι εποχιακοί συντελεστές απόδοσης υπολογίζονται λαμβάνοντας υπόψη μια σειρά εξωτερικών παραγόντων, όπως η θερμοκρασία του αέρα του περιβάλλοντος, το θερμικό ή ψυκτικό φορτίο του κτιρίου, οι θερμοκρασίες προσαγωγής του μέσου θέρμανσης ή ψύξης καθώς και το σύστημα ελέγχου της ΑΘ και του συστήματος θέρμανσης [4]. Η επίδραση του κλίματος, της τεχνολογίας συμπιεστή, της υπερ- ή υποδιαστασιολόγησης της ΑΘ σε σχέση με το θερμικό φορτίο του κτιρίου και του συστήματος ελέγχου στους εποχιακούς συντελεστές απόδοσης ΑΘ έχουν μελετηθεί από διάφορους ερευνητές στο εξωτερικό [15, 16, 17, 18,19] και στην Ελλάδα [4], [20].

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η παρουσίαση μιας λεπτομερούς συγκριτικής ανάλυσης των εποχιακών συντελεστών απόδοσης σε θέρμανση (Seasonal Coefficient of Performance, SCOP) ΑΘ αέρα-νερού, οι οποίες είναι διαθέσιμες στην ελληνική αγορά. Το δείγμα περιλαμβάνει συνολικά 100 μοντέλα από 12 κατασκευαστικές εταιρείες. Η συγκριτική ανάλυση γίνεται με βάση: α) τις τεχνικές προδιαγραφές των διαφόρων μοντέλων που δίνονται στα τεχνικά εγχειρίδια της κάθε εταιρείας, β) το κλίμα της τοποθεσίας που είναι εγκατεστημένη η ΑΘ, γ) τη θερμοκρασία προσαγωγής του νερού στο σύστημα θέρμανσης και δ) το σύστημα ελέγχου της ΑΘ και του συστήματος θέρμανσης. Για τον υπολογισμό του εποχιακού βαθμού απόδοσης ακολουθήθηκε η μεθοδολογία που ορίζει το πρότυπο EN14825 [21] και χρησιμοποιήθηκε ειδικό λογισμικό, το οποίο αναπτύχθηκε με βάση αυτή τη μεθοδολογία. Η εργασία αποτελεί μια επέκταση και επικαιροποίηση της εργασίας [4], αλλά και μία πιο αναλυτική διερεύνηση της συσχέτισης των εποχιακών βαθμών απόδοσης τόσο με όλες τις παραμέτρους που προαναφέρθηκαν όσο και με με τη θερμική ισχύ των ΑΘ. Οι εταιρείες που επιλέχθηκαν είναι αλφαβητικά: Carrier [19], Climaveneta [4], Daikin [16], DeDietrich [5], Hitachi [5], LG [10], Mitsubishi [7], Rhoss [7], Stiebel Eltron [6], Toshiba [7], Trane [7] και York [7].

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ - ΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Ως εποχιακός βαθμός απόδοσης μιας ΑΘ σε θέρμανση (SCOP) ορίζεται ο λόγος της συνολικής ενέργειας (σε θερμικές kWh) που παρέχει η ΑΘ στο σύστημα θέρμανσης προς την συνολική ετήσια ενέργεια (σε kWh ηλεκτρικής ενέργειας) που καταναλώνεται για τη λειτουργία της θέρμανσης, και αποτελεί έναν δείκτη του λειτουργικού κόστους της ΑΘ [4], [20], [21]. Η μεθοδολογία υπολογισμού του SCOP περιγράφεται αναλυτικά σε προηγούμενη εργασία των συγγραφέων [20]. Για την εφαρμογή της μεθοδολογίας απαιτούνται κατάλληλα κλιματικά δεδομένα, τα οποία είναι η συχνότητα εμφάνισης της εξωτερικής θερμοκρασίας (της περιοχής στην οποία είναι εγκατεστημένη η ΑΘ) σε διάφορα θερμοκρασιακά διαστήματα με εύρος 1K ή 2K. Το πρότυπο EN14825 χωρίζει την Ευρώπη σε 3 κλιματικές ζώνες, τη θερμή, την μέση και την ψυχρή, με θερμοκρασίες σχεδιασμού 2°C, -10°C και -22°C αντίστοιχα, και δίνει τις συχνότητες εμφάνισης των θερμοκρασιών για τις τρεις αυτές ζώνες. Η Ελλάδα κατατάσσεται στη θερμή ζώνη, και σύμφωνα με το πρότυπο για τον υπολογισμό του SCOP σε όλες τις κλιματικές της ζώνες θα έπρεπε να χρησιμοποιηθούν τα κλιματικά δεδομένα της θερμής ζώνης. Παρόλα αυτά, έχει αποδειχτεί από διάφορες μελέτες [4], [22] ότι συγκρίνοντας τα

αποτελέσματα υπολογισμού του SCOP με χρήση των κλιματικών δεδομένων του προτύπου με τα αντίστοιχα που προκύπτουν με πραγματικά κλιματικά δεδομένα διάφορων περιοχών, προκύπτουν σε πολλές περιπτώσεις μεγάλες αποκλίσεις. Πιο συγκεκριμένα στις περιοχές με πιο ήπιο κλίμα (Ηράκλειο, Αθήνα) ο μέσος εποχιακός βαθμός απόδοσης σε θέρμανση παρουσιάζεται αυξημένος κατά 5% σε σχέση με αυτόν που προκύπτει από το πρότυπο, ενώ στις περιοχές με πιο ψυχρό κλίμα (Θεσσαλονίκη, Φλώρινα) διαπιστώνονται αποκλίσεις από 8% έως 28%. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν τα κλιματικά δεδομένα τεσσάρων πόλεων, αντιπροσωπευτικών των τεσσάρων κλιματικών ζωνών ([23], [24], [25], [26]) στις οποίες είναι χωρισμένη η Ελλάδα (ζώνη Α, Β, Γ και Δ) [27]. Οι πόλεις αυτές είναι η Ιεράπετρα (ζώνη Α), η Αθήνα (ζώνη Β), η Θεσσαλονίκη (ζώνη Γ) και η Φλώρινα (ζώνη Δ) με θερμοκρασίες σχεδιασμού στη θέρμανση 7°C, 2°C, -2°C και -7.5°C αντίστοιχα [28].

Όταν η θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα είναι ίση με τη θερμοκρασία σχεδιασμού, το θερμικό φορτίο του κτιρίου ισούται με το φορτίο σχεδιασμού (100% του φορτίου), ενώ όταν η θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα είναι ίση με τη θερμοκρασία ισορροπίας (T_{bal}=16°C) το θερμικό φορτίο του κτιρίου ισούται με μηδέν. Με βάση την παραδοχή ότι το θερμικό φορτίο έχει γραμμική σχέση με την εξωτερική θερμοκρασία του αέρα, μπορεί να υπολογιστεί η χρονική διάρκεια λειτουργίας του συστήματος θέρμανσης (ώρες), κατά την οποία το θερμικό φορτίο του κτιρίου είναι μεγαλύτερο ή ίσο ενός ποσοστού του φορτίου σχεδιασμού. Στον πίνακα 1, δίνονται στοιχεία σχετικά με τη χρονική διάρκεια της περιόδου θέρμανσης και το θερμικό φορτίο σχεδιασμού για τις 4 πόλεις. Στις στήλες 1 και 2, δίνονται τα θερμοκρασιακά διαστήματα (bin) και η μέση τιμή του κάθε διαστήματος αντίστοιχα, στη στήλη 3 η συχνότητα εμφάνισης (h) της εξωτερικής θερμοκρασίας στο κάθε θερμοκρασιακό διάστημα, στη στήλη 4 το ποσοστό [%] του φορτίου σχεδιασμού και στη στήλη 5 οι ώρες, στις οποίες το θερμικό φορτίο του κτιρίου είναι μεγαλύτερο ή ίσο από το αντίστοιχο ποσοστό του φορτίου σχεδιασμού της στήλης 4.

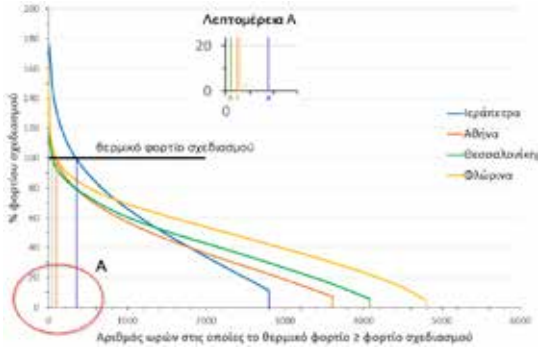
Πίνακας 1: Χρονική διάρκεια (h) στην οποία το θερμικό φορτίο του κτιρίου είναι μεγαλύτερο ή ίσο του αντίστοιχου ποσοστού του φορτίου σχεδιασμού για τις 4 αντιπροσωπευτικές πόλεις

		ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ (T_{des}=7°C)			ΑΘΗΝΑ (T_{des}=2°C)			ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ (T_{des}=-2°C)			ΦΛΩΡΙΝΑ (T_{des}=-7,5°C)		
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[3]	[4]	[5]	[3]	[4]	[5]	[3]	[4]	[5]
Bin [°C]	Μέσο Bin [°C]	[h]	[%] θερμικού φορτίου σχεδιασμού	Θερμικό φορτίο ≥ [%] φορτίου σχεδιασμού [h]	[h]	[%] θερμικού φορτίου σχεδιασμού	Θερμικό φορτίο ≥ [%] φορτίου σχεδιασμού [h]	[h]	[%] θερμικού φορτίου σχεδιασμού	Θερμικό φορτίο ≥ [%] φορτίου σχεδιασμού [h]	[h]	[%] θερμικού φορτίου σχεδιασμού	Θερμικό φορτίο ≥ [%] φορτίου σχεδιασμού [h]
-18/-16	-17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	140.4	**1**
-16/-14	-15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	131.9	**3**
-14/-12	-13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6	123.4	**9**
-12/-10	-11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15	114.9	**24**
-10/-8	-9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	28	106.4	**52**
-8/-6	-7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	69	97.9	121
-6/-4	-5	-	-	-	2	150,0	**2**	10	116.7	**10**	128	89.4	249
-4/-2	-3	-	-	-	4	135.7	**6**	22	105.6	**32**	226	80.9	475
-2/0	-1	-	-	-	6	121.4	**12**	54	94.4	86	357	72.3	832
0/2	1	22	166.7	**22**	36	107.1	**48**	171	83.3	257	481	63.8	1313
2/4	3	34	144.4	**56**	100	92.9	148	300	72.2	557	569	55.3	1882
4/6	5	93	122.2	**149**	215	78.6	363	407	61.1	964	591	46.8	2473
6/8	7	197	100,0	346	379	64.3	742	582	50,0	1546	584	38.3	3057
8/10	9	374	77.8	720	552	50,0	1294	697	38.9	2243	555	29.8	3612
10/12	11	571	55.6	1291	725	35.7	2019	670	27.8	2913	496	21.3	4108
12/14	13	724	33.3	2015	824	21.4	2843	628	16.7	3541	407	12.8	4515
14/16	15	781	11.1	2796	766	7.1	3609	536	5.6	4077	282	4.3	4797

Στην εικόνα 1 απεικονίζονται τα θερμικά φορτία σχεδιασμού [%] για τις 4 πόλεις και το αντίστοιχο χρονικό διάστημα [h] που παρατηρούνται, όπως προκύπτουν από τις δύο τελευταίες στήλες του πίνακα 1 (στήλη 4 και 5) για κάθε πόλη. Το εμβαδόν που περικλείεται από την καμπύλη και τους δύο άξονες του διαγράμματος είναι ανάλογο της συνολικής ενέργειας που απαιτείται για θέρμανση σε μία χειμερινή περίοδο. Τις ώρες στις οποίες το ποσοστό του φορτίου είναι μικρότερο ή ίσο του 100%, οι ανάγκες για θέρμανση καλύπτονται από την λειτουργία της ΑΘ, ενώ για ποσοστά μεγαλύτερα του 100% καλύπτονται από τη βοηθητική πηγή θέρμανσης (π.χ. ηλεκτρικές αντιστάσεις). Στην περίπτωση της πόλης της Ιεράπετρας το εμβαδόν της περιοχής που αντιστοιχεί σε ποσοστό φορτίου σχεδιασμού μεγαλύτερο του 100% είναι το 5.3% του συνολικού εμβαδού. Είναι χαρακτηριστικό ότι στις υπόλοιπες πόλεις (Αθήνα, Θεσσαλονίκη και Φλώρινα) τα αντίστοιχα ποσοστά είναι αισθητά μικρότερα (0.7%, 0.3% και 0.4% αντίστοιχα). Επίσης, στην περίπτωση της Ιεράπετρας το σύνολο των ωρών κάτω από θερμοκρασία σχεδιασμού της θέρμανσης είναι ίσο με 346 h (εικόνα 1, σημείο Α), το οποίο είναι ιδιαίτερα μεγάλο σε σχέση με τα αντίστοιχα των άλλων τριών πόλεων (98, 59 και 104 h για την Αθήνα, Θεσσαλονίκη και Φλώρινα αντίστοιχα) (σημεία Γ, Δ και Β αντίστοιχα).

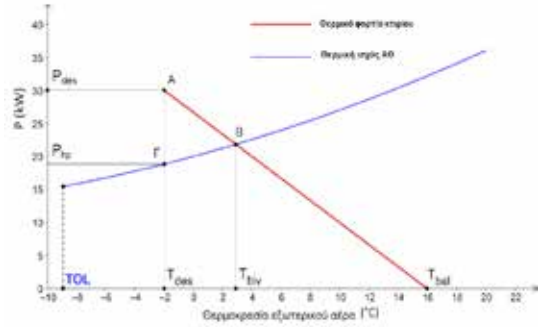
Βέβαια, τα κλιματικά δεδομένα είναι αποτέλεσμα στατιστικής επεξεργασίας κλίματος μεγάλων χρονικών περιόδων, και δεν σημαίνει ότι οι θερμοκρασίες αυτές παρατηρούνται κάθε χρόνο, αλλά είναι

πιθανόν να παρατηρηθούν σε κάποια χρονιά με δριμύ χειμώνα. Οι δύο αυτές παρατηρήσεις έχουν σημασία όπως θα φανεί από τα αποτελέσματα αυτής της εργασίας.



Εικόνα 1: Διάρκεια θερμαντικής περιόδου [h] ανά πόλη και αριθμός ωρών ≥ από το θερμικό φορτίο σχεδιασμού

Στην εικόνα 2 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα τυπικής καμπύλης θερμικής ισχύος ΑΘ (μπλε γραμμή) με την αντίστοιχη καμπύλη θερμικού φορτίου του κτιρίου (κόκκινη γραμμή), για θερμοκρασία σχεδιασμού (T_{des}) ίση με -2°C και με θερμοκρασία ισορροπίας (T_{bal}) ίση με 16°C. Στην T_{des} το αντίστοιχο θερμικό φορτίο (P_{des}) είναι 30kW, ενώ στην ίδια θερμοκρασία η θερμική ισχύς της ΑΘ (P_{hp}) είναι 18KW (σημείο Γ). Το υπόλοιπο θερμικό φορτίο (12kW), κάτω από τη θερμοκρασία στο σημείο Β, καλύπτεται με τη λειτουργία των ηλεκτρικών αντιστάσεων. Η θερμοκρασία στην οποία η ΑΘ καλύπτει το 100% του θερμικού φορτίου (σημείο Β) ονομάζεται δίτιμη θερμοκρασία (bivalent temperature - T_{biv}) και στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι περίπου ίση με 3°C. Όταν η θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα είναι μεγαλύτερη της T_{biv}, η θερμική ισχύς της ΑΘ είναι μεγαλύτερη του θερμικού φορτίου του κτιρίου και η ΑΘ λειτουργεί σε μερικό φορτίο είτε προσαρμόζοντας τη θερμική της ισχύ στο απαιτούμενο θερμικό φορτίο (ΑΘ με συμπιεστή inverter) είτε με τη λειτουργία έναυσης-παύσης (ΑΘ με συμπιεστή σταθερών στροφών), ή και ρυθμίζοντας τη θερμοκρασία του νερού προσαγωγής (λειτουργία με αντιστάθμιση). Επιπρόσθετα, η καμπύλη της θερμικής ισχύος της ΑΘ σταματάει σε μία ελάχιστη θερμοκρασία (TOL – operation limit temperature), κάτω από την οποία η αποδιδόμενη θερμική ισχύς της ΑΘ ισούται με μηδέν. Στην παρούσα εργασία, για τον υπολογισμό του SCOP έγινε η παραδοχή ότι το φορτίο σχεδιασμού του κτιρίου/θερμικής ζώνης σε κάθε περίπτωση μελέτης ισούται με τη μέγιστη αποδιδόμενη θερμική ισχύ της ΑΘ. Δηλαδή, η θερμική ισχύς της ΑΘ σε κάθε περίπτωση επιλέγεται ίση με το θερμικό φορτίο σχεδιασμού του κτιρίου και η βοηθητική πηγή θέρμανσης (ηλεκτρικές αντιστάσεις) λειτουργεί μόνο στην περίπτωση που η θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα είναι μικρότερη της T_{des} . Επομένως, σύμφωνα με τα δεδομένα που παρουσιάζονται στην εικόνα 1 και στον πίνακα 1, ένα σύστημα θέρμανσης με ΑΘ αέρα νερού είναι πιθανό να λειτουργήσει με ηλεκτρικές αντιστάσεις για το 5.3%, 0.7%, 0.3% και 0.4% των ωρών της χειμερινής περιόδου αντίστοιχα στην Ιεράπετρα, Αθήνα, Θεσσαλονίκη και Φλώρινα.



Εικόνα 2: Τυπική καμπύλη θερμικού φορτίου κτιρίου και θερμικής ισχύος ΑΘ

3. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται σε αυτή την εργασία στηρίζονται σε δεδομένα που συλλέχτηκαν από τα τεχνικά εγχειρίδια 100 μοντέλων ΑΘ από 12 εταιρείες κατασκευής. Το μέγεθος της θερμικής ισχύος των ΑΘ του δείγματος κυμαίνεται από 2kW έως 50kW, ενώ από τα 100 μοντέλα του δείγματος τα 58 έχουν συμπιεστή σταθερών στροφών (fixed capacity) και τα 42 μεταβαλλόμενων στροφών (inverter). Από τα τεχνικά εγχειρίδια καταγράφηκαν η αποδιδόμενη θερμική ισχύς (W), η απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύς (W) και ο αντίστοιχος συντελεστής αποδοτικότητας σε θέρμανση (COP), σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα και τη θερμοκρασία εξόδου του νερού από την ΑΘ. Στον πίνακα 2 παρουσιάζονται αναλυτικά οι εταιρείες με τα αντίστοιχα μοντέλα τους.

Πίνακας 2: Εταιρείες κατασκευής, τύποι ΑΘ και ο αριθμός των μοντέλων που μελετήθηκαν

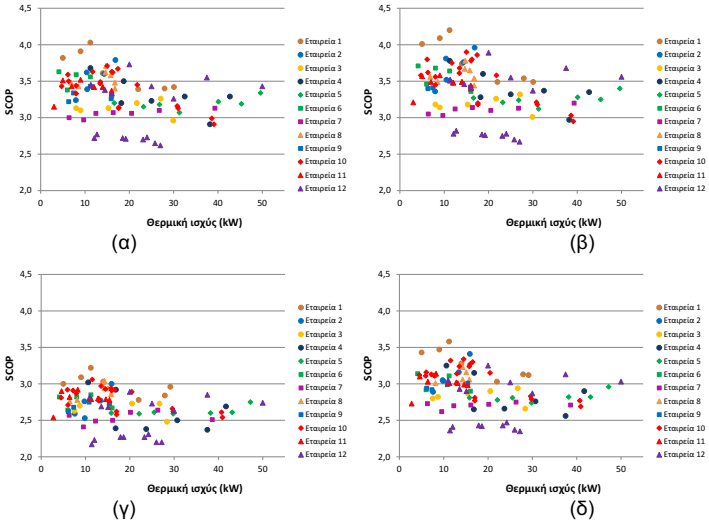
ΕΤΑΙΡΕΙΑ	ΤΥΠΟΣ (αριθμός μοντέλων)	ΕΤΑΙΡΕΙΑ	ΤΥΠΟΣ (αριθμός μοντέλων)
CARRIER	30AWH (7)	HITACHI	RHUE(5)
	30RQ (3)	LG	AHUW (10)
	30RQA (3)	MITSUBISHI	PUHZ (7)
	30RQV (1)	RHOSS	THAETY (3)
	38AW (5)		THAITY (2)
CLIMAVENETA	AWRMTD2 (4)		THCETY (2)
DAIKIN	ERHQ (3)	STIEBEL ELTRON	WPL (6)
	EUWP (4)	TOSHIBA	HWS (7)
	EUWYN 4)	TRANE	CXA (6)
	EWYQ (5)		FLEX (1)
DEDIETRICH	AWHP (5)	YORK	YLHA (7)

4. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

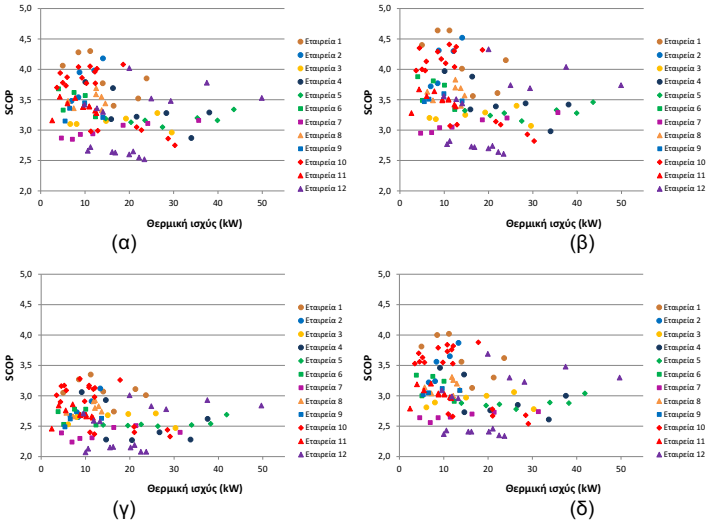
Στις εικόνες 3 έως 6 απεικονίζονται οι τιμές του SCOP σε συνάρτηση με τη θερμική ισχύ των ΑΘ του δείγματος για τίς πόλεις Ιεράπετρα, Αθήνα, Θεσσαλονίκη και Φλώρινα αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται θεωρώντας θερμοκρασία νερού προσαγωγής στο σύστημα θέρμανσης 35°C και 45°C και σύστημα ελέγχου της θερμοκρασίας προσαγωγής με ή χωρίς αντιστάθμιση. Επίσης, στον πίνακα 3 δίδεται το εύρος και ο μέσος όρος των τιμών SCOP ανάλογα με την τεχνολογία συμπιεστή των ΑΘ, ενώ στους πίνακες 4 έως 7 τα αποτελέσματα παρουσιάζονται αναλυτικά ανά εταιρεία για τις 4 πόλεις.

Για τα κλιματικά δεδομένα της Ζώνης Α (Ιεράπετρα) οι τιμές του SCOP κυμαίνονται από 2.17 έως 4.2 ανάλογα με τη θερμοκρασία προσαγωγής του νερού στο σύστημα θέρμανσης, το σύστημα ελέγχου (με ή χωρίς αντιστάθμιση) και την τεχνολογία συμπιεστή. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση των ΑΘ με θερμική ισχύ έως και 20kW, ο SCOP κυμαίνεται από 2.71 έως 4.2 για θερμοκρασία νερού προσαγωγής 35°C και από 2.17 έως 3.58 για θερμοκρασία 45°C. Η διακύμανση του SCOP για τις ΑΘ με θερμική ισχύ από 20kW έως και 50kW είναι από 2.62 έως 3.68 και από 2.2 έως 3.15 για θερμοκρασία προσαγωγής 35°C και 45°C αντίστοιχα.

Για τα κλιματικά δεδομένα της Ζώνης Β (Αθήνα) οι τιμές του SCOP, όπως δείχνει η εικόνα 4, κυμαίνονται από 2.08 έως 4.64. Για ΑΘ με θερμική ισχύ έως και 20kW, ο SCOP κυμαίνεται από 2.6 έως 4.64 για θερμοκρασία νερού προσαγωγής 35°C και από 2.1 έως 4.02 για θερμοκρασία 45°C, ενώ για ΑΘ με θερμική ισχύ από 20kW έως και 50kW οι τιμές του SCOP κυμαίνονται από 2.52 έως 4.15 και από 2.08 έως 3.62 για θερμοκρασία νερού προσαγωγής 35°C και 45°C αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι οι μέγιστες τιμές του SCOP είναι μεγαλύτερες στην περίπτωση της Αθήνας από τις αντίστοιχες στην Ιεράπετρα, παρόλο που το κλίμα στην Ιεράπετρα είναι σαφώς ηπιότερο. Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, το παράδοξο αυτό στην περίπτωση της Ιεράπετρας οφείλεται στον ιδιαίτερα αυξημένο αριθμό ωρών, στις οποίες η θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα είναι μικρότερη της θερμοκρασίας σχεδιασμού (T_{des}), με αποτέλεσμα η ΑΘ να λειτουργεί πολύ μεγαλύτερο χρονικό διάστημα (σε σχέση με την περίπτωση της Αθήνας) με ηλεκτρικές αντιστάσεις, προκαλώντας μείωση στον εποχιακό βαθμό απόδοσής της. Σύμφωνα με τα συμπεράσματα της [20], οι ΑΘ στην περίπτωση της Ιεράπετρας θα έπρεπε να επιλεγούν με θερμική ισχύ που αντιστοιχεί σε θερμοκρασία μικρότερη από την T_{des} ώστε να αυξηθεί ο αριθμός των ωρών λειτουργίας της ΑΘ και να μειωθεί η λειτουργία των ηλεκτρικών αντιστάσεων (το ίδιο ισχύει για όλες τις περιοχές στις οποίες το κλίμα τους έχει αυτά τα χαρακτηριστικά).

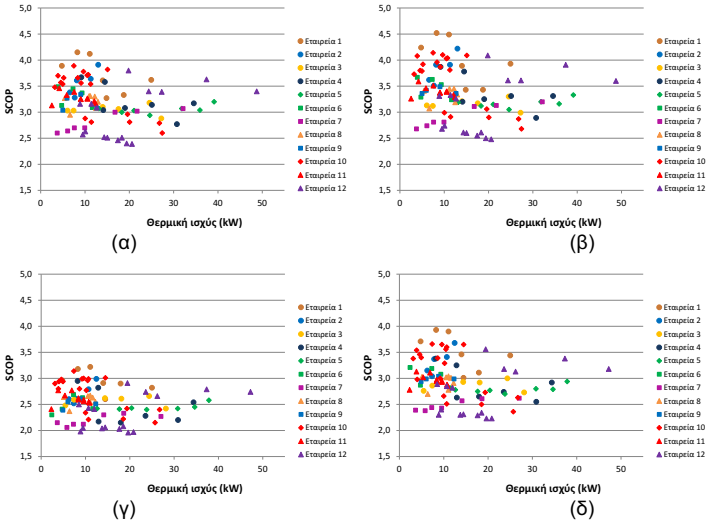


Εικόνα 3: Εποχιακός βαθμός απόδοσης σε θέρμανση (SCOP) σε συνάρτηση με τη θερμική ισχύ (ανά εταιρεία) για την πόλη της Ιεράπετρας: α) $T_{προσ}$ = 35°C - χωρίς αντιστάθμιση, β) $T_{προσ}$ = 35°C - με αντιστάθμιση, γ) $T_{προσ}$ = 45°C - χωρίς αντιστάθμιση, δ) $T_{προσ}$ = 45°C - με αντιστάθμιση



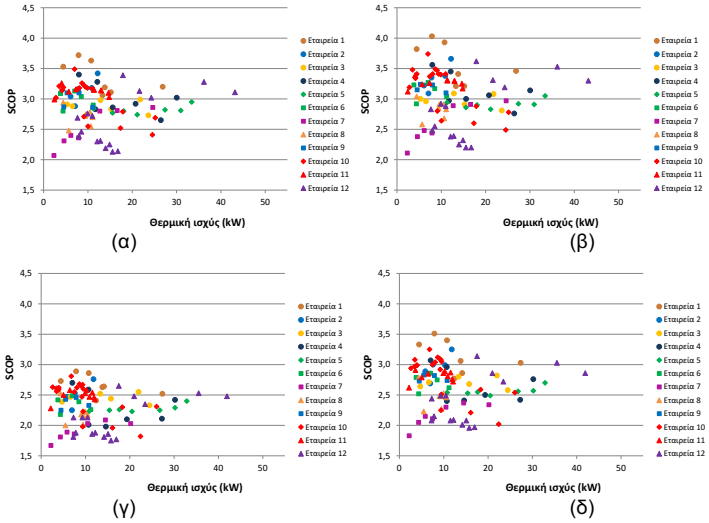
Εικόνα 4: Εποχιακός βαθμός απόδοσης σε θέρμανση (SCOP) σε συνάρτηση με τη θερμική ισχύ (ανά εταιρεία) για την πόλη της Αθήνας: α) $T_{προσ}$ = 35°C - χωρίς αντιστάθμιση, β) $T_{προσ}$ = 35°C - με αντιστάθμιση, γ) $T_{προσ}$ = 45°C - χωρίς αντιστάθμιση, δ) $T_{προσ}$ = 45°C - με αντιστάθμιση

Στην περίπτωση της Θεσσαλονίκης (κλιματική ζώνη Γ) οι τιμές του SCOP κυμαίνονται από 1.97 έως 4.52 ανάλογα με τη θερμοκρασία προσαγωγής του νερού στο σύστημα θέρμανσης, το σύστημα ελέγχου και την τεχνολογία συμπιεστή. Στην περίπτωση των ΑΘ με θερμική ισχύ έως και 20kW, ο SCOP κυμαίνεται από 2.40 έως 4.52 για θερμοκρασία νερού προσαγωγής 35°C και από 1.96 έως 3.93 για θερμοκρασία 45°C. Η διακύμανση του SCOP για τις ΑΘ με θερμική ισχύ από 20kW έως και 50kW είναι από 2.39 έως 3.93 και από 1.97 έως 3.44 για θερμοκρασία προσαγωγής 35°C και 45°C αντίστοιχα.



Εικόνα 5: Εποχιακός βαθμός απόδοσης σε θέρμανση (SCOP) σε συνάρτηση με τη θερμική ισχύ (ανά εταιρεία) για την πόλη της Θεσσαλονίκης: α) $T_{προσ}$ = 35°C - χωρίς αντιστάθμιση, β) $T_{προσ}$ = 35°C - με αντιστάθμιση, γ) $T_{προσ}$ = 45°C - χωρίς αντιστάθμιση, δ) $T_{προσ}$ = 45°C - με αντιστάθμιση

Τέλος, στην περίπτωση της Φλώρινας (κλιματική ζώνη Δ) οι τιμές του SCOP κυμαίνονται από 1.67 έως 4.03. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση των ΑΘ με θερμική ισχύ έως και 20kW, ο SCOP κυμαίνεται από 2.07 έως 4.03 και από 1.67 έως 3.51 για θερμοκρασία νερού προσαγωγής 35°C και 45°C αντίστοιχα. Η διακύμανση του SCOP για τις ΑΘ με θερμική ισχύ από 20kW έως και 50kW είναι από 2.41 έως 3.53 και από 1.82 έως 3.03 για θερμοκρασία προσαγωγής 35°C και 45°C αντίστοιχα.



Εικόνα 6: Εποχιακός βαθμός απόδοσης σε θέρμανση (SCOP) σε συνάρτηση με τη θερμική ισχύ (ανά εταιρεία) για την πόλη της Φλώρινας: α) $T_{προσ}$ = 35°C - χωρίς αντιστάθμιση, β) $T_{προσ}$ = 35°C - με αντιστάθμιση, γ) $T_{προσ}$ = 45°C - χωρίς αντιστάθμιση, δ) $T_{προσ}$ = 45°C - με αντιστάθμιση

Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα, για τιμές θερμικής ισχύος έως 20 kW, για τα κλιματικά δεδομένα και των 4 πόλεων, παρατηρείται ένα μεγαλύτερο εύρος τιμών SCOP καθώς και μεγαλύτερες μέγιστες τιμές σε σχέση με την περιοχή θερμικής ισχύος από 20 έως 50 kW. Αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία γιατί στην περίπτωση των κτιρίων με χαμηλά θερμικά φορτία (π.χ. κτίρια σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας – ΚΣΜΚΕ/nZEB) ή διαμερισμάτων στα οποία θα εγκατασταθούν ΑΘ αέρα-νερού, υπάρχει η δυνατότητα, με σωστή έρευνα αγοράς, να βρεθούν μοντέλα ΑΘ με υψηλό βαθμό απόδοσης.

Στον πίνακα 3 δίνονται το εύρος και ο μέσος όρος του SCOP, για θερμοκρασία νερού προσαγωγής 35°C και 45°C και σύστημα ελέγχου με αντιστάθμιση (Μ.Α.) ή χωρίς αντιστάθμιση (Χ.Α.), με μία επιπλέον πληροφορία, δηλαδή την τεχνολογία συμπιεστή των ΑΘ. Όπως φαίνεται από τις τιμές του πίνακα, οι ΑΘ με συμπιεστή μεταβαλλόμενων στροφών (inverter) παρουσιάζουν αυξημένη μέση τιμή του SCOP κατά 12%, 21%, 19% και 14% στην περίπτωση της Ιεράπετρας, της Αθήνας, της Θεσσαλονίκης και της Φλώρινας αντίστοιχα, σε σχέση με τον αντίστοιχο SCOP των ΑΘ με συμπιεστή σταθερών στροφών. Επιπρόσθετα, οι τιμές αυτές εμφανίζονται ακόμη μεγαλύτερες στην περίπτωση συστήματος ελέγχου Μ.Α. (14%, 23%, 21% και 16% αντίστοιχα). Βέβαια, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, ο υπολογισμός του SCOP έγινε με βάση την παραδοχή ότι το φορτίο σχεδιασμού του κτιρίου σε κάθε περίπτωση μελέτης ισούται με την μέγιστη αποδιδόμενη θερμική ισχύ της ΑΘ. Ο SCOP των ΑΘ με συμπιεστή σταθερών στροφών θα μπορούσε να βελτιωθεί εάν η ΑΘ επιλεγόταν με αποδιδόμενη θερμική ισχύ μικρότερη του φορτίου σχεδιασμού του κτιρίου, διότι σύμφωνα με την [20], στην περίπτωση υποδιαστασιολόγησης της ΑΘ με συμπιεστή σταθερών στροφών, ο SCOP παρουσιάζεται αυξημένος έως και 4%, τουλάχιστον στις 4 αυτές πόλεις. Είναι αντικείμενο μελλοντικής έρευνας να δειχθεί ότι αυτό ισχύει και για τα κλιματικά δεδομένα και άλλων περιοχών στην Ελλάδα.

Πίνακας 3: Εύρος εποχιακού βαθμού απόδοσης σε θέρμανση (SCOP) για ΑΘ με συμπιεστή σταθερών και μεταβαλλόμενων στροφών

ΣΥΜΠΙΕΣΤΗΣ	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΝΕΡΟΥ *	ΕΛΕΓΧΟΣ **	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ		ΑΘΗΝΑ		ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ		ΦΛΩΡΙΝΑ	
			min ÷ max	μ.ο.	min ÷ max	μ.ο.	min ÷ max	μ.ο.	min ÷ max	μ.ο.
ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΣΤΡΟΦΩΝ	35°C	Χ.Α.	2.62 ÷ 3.63	3.16	2.52 ÷ 3.68	3.12	2.39 ÷ 3.49	2.99	2.07 ÷ 3.26	2.77
		Μ.Α.	2.67 ÷ 3.71	3.22	2.61 ÷ 3.88	3.24	2.48 ÷ 3.67	3.12	2.11 ÷ 3.39	2.88
	45°C	Χ.Α.	2.17 ÷ 2.92	2.59	2.07 ÷ 2.86	2.49	1.96 ÷ 2.77	2.37	1.67 ÷ 2.60	2.21
		Μ.Α.	2.35 ÷ 3.14	2.80	2.34 ÷ 3.34	2.83	2.23 ÷ 3.21	2.73	1.83 ÷ 2.91	2.50
INVERTER	35°C	Χ.Α.	3.24 ÷ 4.03	3.54	3.30 ÷ 4.30	3.74	2.95 ÷ 4.15	3.53	2.48 ÷ 3.72	3.10
		Μ.Α.	3.26 ÷ 4.20	3.66	3.40 ÷ 4.64	3.98	3.07 ÷ 4.52	3.77	2.58 ÷ 4.03	3.30
	45°C	Χ.Α.	2.53 ÷ 3.22	2.87	2.58 ÷ 3.35	2.95	2.37 ÷ 3.22	2.79	2.00 ÷ 2.89	2.49
		Μ.Α.	2.87 ÷ 3.58	3.16	2.96 ÷ 4.02	3.47	2.70 ÷ 3.93	3.28	2.23 ÷ 3.51	2.90

* Θερμοκρασία εξόδου του νερού από την ΑΘ

** Σύστημα ελέγχου: Χ.Α. (χωρίς αντιστάθμιση), Μ.Α. (με αντιστάθμιση)

*** μ.ο.: μέσος όρος

Στους πίνακες 4 έως 7 παρουσιάζεται το εύρος των τιμών του SCOP ανά εταιρεία για τις τέσσερις πόλεις (Ιεράπετρα, Αθήνα, Θεσσαλονίκη και Φλώρινα αντίστοιχα) και για θερμοκρασία νερού προσαγωγής 35°C και 45°C. Εάν τεθεί ως κριτήριο για την οικονομική λειτουργία μιας ΑΘ αλλά και για τον χαρακτηρισμό της ως ΑΠΕ η συνθήκη SCOP≥3.0, τότε με βάση τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας προκύπτουν τα εξής:

α) στην περίπτωση της Ιεράπετρας και για $T_{προσ}$ = 35°C, σχεδόν τα περισσότερα μοντέλα του δείγματος (86 και 90 για σύστημα ελέγχου Χ.Α. ή Μ.Α. αντίστοιχα) και των 12 εταιρειών παρουσιάζουν SCOP≥3.0. Αντίθετα στην περίπτωση που η $T_{προσ}$ = 45°C, ο αντίστοιχος αριθμός των μοντέλων μειώνεται αισθητά, καθώς μόνο σε 7 και 49 μοντέλα (για σύστημα ελέγχου Χ.Α και Μ.Α. αντίστοιχα) είναι ο SCOP≥3.0, και μάλιστα μόνο σε 4 και 9 από τις 12 εταιρείες αντίστοιχα.

β) στην περίπτωση της Αθήνας, όταν η $T_{προσ}$ = 35°C, ο αριθμός των μοντέλων στα οποία SCOP≥3 είναι επίσης σημαντικός (σε 81 και 87 μοντέλα και από τις 12 εταιρείες, με σύστημα ελέγχου Χ.Α. και Μ.Α. αντίστοιχα), ενώ στην περίπτωση που η $T_{προσ}$ = 45°C, ο αντίστοιχος αριθμός μειώνεται αισθητά (19 και 55 μοντέλα με σύστημα ελέγχου Χ.Α. και Μ.Α από 5 και 11 εταιρείες αντίστοιχα).

γ) στην περίπτωση της Θεσσαλονίκης ο αριθμός των ΑΘ με SCOP≥3 μειώνεται ακόμη περισσότερο, ιδιαίτερα στην περίπτωση που η θερμοκρασία του νερού προσαγωγής είναι 45°C. Πιο συγκεκριμένα, για $T_{προσ}$ = 35°C, ο αντίστοιχος αριθμός των μοντέλων είναι 76 και 81 με σύστημα ελέγχου Χ.Α και Μ.Α. αντίστοιχα, στο σύνολο και των 12 εταιρειών. Όταν $T_{προσ}$ = 45°C, τότε μόνο 4 και 41 μοντέλα με σύστημα ελέγχου Χ.Α και Μ.Α., και μόνο από 2 και 9 εταιρείες αντίστοιχα, εμφανίζουν SCOP≥3.

δ) Τέλος, στην περίπτωση της Φλώρινας ο αριθμός των ΑΘ με SCOP ≥3 μειώνεται αισθητά, τόσο για $T_{προσ}$ = 35°C (46 και 56 μοντέλα με σύστημα ελέγχου Χ.Α και Μ.Α., από 8 και 11 εταιρείες αντίστοιχα) όσο και για $T_{προσ}$ = 45°C (56 μοντέλα και μόνο με σύστημα ελέγχου Μ.Α. από 5 εταιρείες).

Πίνακας 4: Εύρος εποχιακού βαθμού απόδοσης σε θέρμανση (SCOP) ανά εταιρεία για την πόλη της Ιεράπετρας και για θερμοκρασία νερού προσαγωγής 35°C και 45°C

ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΖΩΝΗ: Α (ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ) - ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΝΕΡΟΥ ΠΡΟΣΑΓΩΓΗΣ: 35°C													
ΣΥΜΠΙΕΣΤΗΣ	**ΕΛΕΓΧΟΣ ***	**Εταιρεία 1**	**Εταιρεία 2**	**Εταιρεία 3**	**Εταιρεία 4**	**Εταιρεία 5**	**Εταιρεία 6**	**Εταιρεία 7**	**Εταιρεία 8**	**Εταιρεία 9**	**Εταιρεία 10**	**Εταιρεία 11**	**Εταιρεία 12**
ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΣΤΡΟΦΩΝ	Χ.Α.	-	-	2.96 ÷ 3.26	2.91 ÷ 3.29	3.07 ÷ 3.34	3.29 ÷ 3.63	2.97 ÷ 3.13	-	3.22 ÷ 3.43	2.91 ÷ 3.16	3.15 ÷ 3.52	2.62 ÷ 2.77
	Μ.Α.	-	-	3.01 ÷ 3.32	2.97 ÷ 3.37	3.12 ÷ 3.40	3.36 ÷ 3.71	3.03 ÷ 3.20	-	3.40 ÷ 3.50	2.95 ÷ 3.21	3.21 ÷ 3.58	2.67 ÷ 2.82
INVERTER	Χ.Α.	3.39 ÷ 4.03	3.24 ÷ 3.79	-	3.50 ÷ 3.68	-	-	-	3.40 ÷ 3.71	-	3.33 ÷ 3.71	-	3.26 ÷ 3.73
	Μ.Α.	3.49 ÷ 4.20	3.36 ÷ 3.96	-	3.60 ÷ 3.78	-	-	-	3.44 ÷ 3.78	-	3.45 ÷ 3.90	-	3.37 ÷ 3.89

* Σύστημα ελέγχου: Χ.Α. (χωρίς αντιστάθμιση), Μ.Α. (με αντιστάθμιση)

ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΖΩΝΗ: Α (ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ) - ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΝΕΡΟΥ ΠΡΟΣΑΓΩΓΗΣ: 45°C													
ΣΥΜΠΙΕΣΤΗΣ	**ΕΛΕΓΧΟΣ**	**Εταιρεία 1**	**Εταιρεία 2**	**Εταιρεία 3**	**Εταιρεία 4**	**Εταιρεία 5**	**Εταιρεία 6**	**Εταιρεία 7**	**Εταιρεία 8**	**Εταιρεία 9**	**Εταιρεία 10**	**Εταιρεία 11**	**Εταιρεία 12**
ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΣΤΡΟΦΩΝ	Χ.Α.	-	-	2.48 ÷ 2.73	2.37 ÷ 2.69	2.59 ÷ 2.75	2.64 ÷ 2.85	2.41 ÷ 2.64	-	2.62 ÷ 2.75	2.54 ÷ 2.66	2.54 ÷ 2.92	2.17 ÷ 2.31
	Μ.Α.	-	-	2.66 ÷ 2.94	2.56 ÷ 2.90	2.74 ÷ 2.96	2.90 ÷ 3.14	2.62 ÷ 2.75	-	2.92 ÷ 3.01	2.69 ÷ 2.83	2.73 ÷ 3.14	2.35 ÷ 2.47
INVERTER	Χ.Α.	2.78 ÷ 3.22	2.53 ÷ 3.00	-	2.92 ÷ 3.02	-	-	-	2.76 ÷ 3.04	-	2.71 ÷ 3.06	-	2.63 ÷ 2.89
	Μ.Α.	3.03 ÷ 3.58	2.89 ÷ 3.41	-	3.15 ÷ 3.25	-	-	-	3.01 ÷ 3.26	-	3.11 ÷ 3.34	-	2.87 ÷ 3.25

* Σύστημα ελέγχου: Χ.Α. (χωρίς αντιστάθμιση), Μ.Α. (με αντιστάθμιση)

Πίνακας 5: Εύρος εποχιακού βαθμού απόδοσης σε θέρμανση (SCOP) ανά εταιρεία για την πόλη της Αθήνας και για θερμοκρασία νερού προσαγωγής 35°C και 45°C

ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΖΩΝΗ: Β (ΑΘΗΝΑ) - ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΝΕΡΟΥ ΠΡΟΣΑΓΩΓΗΣ: 35°C													
ΣΥΜΠΙΕΣΤΗΣ	**ΕΛΕΓΧΟΣ ***	**Εταιρεία 1**	**Εταιρεία 2**	**Εταιρεία 3**	**Εταιρεία 4**	**Εταιρεία 5**	**Εταιρεία 6**	**Εταιρεία 7**	**Εταιρεία 8**	**Εταιρεία 9**	**Εταιρεία 10**	**Εταιρεία 11**	**Εταιρεία 12**
ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΣΤΡΟΦΩΝ	Χ.Α.	-	-	2.96 ÷ 3.28	2.87 ÷ 3.29	3.05 ÷ 3.34	3.22 ÷ 3.68	2.85 ÷ 3.16	-	3.15 ÷ 3.45	2.75 ÷ 3.05	3.16 ÷ 3.55	2.52 ÷ 2.72
	Μ.Α.	-	-	3.07 ÷ 3.40	2.98 ÷ 3.44	3.15 ÷ 3.46	3.34 ÷ 3.88	2.95 ÷ 3.29	-	3.47 ÷ 3.60	2.82 ÷ 3.14	3.28 ÷ 3.67	2.61 ÷ 2.82
INVERTER	Χ.Α.	3.40 ÷ 4.30	3.48 ÷ 4.18	-	3.69 ÷ 3.79	-	-	-	3.33 ÷ 3.69	-	3.70 ÷ 4.08	-	3.30 ÷ 4.02
	Μ.Α.	3.56 ÷ 4.64	3.72 ÷ 4.52	-	3.88 ÷ 3.97	-	-	-	3.40 ÷ 3.83	-	3.98 ÷ 4.41	-	3.44 ÷ 4.33

* Σύστημα ελέγχου: Χ.Α. (χωρίς αντιστάθμιση), Μ.Α. (με αντιστάθμιση)

ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΖΩΝΗ: Β (ΑΘΗΝΑ) - ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΝΕΡΟΥ ΠΡΟΣΑΓΩΓΗΣ: 45°C													
ΣΥΜΠΙΕΣΤΗΣ	**ΕΛΕΓΧΟΣ**	**Εταιρεία 1**	**Εταιρεία 2**	**Εταιρεία 3**	**Εταιρεία 4**	**Εταιρεία 5**	**Εταιρεία 6**	**Εταιρεία 7**	**Εταιρεία 8**	**Εταιρεία 9**	**Εταιρεία 10**	**Εταιρεία 11**	**Εταιρεία 12**
ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΣΤΡΟΦΩΝ	Χ.Α.	-	-	2.47 ÷ 2.71	2.27 ÷ 2.62	2.50 ÷ 2.69	2.52 ÷ 2.78	2.24 ÷ 2.51	-	2.49 ÷ 2.70	2.33 ÷ 2.49	2.46 ÷ 2.86	2.07 ÷ 2.19
	Μ.Α.	-	-	2.78 ÷ 3.06	2.61 ÷ 3.00	2.78 ÷ 3.04	2.91 ÷ 3.34	2.56 ÷ 2.74	-	3.02 ÷ 3.12	2.54 ÷ 2.78	2.79 ÷ 3.20	2.34 ÷ 2.46
INVERTER	Χ.Α.	2.74 ÷ 3.35	2.65 ÷ 3.12	-	2.93 ÷ 3.06	-	-	-	2.66 ÷ 2.93	-	2.90 ÷ 3.28	-	2.58 ÷ 3.01
	Μ.Α.	3.13 ÷ 4.02	3.22 ÷ 3.87	-	3.35 ÷ 3.46	-	-	-	3.00 ÷ 3.31	-	3.53 ÷ 3.88	-	2.96 ÷ 3.69

* Σύστημα ελέγχου: Χ.Α. (χωρίς αντιστάθμιση), Μ.Α. (με αντιστάθμιση)

Πίνακας 6: Εύρος εποχιακού βαθμού απόδοσης σε θέρμανση (SCOP) ανά εταιρεία για την πόλη της Θεσσαλονίκης και για θερμοκρασία νερού προσαγωγής 35°C και 45°C

ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΖΩΝΗ: Γ (ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ) - ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΝΕΡΟΥ ΠΡΟΣΑΓΩΓΗΣ: 35°C													
ΣΥΜΠΙΕΣΤΗΣ	**ΕΛΕΓΧΟΣ ***	**Εταιρεία 1**	**Εταιρεία 2**	**Εταιρεία 3**	**Εταιρεία 4**	**Εταιρεία 5**	**Εταιρεία 6**	**Εταιρεία 7**	**Εταιρεία 8**	**Εταιρεία 9**	**Εταιρεία 10**	**Εταιρεία 11**	**Εταιρεία 12**
ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΣΤΡΟΦΩΝ	Χ.Α.	-	-	2.88 ÷ 3.18	2.77 ÷ 3.17	2.94 ÷ 3.20	3.09 ÷ 3.49	2.6 ÷ 3.07	-	3.04 ÷ 3.34	2.60 ÷ 2.96	3.13 ÷ 3.46	2.39 ÷ 2.63
	Μ.Α.	-	-	2.99 ÷ 3.30	2.89 ÷ 3.31	3.05 ÷ 3.33	3.24 ÷ 3.67	2.68 ÷ 3.20	-	3.36 ÷ 3.49	2.68 ÷ 3.06	3.26 ÷ 3.59	2.48 ÷ 2.74
INVERTER	Χ.Α.	3.27 ÷ 4.15	3.28 ÷ 3.91	-	3.58 ÷ 3.67	-	-	-	2.95 ÷ 3.31	-	3.48 ÷ 3.89	-	3.09 ÷ 3.80
	Μ.Α.	3.43 ÷ 4.52	3.51 ÷ 4.22	-	3.78 ÷ 3.87	-	-	-	3.07 ÷ 3.45	-	3.73 ÷ 4.14	-	3.26 ÷ 4.09

* Σύστημα ελέγχου: Χ.Α. (χωρίς αντιστάθμιση), Μ.Α. (με αντιστάθμιση)

ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΖΩΝΗ: Γ (ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ) - ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΝΕΡΟΥ ΠΡΟΣΑΓΩΓΗΣ: 45°C													
ΣΥΜΠΙΕΣΤΗΣ	**ΕΛΕΓΧΟΣ**	**Εταιρεία 1**	**Εταιρεία 2**	**Εταιρεία 3**	**Εταιρεία 4**	**Εταιρεία 5**	**Εταιρεία 6**	**Εταιρεία 7**	**Εταιρεία 8**	**Εταιρεία 9**	**Εταιρεία 10**	**Εταιρεία 11**	**Εταιρεία 12**
ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΣΤΡΟΦΩΝ	Χ.Α.	-	-	2.42 ÷ 2.66	2.15 ÷ 2.54	2.40 ÷ 2.58	2.30 ÷ 2.69	2.06 ÷ 2.33	-	2.39 ÷ 2.61	2.15 ÷ 2.42	2.41 ÷ 2.77	1.96 ÷ 2.08
	Μ.Α.	-	-	2.73 ÷ 3.00	2.55 ÷ 2.92	2.70 ÷ 2.94	2.82 ÷ 3.21	2.38 ÷ 2.62	-	2.94 ÷ 3.04	2.36 ÷ 2.73	2.78 ÷ 3.13	2.23 ÷ 2.40
INVERTER	Χ.Α.	2.60 ÷ 3.22	2.52 ÷ 2.99	-	2.82 ÷ 2.95	-	-	-	2.37 ÷ 2.67	-	2.77 ÷ 3.14	-	2.41 ÷ 2.91
	Μ.Α.	3.01 ÷ 3.93	3.04 ÷ 3.68	-	3.25 ÷ 3.38	-	-	-	2.70 ÷ 3.04	-	2.98 ÷ 3.66	-	2.82 ÷ 3.56

* Σύστημα ελέγχου: Χ.Α. (χωρίς αντιστάθμιση), Μ.Α. (με αντιστάθμιση)

Πίνακας 7: Εύρος εποχιακού βαθμού απόδοσης σε θέρμανση (SCOP) ανά εταιρεία για την πόλη της Φλώρινας και για θερμοκρασία νερού προσαγωγής 35°C και 45°C

ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΖΩΝΗ: Δ (ΦΛΩΡΙΝΑ) - ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΝΕΡΟΥ ΠΡΟΣΑΓΩΓΗΣ: 35°C													
ΣΥΜΠΙΕΣΤΗΣ	**ΕΛΕΓΧΟΣ ***	**Εταιρεία 1**	**Εταιρεία 2**	**Εταιρεία 3**	**Εταιρεία 4**	**Εταιρεία 5**	**Εταιρεία 6**	**Εταιρεία 7**	**Εταιρεία 8**	**Εταιρεία 9**	**Εταιρεία 10**	**Εταιρεία 11**	**Εταιρεία 12**
ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΣΤΡΟΦΩΝ	Χ.Α.	-	-	2.73 ÷ 2.99	2.65 ÷ 3.02	2.74 ÷ 2.95	2.8 ÷ 3.13	2.07 ÷ 2.86	-	2.86 ÷ 3.1	2.41 ÷ 2.79	2.99 ÷ 3.26	2.13 ÷ 2.46
	Μ.Α.	-	-	2.81 ÷ 3.09	2.76 ÷ 3.14	2.83 ÷ 3.05	2.92 ÷ 3.27	2.11 ÷ 2.97	-	3.1 ÷ 3.24	2.49 ÷ 2.88	3.12 ÷ 3.39	2.2 ÷ 2.55
INVERTER	Χ.Α.	3.06 ÷ 3.72	2.88 ÷ 3.42	-	3.28 ÷ 3.4	-	-	-	2.48 ÷ 2.94	-	3.02 ÷ 3.49	-	2.69 ÷ 3.39
	Μ.Α.	3.21 ÷ 4.03	3.09 ÷ 3.66	-	3.45 ÷ 3.56	-	-	-	2.58 ÷ 3.04	-	3.19 ÷ 3.74	-	2.83 ÷ 3.62

* Σύστημα ελέγχου: Χ.Α. (χωρίς αντιστάθμιση), Μ.Α. (με αντιστάθμιση)

ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΖΩΝΗ: Δ (ΦΛΩΡΙΝΑ) - ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΝΕΡΟΥ ΠΡΟΣΑΓΩΓΗΣ: 45°C													
ΣΥΜΠΙΕΣΤΗΣ	**ΕΛΕΓΧΟΣ**	**Εταιρεία 1**	**Εταιρεία 2**	**Εταιρεία 3**	**Εταιρεία 4**	**Εταιρεία 5**	**Εταιρεία 6**	**Εταιρεία 7**	**Εταιρεία 8**	**Εταιρεία 9**	**Εταιρεία 10**	**Εταιρεία 11**	**Εταιρεία 12**
ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΣΤΡΟΦΩΝ	Χ.Α.	-	-	2.33 ÷ 2.55	1.98 ÷ 2.42	2.23 ÷ 2.4	2.18 ÷ 2.49	1.67 ÷ 2.09	-	2.25 ÷ 2.46	1.82 ÷ 2.31	2.28 ÷ 2.6	1.75 ÷ 1.88
	Μ.Α.	-	-	2.58 ÷ 2.82	2.4 ÷ 2.76	2.49 ÷ 2.7	2.52 ÷ 2.86	1.83 ÷ 2.37	-	2.73 ÷ 2.83	2.02 ÷ 2.59	2.62 ÷ 2.91	1.96 ÷ 2.15
INVERTER	Χ.Α.	2.41 ÷ 2.89	2.25 ÷ 2.76	-	2.59 ÷ 2.7	-	-	-	2.00 ÷ 2.53	-	2.47 ÷ 2.81	-	2.13 ÷ 2.65
	Μ.Α.	2.77 ÷ 3.51	2.69 ÷ 3.25	-	2.96 ÷ 3.07	-	-	-	2.23 ÷ 2.79	-	2.92 ÷ 3.25	-	2.44 ÷ 3.14

* Σύστημα ελέγχου: Χ.Α. (χωρίς αντιστάθμιση), Μ.Α. (με αντιστάθμιση)

Δηλαδή, συνοψίζοντας τα παραπάνω, φαίνεται ότι και στις τέσσερις αντιπροσωπευτικές πόλεις των κλιματικών Ζωνών Α, Β, Γ και Δ υπάρχουν δυνατότητες λειτουργίας ΑΘ με SCOP≥3, και μάλιστα σε όλο και περισσότερα μοντέλα ΑΘ καθώς πηγαίνουμε από ψυχρότερο σε θερμότερο κλίμα σε συνδυασμό με χαμηλότερες θερμοκρασίες προσαγωγής νερού θέρμανσης και σε συστήματα με λειτουργία αντιστάθμισης αντί της λειτουργίας με σταθερή θερμοκρασία νερού προσαγωγής.

Στον πίνακα 8 φαίνεται η ποσοστιαία αύξηση των τιμών του SCOP που προκύπτει από την εφαρμογή της λειτουργίας της αντιστάθμισης καθώς επίσης και από τη μείωση της θερμοκρασίας του νερού προσαγωγής από τους 45°C στους 35°C. Πιο συγκεκριμένα, η λειτουργία της αντιστάθμισης αυξάνει την απόδοση των ΑΘ με συμπιεστή σταθερών στροφών κατά 2÷4.2% (0.06 έως 0.13 σε απόλυτες τιμές) και 7.8÷14.9% (0.21 έως 0.36 σε απόλυτες τιμές) για θερμοκρασία νερού 35°C και 45°C αντίστοιχα, ενώ στην περίπτωση των ΑΘ με συμπιεστή μεταβαλλόμενων στροφών η αντίστοιχη αύξηση είναι 3.5÷6.8% (0.12 έως 0.24 σε απόλυτες τιμές) και 10.1÷17.7% (0.29 έως 0.49 σε απόλυτες τιμές).

Επιπρόσθετα, στην περίπτωση των ΑΘ με συμπιεστή σταθερών στροφών, με τη μείωση της θερμοκρασίας του νερού προσαγωγής από τους 45°C στους 35°C αυξάνεται η τιμή του SCOP κατά 21.8÷25.9% (0.57 έως 0.62 σε απόλυτες τιμές) και 14.3÷15.3% (0.39 έως 0.42 σε απόλυτες τιμές) για σύστημα ελέγχου Χ.Α. ή Μ.Α αντίστοιχα. Στην περίπτωση των ΑΘ με συμπιεστή μεταβαλλόμενων στροφών, η μείωση της θερμοκρασίας του νερού προσαγωγής από τους 45°C στους 35°C προκαλεί αντίστοιχη αύξηση της τιμής του SCOP κατά 23.3÷26.9% (0.67 έως 0.79 σε απόλυτες τιμές) και 14÷16.1% (0.40 έως 0.50 σε απόλυτες τιμές).

Πίνακας 8: Αύξηση του εποχιακού βαθμού απόδοσης σε θέρμανση (SCOP) λόγω της μείωσης της θερμοκρασίας του νερού προσαγωγής (από 45°C σε 35°C) και της εφαρμογής της αντιστάθμισης

	ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΣΤΡΟΦΩΝ				**ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΩΝ ΣΤΡΟΦΩΝ**			
	Από Χ.Α. σε Μ.Α.		Από 45°C σε 35°C		Από Χ.Α. σε Μ.Α.		Από 45°C σε 35°C	
	35°C	45°C	Χ.Α.	Μ.Α.	35°C	45°C	Χ.Α.	Μ.Α.
Ιεράπετρα	2,0%	7.8%	21.8%	15.3%	3.5%	10.1%	23.3%	16.1%
Αθήνα	3.9%	13.7%	25.4%	14.6%	6.4%	17.7%	26.9%	14.8%
Θεσσαλονίκη	4.2%	14.9%	25.9%	14.3%	6.8%	17.5%	26.3%	14.7%
Φλώρινα	4.0%	13.3%	25.7%	15.3%	6.3%	16.1%	24.5%	14.0%

* Σύστημα ελέγχου: Χ.Α. (χωρίς αντιστάθμιση), Μ.Α. (με αντιστάθμιση)

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή πραγματοποιήθηκε μία συγκριτική ανάλυση των εποχιακών βαθμών απόδοσης σε θέρμανση (SCOP) σε ΑΘ αέρα-νερού, οι οποίες είναι διαθέσιμες στην ελληνική αγορά. Η συγκριτική ανάλυση έγινε με βάση τα τεχνικά χαρακτηριστικά 100 μοντέλων ΑΘ από 12 εταιρείες κατασκευής. Ο υπολογισμός των τιμών SCOP έγινε σύμφωνα με το πρότυπο EN14825 λαμβάνοντας υπόψη τα κλιματικά δεδομένα τεσσάρων αντιπροσωπευτικών πόλεων, μία σε κάθε κλιματική Ζώνη της Ελλάδας, και θεωρώντας ότι η θερμική ισχύς των ΑΘ στη θερμοκρασία σχεδιασμού για θέρμανση σε κάθε πόλη είναι ίση με το θερμικό φορτίο σχεδιασμού του θερμαινόμενου κτιρίου/θερμικής ζώνης. Οι μεταβλητές της ανάλυσης ήταν η αποδιδόμενη θερμική ισχύς (εξετάστηκαν ΑΘ από 2kW έως 50kW), η θερμοκρασία προσαγωγής του νερού στο σύστημα θέρμανσης (εξετάστηκαν οι περιπτώσεις των 35°C και 45°C) και το σύστημα ελέγχου της θερμοκρασίας του νερού προσαγωγής (θεωρήθηκαν συστήματα με ή χωρίς αντιστάθμιση). Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι ΑΘ με μικρή θερμική ισχύ (έως 20 kW), για τα κλιματικά δεδομένα και των 4 πόλεων, παρουσιάζουν μεγαλύτερο εύρος τιμών SCOP καθώς και μεγαλύτερες μέγιστες τιμές σε σχέση με τις ΑΘ θερμικής ισχύος από 20 έως 50 kW. Επιπρόσθετα, ο SCOP εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα κλιματικά δεδομένα της περιοχής. Σε περιοχές όπου θερμοκρασίες του εξωτερικού αέρα μικρότερες από τη θερμοκρασία σχεδιασμού για θέρμανση εμφανίζονται για μεγάλο αριθμό ωρών (π.χ. Ιεράπετρα), παρατηρείται ότι η λειτουργία της βοηθητικής πηγής ενέργειας (ηλεκτρικές αντιστάσεις) μειώνει τον εποχιακό βαθμό απόδοσης. Στις περιπτώσεις αυτές πρέπει να εξετάζεται η επιλογή της ΑΘ με μεγαλύτερη θερμική ισχύ από το φορτίο σχεδιασμού για θέρμανση. Δύο επιπλέον παράγοντες που επηρεάζουν σημαντικά τον βαθμό απόδοσης της ΑΘ είναι η θερμοκρασία του νερού προσαγωγής στο σύστημα θέρμανσης καθώς επίσης και το σύστημα ελέγχου της θερμοκρασίας αυτής. Πιο συγκεκριμένα, η εφαρμογή συστήματος ελέγχου με αντιστάθμιση στη λειτουργία της ΑΘ αυξάνει τον βαθμό απόδοσης αισθητά, ιδιαίτερα όταν η θερμοκρασία προσαγωγής είναι 45°C. Επίσης, αξίζει να αναφερθεί ότι με μείωση της θερμοκρασίας του νερού από τους 45°C στους 35°C, σε συνδυασμό με εφαρμογή του συστήματος αντιστάθμισης, ο SCOP αυξάνεται κατά 24%-31% και 28%-35% για ΑΘ με συμπιεστή σταθερών και μεταβαλλόμενων στροφών (inverter) αντίστοιχα. Από τα 100 μοντέλα ΑΘ που εξετάστηκαν στις τέσσερις

αντιπροσωπευτικές πόλεις, διαπιστώθηκε ότι υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός που εμφανίζει SCOP≥3, που είναι ένα κριτήριο για την οικονομική λειτουργία μιας ΑΘ αλλά και για τον χαρακτηρισμό της ως ΑΠΕ. Ο αριθμός των ΑΘ που εκπληρώνει αυτό το κριτήριο αυξάνεται από τα ψυχρότερα στα θερμότερα κλίματα σε συνδυασμό με χαμηλότερες θερμοκρασίες νερού προσαγωγής στη θέρμανση και σε συστήματα με λειτουργία αντιστάθμισης αντί της λειτουργίας με σταθερή θερμοκρασία νερού προσαγωγής.

Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν ότι ο εποχιακός βαθμός απόδοσης σε θέρμανση επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, όπως το κλίμα της περιοχής, τη τεχνολογία του συμπιεστή, τη θερμοκρασία εξόδου του νερού από την ΑΘ, το σύστημα ελέγχου της θερμοκρασίας του νερού προσαγωγής, οι οποίοι θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στην επιλογή των ΑΘ και στο σχεδιασμό των συστημάτων θέρμανσης, ώστε να επιτυγχάνεται ο βέλτιστος βαθμός απόδοσης του συστήματος θέρμανσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Eurostat, Statistical Books, Energy data, 2020 edition Luxembourg: Publications Office of the European Union. doi: 10.2785/68334, ISBN 978-92-76-20629-3

[2] Eurostat, Statistical Books, Energy, transport and environment statistics, 2020 edition Luxembourg: Publications Office of the European Union. doi: 10.2785/522192, ISBN 978-92-76-20736-8

[3] European Commission 2011, Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, Energy Roadmap 2050, COM(2011) 885 final, Brussels 15.12.2011.

[4] Mouzeviris G.A., Papakostas K.T., 2020, “Seasonal heat performances of air-to-water heat pumps in the Greek climate”, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 410, 012043.

[5] Mouzeviris G.A., Papakostas K.T., 2020, “Comparative Analysis of Air-to-Water and Ground Source Heat Pumps Performances”, International Journal of Sustainable Energy, 40:1, pp. 69-84

[6] Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council, 2009, On the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC, Official Journal of the European Union, 5.6.2009, L 140/16-62.

[7] Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council, 2009, Establishing a framework for the setting of eco-design requirements for energy-related products, Official Journal of the European Union, 31.10.2009, L 285/10-35.

[8] Directive 2010/30/EU of the European Parliament and of the Council, 2010, On the indication by labelling and standard product information of the consumption of energy and other resources by energy-related products, Official Journal of the European Union, 18.6.2010, L 153/1-12.

[9] Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council, 2010, On the energy performance of buildings, Official Journal of the European Union, 18.6.2010, L 153/13-35.

[10] Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council, 2012, On energy efficiency, amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EU and repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32/EC, Official Journal of the European Union, 14.11.2012, L 315/1-56,

[11] Directive (EU) 2018/844 of the European Parliament and of the Council, 2018, Amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on energy efficiency, Official Journal of the European Union, 19.6.2018,

L 156/75-91.

[12] Staffell I., Brett D., Brandon N., Hawkes A., 2012, “A review of Domestic Heat Pumps”, Energy & Environmental Science, 5, pp. 9291-9306.

[13] Huchtemann K., Müller D., 2013, «Simulation Study on Supply Temperature Optimization in Domestic Heat Pump Systems» Building and Environment, 59, pp. 327-335.

[14] EurObserv’ER, 2019, The State of Renewable Energies in Europe, 19th EurObserv’ER Report. https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/ccx/2020/The-state-of-renewable-energies-in-Europe-2019.pdf

[15] Madonna F., Bazzocchi F., 2013, “Annual Performances of Reversible Air-to-Water Heat Pumps in Small Residential Buildings”, Energy and Buildings, 65, pp. 299–309.

[16] Naldi C., Dongellini M., Morini G.L., 2015, “Climate Influence on Seasonal Performances of Air-to-Water Heat Pumps for Heating”, Energy Procedia, 81, pp. 100-107.

[17] Dongellini M., Naldi C., Morini G.L., 2015, “Seasonal Performance Evaluation of Electric Air-to-Water Heat Pump Systems” Applied Thermal Engineering, 90, pp. 1072-1081.

[18] Dongellini M., Naldi C., Morini G.L., 2017, “Sizing Effects on the Energy Performance of Reversible Air-Source Heat Pumps for Office Buildings”, Applied Thermal Engineering, 114, pp. 1073-1081.

[19] Dongellini M., Morini G.L., 2019, “On-Off Cycling Losses of Reversible Air-to-Water Heat Pump Systems as a Function of the Unit Power Modulation Capacity”, Energy Conversion and Management, 196, pp. 966-978.

[20] Mouzeviris G.A., Papakostas K.T., 2020, “Air-to-water heat pumps: the impact of climate, compressor technology, water output temperature and sizing on the seasonal coefficient of performance for heating”, IOP Conference Series: Materials, Science and Engineering, 997, 012150.

[21] European Standard EN 14825:2018, “Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps, with electrically driven compressors, for space heating and cooling – Testing and rating at part load conditions and calculation of seasonal performance”, European Committee for Standardization, Brussels.

[22] Mouzeviris G.A., Papakostas K.T., 2018, “Comparative Analysis of Air-to-Water Heat Pumps Performances – Seasonal Performance for Heating of Domestic Heat Pumps in the Greek Climate”, Proceedings of the 6th International Conference on Renewable Energy Sources and Energy Efficiency - New Challenges (RESEE2018), Nicosia Cyprus, 1-2 November, pp. 179-193

[23] Ζαγανά-Παπαβασιλείου Π., 2013, “Επικαιροποίηση βάσης θερμοκρασιακών δεδομένων Αθήνας και Θεσσαλονίκης για ενεργειακές μελέτες – Χρονική περίοδος 1983-2012 – Σύγκριση ενεργειακών απαιτήσεων για θέρμανση και ψύξη στις τρεις δεκαετίες”, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή Α.Π.Θ.

[24] Κύρου Δ., 2018, “Στατιστική ανάλυση ωριαίων μετρήσεων θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας αέρα της περιόδου 1983-2012 για την Αθήνα (ΕΑΑ) - Υπολογισμός δεδομένων για μεθόδους ενεργειακής ανάλυσης συστημάτων κλιματισμού”, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή Α.Π.Θ.

[25] Καραδαγλής Χ., Φελέκης Π., 2005, “Εκτίμηση θερμοκρασιακών δεδομένων κατάλληλων για τις ενεργειακές μεθόδους συχνοτήτων θερμοκρασιών σε 38 Ελληνικές

πόλεις", Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή Α.Π.Θ.

[26] Papakostas K. T., Tsilingiridis G., Kyriakis N., 2008, "Bin weather data for 38 Greek cities" Appl Energy, 85, pp. 1015–1025

[27] Τεχνικό επιμελητήριο Ελλάδος (Τ.Ε.Ε.), 2014, Τεχνική Οδηγία 20701-3/2010, "Κλιματικά δεδομένα ελληνικών περιοχών", Νοέμβριος 2014.

[28] Τεχνικό επιμελητήριο Ελλάδος (Τ.Ε.Ε.), 2017, Τεχνική Οδηγία 20701-1/2017, "Αναλυτικές εθνικές προδιαγραφές παραμέτρων για τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης κτηρίων και την έκδοση του πιστοποιητικού ενεργειακής απόδοσης", Σεπτέμβριος 2017.

ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΗΛΙΑΚΑ-ΤΡΟΦΟΔΟΤΟΥΜΕΝΟΥ ΨΥΚΤΗ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΨΥΚΤΙΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΕΜΠΟΡΙΚΗΣ ΨΥΞΗΣ ΜΕ CO_2

Ευάγγελος Συγγούνας[1,2,*], Δημήτριος Τσιμπούκης[1,2], Χαράλαμπος Δαλαβούρας[1], Σταύρος Δ. Αναγνωστάτος[2,3], Μιχαήλ Γρ. Βραχόπουλος[1]

[1] Εργαστήριο Ενεργειακών και Περιβαλλοντικών Ερευνών, Γενικό Τμήμα, ΕΚΠΑ
[2] Γενική Διεύθυνση Ανάπτυξης, ΜΕΤΡΟ ΑΕΒΕ
[3] Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος, ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ
*e-mail: esyngounas@uoa.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα ψυκτικά συστήματα CO_2 αποτελούν τη μόνη βιώσιμη λύση στις εγκαταστάσεις εμπορικής ψύξης, η οποία ωστόσο επιφέρει ενεργειακές προκλήσεις λόγω της χαμηλής ενεργειακής απόδοσης κατά τη λειτουργία υπό υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της ενσωμάτωσης ενός ψύκτη απορρόφησης μέσω υπόψυξης σε διβάθμιο ψυκτικό σύστημα CO_2 το οποίο καλύπτει τις ψυκτικές ανάγκες ψυκτικής εγκατάστασης σουπερμάρκετ με εγκατεστημένη ισχύ 80kW και 20kW για τα κυκλώματα μέσης και χαμηλής θερμοκρασίας αντιστοίχως. Η εξεταζόμενη τοπολογία προβλέπεται για την πραγματική ψυκτική εγκατάσταση ενός σουπερμάρκετ της ΜΕΤΡΟ ΑΕΒΕ στην περιοχή των Σπάτων (Αθήνα). Η προτεινόμενη λύση περιλαμβάνει τη χρήση ενός ψύκτη απορρόφησης με εργαζόμενο διάλυμα το LiBr-H_20 των 60kW ψυκτικής ισχύος, ο οποίος τροφοδοτείται από θερμότητα που παράγεται σε 50 συλλέκτες κενού εγκατεστημένους στην οροφή του καταστήματος, συνολικής συλλεκτικής επιφάνειας 115m^2. Η ενεργειακή ανάλυση πραγματοποιείται με επιβεβαιωμένα αριθμητικά μοντέλα που αναπτύσσονται στη MATLAB χρησιμοποιώντας τη βιβλιοθήκη του CoolProp. Μέσω παραμετρικής ανάλυσης συγκρίνεται ο συντελεστής συμπεριφοράς (COP) της προτεινόμενης τοπολογίας σε σχέση με το συμβατικό διβάθμιο σύστημα, υπό σταθερή χαμηλή (450W/m^2) και υψηλή (800W/m^2) προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία για το εύρος θερμοκρασιών 1÷40^{o}C, κατά την οποία προκύπτει μέγιστη αύξηση του COP κατά 26.44% και 47.34% αντιστοίχως. Παράλληλα, λαμβάνοντας τη μέση ωριαία θερμοκρασία και μέση ωριαία ηλιακή ακτινοβολία για κάθε μήνα για την περιοχή του εξεταζόμενου σουπερμάρκετ, πραγματοποιείται ανάλυση απόδοσης σε επίπεδο ετήσιας λειτουργίας. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι σε σύγκριση με το συμβατικό διβάθμιο σύστημα, η υπόψυξη που επιτυγχάνεται οδηγεί σε μέγιστη ωριαία αύξηση του COP κατά 47.48% και μηνιαίως κατά 16.36% για τον Αύγουστο που είναι ο πιο θερμός μήνας του έτους. Η ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ισχύος μειώνεται κατά 8.93% που οδηγεί σε εξοικονόμηση ενέργειας της τάξης των 30,185.82 kWh/έτος

Λέξεις-κλειδιά: *ψυκτικό σύστημα CO_2, ψύκτης απορρόφησης, ηλιακή ενέργεια, ενεργειακή απόδοση, σουπερμάρκετ*

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα σουπερμάρκετ αποτελούν έναν από τους πλέον ενεργοβόρους τύπους κτιρίων δεδομένου ότι είναι υπεύθυνα για περισσότερο από το 4% της ετήσιας ηλεκτρικής κατανάλωσης στις βιομηχανικές χώρες. Το μεγαλύτερο μερίδιο στην ενεργειακή ζήτηση των σουπερμάρκετ έχουν οι ψυκτικές εγκαταστάσεις (60÷70%) οι οποίες χρησιμοποιούνται για τη διατήρηση των ευπαθών προϊόντων σε συνθήκες συντήρησης ή κατάψυξης [1]. Ο πρόσφατος Ευρωπαϊκός κανονισμός «F-gas regulation» εισήγαγε τη σταδιακή κατάργηση της χρήσης των ευρέως χρησιμοποιούμενων ψυκτικών μέσων υδροφθορανθράκων (HFCs) στις εγκαταστάσεις εμπορικής ψύξης, οδηγώντας ουσιαστικά στην ανάδειξη του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) ως τη μόνη βιώσιμη και μακροπρόθεσμη λύση ψυκτικού μέσου στις εγκαταστάσεις εμπορικής ψύξης [2].

Το διοξείδιο του άνθρακα ως ψυκτικό μέσο (R744) είναι ένα φυσικό ψυκτικό μέσο με μηδενικό δυναμικό καταστροφής της στοιβάδας του όζοντος (ODP=0) και αμελητέο δυναμικό υπερθέρμανσης (GWP=1). Επιπλέον, έχει καλύτερες θερμοφυσικές ιδιότητες από τα συνθετικά ψυκτικά ρευστά, έχοντας χαμηλότερο ιξώδες και μεγαλύτερη λανθάνουσα θερμότητα, θερμική αγωγιμότητα, πυκνότητα και ογκομετρική ψυκτική ισχύ από τα HFCs [3]. Ωστόσο, το μεγάλο μειονέκτημα της χρήσης του CO_2 σε ψυκτικά συστήματα σχετίζεται με το χαμηλό του κρίσιμο σημείο (~31^{o}C). Πιο αναλυτικά, για θερμοκρασίες περιβάλλοντος κοντά στους 27^{o}C τα ψυκτικά συστήματα CO_2 μεταβαίνουν στην υπερκρίσιμη λειτουργία, κατά την οποία δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί συμπύκνωση του ψυκτικού μέσου σύμφωνα κατά τη συνήθη μορφή λειτουργίας του ψυκτικού κύκλου. Επομένως, το ψυκτικό αέριο στην υψηλή πίεση είναι απαραίτητο να εκτονωθεί εντός στραγγαλιστικής διάταξης προκειμένου να παραχθεί το ψυκτικό υγρό τροφοδοσίας των ψυκτικών καταναλώσεων. Ωστόσο, η εκτόνωση αυτή συνοδεύεται με αναπόφευκτες μη-αντιστρεπτότητες οι οποίες με τη σειρά τους οδηγούν σε υψηλά ποσοστά καταστροφής εξέργειας [4]. Το παραπάνω έχει ως αποτέλεσμα τη μειωμένη ενεργειακή απόδοση των ψυκτικών συστημάτων CO_2 σε σχέση με τα συμβατικά HFC συστήματα, ιδιαίτερα για τα θερμά κλίματα της περιοχής της Μεσογείου όπου σημειώνονται υψηλά επίπεδα θερμοκρασιών κατά τη μεγαλύτερη διάρκεια του έτους.

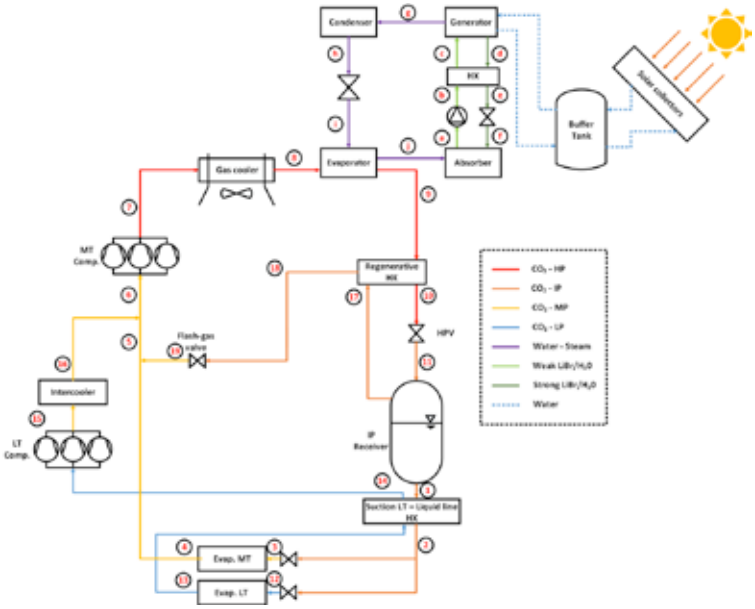
Η λύση στο παραπάνω πρόβλημα βρίσκεται στην αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και πιο συγκεκριμένα στην αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας η οποία μάλιστα είναι άφθονη στην Ελλάδα, με σκοπό την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης των ψυκτικών συστημάτων CO_2. Ο πλέον διαδεδομένος τρόπος ενσωμάτωσης της θερμότητας που παράγεται από την αξιοποίηση ηλιακής ενέργειας σε ένα ψυκτικό σύστημα, αφορά τη χρήση ψυκτών απορρόφησης ή προσρόφησης με σκοπό την υπόψυξη (subcooling) του εργαζόμενου ψυκτικού μέσου [5]. Θεωρητικές προσεγγίσεις της εφαρμογής αυτής δείχνουν ενθαρρυντικά αποτελέσματα, δείχνοντας αύξηση του COP άνω του 40% για τους θερινούς μήνες, σε σύγκριση με το αντίστοιχο συμβατικό σύστημα [6]. Ωστόσο, δεν έχει υπάρξει ακόμα κάποια πραγματική εφαρμογή της εξεταζόμενης λύσης, ενώ αντίστοιχα δεν υπάρχουν διαθέσιμα στη βιβλιογραφία πειραματικά αποτελέσματα της συνολικής διάταξης.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η περαιτέρω εμβάθυνση στην αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας για την αύξηση του βαθμού απόδοσης των ψυκτικών συστημάτων CO_2, μέσω της θεωρητικής ανάλυσης σεναρίου ενσωμάτωσης ενός ηλιακά τροφοδοτούμενου ψύκτη απορρόφησης σε μία ψυκτική εγκατάσταση εμπορικής ψύξης. Πιο αναλυτικά, το ψυκτικό αποτέλεσμα που παράγεται στον ψύκτη απορρόφησης χρησιμοποιείται για την παραγωγή υπόψυξης σε διβάθμιο ψυκτικό σύστημα CO_2 το οποίο καλύπτει τις ανάγκες συντήρησης και κατάψυξης των ψυγείων και ψυκτικών θαλάμων ενός σουπερμάρκετ. Η παρούσα εργασία αποτελεί το θεωρητικό υπόβαθρο για την πιθανή μελλοντική αξιοποίηση των αποτελεσμάτων για την πραγματική εφαρμογή της προτεινόμενης διάταξης εξοικονόμησης ενέργειας στο άμεσο μέλλον.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1. Εξεταζόμενη διάταξη

Στην παρούσα εργασία, εξετάζεται ένα καινοτόμο σύστημα ψύξης με ψυκτικό μέσο το CO_2 το οποίο καλύπτει τις ψυκτικές ανάγκες εγκατάστασης σουπερμάρκετ με εγκατεστημένη ισχύ 80kW$_R$ και 20kW$_R$ για τα κυκλώματα μέσης και χαμηλής θερμοκρασίας αντιστοίχως, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 1**.



Εικόνα 1: *Εξεταζόμενο ψυκτικό σύστημα με την ενσωμάτωση διάταξης ηλιακής απορρόφησης.*

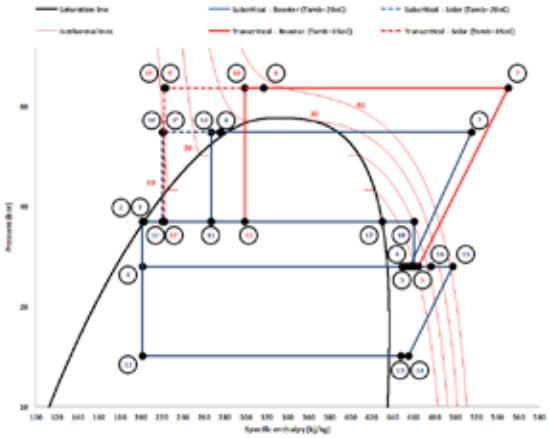
Συγκεκριμένα, η εξεταζόμενη τοπολογία περιλαμβάνει ένα συμβατικό διβάθμιο ψυκτικό σύστημα CO_2, όπως αυτό εφαρμόζεται σε πραγματικές εγκαταστάσεις εμπορικής ψύξης. Το σύστημα αυτό αποτελείται από τέσσερα διαφορετικά επίπεδα πιέσεων: χαμηλή (LP), μέση (MP), ενδιάμεση (IP) και υψηλή πίεση λειτουργίας (HP). Το δοχείο υγρού (IP receiver) που βρίσκεται στην ενδιάμεση πίεση (35 bar) τροφοδοτεί από το κάτω μέρος του με ψυκτικό υγρό τις ψυκτικές καταναλώσεις (ψυγεία, θαλάμους) συντήρησης (evap. MT) και κατάψυξης (evap. LT), που βρίσκονται στη μέση και χαμηλή πίεση αντίστοιχα. Η μέση πίεση αντιστοιχεί σε θερμοκρασία ατμοποίησης t_{evap}^{MT}=-10^{o}C, ενώ η χαμηλή πίεση σε t_{evap}^{LT}=-30^{o}C. Η επιστροφή των καταναλώσεων κατάψυξης θερμαίνεται από την κεντρική γραμμή υγρού στον ενδιάμεσο εναλλάκτη (suction LT – liquid line HX), ώστε να εξασφαλισθεί ότι δεν υπάρχουν σταγονίδια ψυκτικού ρευστού στην αναρρόφηση των συμπιεστών χαμηλής πίεσης (LT comp.). Οι συμπιεστές χαμηλής πίεσης συμπιέζουν το CO_2 έως την ενδιάμεση πίεση, όπου αρχικά απορρίπτει θερμότητα στο περιβάλλον μέσω ενός αερόψυκτο εναλλάκτη (Intercooler) και στη συνέχεια οδηγείται στην αναρρόφηση των συμπιεστών μέσης πίεσης. Στο πάνω μέρος του δοχείου υγρού συγκεντρώνεται το αέριο τμήμα του CO_2 το οποίο διαχωρίζεται βαρυτικά από το υγρό τμήμα. Το αέριο τμήμα (flash-gas) στραγγαλίζεται μέσω της βαλβίδας flash-gas (flash-gas valve) έως την πίεση αναρρόφησης των συμπιεστών μέσης πίεσης όπου αρχικά αναμιγνύεται με την επιστροφή των καταναλώσεων συντήρησης και ακολούθως με την κατάθλιψη των συμπιεστών χαμηλής πίεσης. Στη συνέχεια η συνολική παροχή οδηγείται στους συμπιεστές μέσης πίεσης

(MT comp.) όπου και συμπιέζεται έως την υψηλή πίεση (HP). Η κατάθλιψη των συμπιεστών μέσης πίεσης οδηγείται στον ψύκτη αερίου (gas-cooler) όπου κατά την υποκρίσιμη λειτουργία συμπυκνώνεται, ενώ κατά τη διακρίσιμη λειτουργία πραγματοποιείται ψύξη του αερίου CO_2 η οποία δεν συνοδεύεται με αλλαγή της φάσης του, δεδομένου ότι η υψηλή πίεση είναι μεγαλύτερη από το κρίσιμο σημείο. Η έξοδος του gas-cooler αφού ψυχθεί ελαφρώς στον αναγεννητικό εναλλάκτη (regenerative HX) από το flash-gas, ακολούθως εκτονώνεται μέσω της βαλβίδας υψηλής πίεσης (HPV) έως την ενδιάμεση πίεση όπου και αποθηκεύεται στο δοχείο υγρού. Η HPV ρυθμίζει τη βέλτιστη υψηλή πίεση κατά τη διακρίσιμη λειτουργία σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία στην έξοδο του gas-cooler (t_{GC}^{out}).

Η προτεινόμενη λύση εξοικονόμησης ενεργειακής ισχύος περιλαμβάνει την ενσωμάτωση στο κυρίως σύστημα ενός ηλιακά τροφορούμενο ψύκτη απορρόφησης (ACH) ο οποίος πραγματοποιεί υπόψυξη (subcooling) του CO_2 με σκοπό τη βελτίωση της απόδοσης του συστήματος. Ο ψύκτης απορρόφησης, ψυκτικής ισχύος 60kW_R, λειτουργεί με εργαζόμενο διάλυμα το LiBr-H_20 και αποτελείται από τον εναλλάκτη της γεννήτριας (Generator) στον οποίο τροφοδοτείται μέσω ανακυκλοφορίας νερού η παραγόμενη από τον ήλιο θερμότητα, τον ατμοποιητή (evaporator) ο οποίος τοποθετείται στην έξοδο του gas-cooler, όπου μέσω της ψύξης του CO_2 πραγματοποιείται η ζητούμενη υπόψυξη, καθώς και από το συμπυκνωτή (condenser) και τον απορροφητή (absorber), οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την απόρριψη θερμότητας στο περιβάλλον. Ο συμπυκνωτής και απορροφητής αποτελούν υδρόψυκτες διατάξεις οι οποίες τροφοδοτούνται από νερό το οποίο ψύχεται σε πύργο ψύξης (cooling tower).

Η θερμοκρασία ατμοποίησης στον ατμοποιητή του ψύκτη αερίου επιλέγεται t_{evap}^{ach}=5^{o}C, η οποία θεωρείται αποδεκτή δεδομένου ότι για τη συγκεκριμένη εφαρμογή η θερμοκρασία αυτή βρίσκεται εντός του εύρους 5÷15^{o}C[7]. Η ελάχιστη θερμοκρασία του υπόψυκτου CO_2 θεωρείται κατά 5K υψηλότερη από την αντίστοιχη θερμοκρασία στον ατμοποιητή του ψύκτη απορρόφησης. Επομένως, η ελάχιστη θερμοκρασία υπόψυξης του CO_2 στην παρούσα εργασία είναι t_9^{min}=10^{o}C.

Στο διάγραμμα πίεσης-ενθαλπίας (p-h) της **Εικόνας 2** παρουσιάζεται ο ψυκτικός κύκλος του CO_2 για την υποκρίσιμη (subcritical) και διακρίσιμη (transcritical) λειτουργία, για τις περιπτώσεις με και χωρίς τον ηλιακό ψύκτη απορρόφησης (Solar) αντίστοιχα.



Εικόνα 2: : *Διάγραμμα πίεσης – ενθαλπίας (p-h) του ψυκτικού κύκλου του εξεταζόμενου συστήματος CO_2.*

Το εξεταζόμενο ψυκτικό σύστημα CO_2 προβλέπεται για την πραγματική ψυκτική εγκατάσταση ενός σουπερμάρκετ της ΜΕΤΡΟ ΑΕΒΕ στην περιοχή των Σπάτων (Αθήνα). Τα εγκατεστημένα ψυκτικά φορτία

συντήρηση και κατάψυξης αντιστοιχούν στην ονομαστική ψυκτική ισχύ του εξεταζόμενου συστήματος. Η απαιτούμενη θερμότητα για την τροφοδοσία του ψύκτη απορρόφησης, παράγεται σε 50 συλλέκτες κενού εγκατεστημένους στο δώμα του καταστήματος με συνολική συλλεκτική επιφάνεια 115m^2 όπως φαίνεται στην **Εικόνα 3**. Η συνολική συλλεκτική επιφάνεια επιλέγεται με τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται η υπόψυξη του CO_2 έως τους 10^{o}C για όλους τους μήνες του έτους. Η παραγόμενη θερμότητα αποθηκεύεται σε δοχείο αδρανείας, από όπου εν συνεχεία το θερμό νερό τροφοδοτείται μέσω αντλιών ανακυκλοφορίας στη γεννήτρια του ψύκτη απορρόφησης.

Εικόνα 3: *Κάτοψη δώματος σουπερμάρκετ με την προτεινόμενη διάταξη ηλιακών συλλεκτών κενού.*

2.2. Θερμοδυναμική μοντελοποίηση

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι βασικές θερμοδυναμικές εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την ενεργειακή προσομοίωση του εξεταζόμενου συστήματος. Οι εξισώσεις αυτές επιλύθηκαν σε πρόγραμμα που αναπτύχθηκε στη MATLAB, στο οποίο ενσωματώθηκε η βιβλιοθήκη θερμοδυναμικών ιδιοτήτων CoolProp.

2.2.1. Μοντελοποίηση κύκλου CO_2

Για τη θερμοδυναμική μοντελοποίηση του ψυκτικού κύκλου του διβάθμιου συστήματος CO_2 λαμβάνονται υπόψη οι παρακάτω θεωρήσεις, ενώ οι βασικές θερμοδυναμικές εξισώσεις υπολογισμού παρουσιάζονται στον **Πίνακα 1**.

- Οι ισεντροπικοί βαθμοί απόδοσης (η_{is}) των συμπιεστών MT και LT, λαμβάνονται από το λογισμικό της Dorin [8] συναρτήσει του λόγου πίεσης (r).
- Για τον υπολογισμό της απορροφούμενης ηλεκτρική ισχύος (W_{comp}) στους συμπιεστές λαμβάνεται υπόψη μηχανικός βαθμός απόδοσης (η_m) ίσος με 95%.
- Η κατανάλωση των ανεμιστήρων (W_{fans}) των συσκευών που συναλλάσουν θερμότητα με το περιβάλλον, υπολογίζεται ως ποσοστό της απορριπτόμενης θερμότητας, το οποίο συγκεκριμένα υπολογίζεται στο 3% για τις αερόψυκτες διατάξεις [9].
- Σε όλους τους ενδιάμεσους εναλλάκτες θεωρείται αποτελεσματικότητα συναλλαγής θερμότητας (η_{eff}) 70%.

Πίνακας 1
Βασικές θερμοδυναμικές εξισώσεις μοντελοποίησης κύκλου CO_2.

$Q_{evap}^{MT} = m^{MT} \cdot (h_4 - h_3)$	(1)	$Q_{evap}^{LT} = m^{LT} \cdot (h_{13} - h_{12})$	(2)

$\eta_{is}^{MT} = 0.0016 \cdot r^2 - 0.0209 \cdot r + 0.7879$	(3)	$\eta_{is}^{LT} = -0.1083 \cdot r^2 + 0.4451 \cdot r + 0.2236$	(4)
$h_7 = h_6 + \frac{h_{7^{is}} - h_6}{\eta_{is}^{MT}}$	(5)	$h_{15} = h_{14} + \frac{h_{15^{is}} - h_{14}}{\eta_{is}^{LT}}$	(6)
$W_{comp}^{MT} = \frac{1}{\eta_m} \cdot (m^{MT} + m^{LT} + m^{fg}) \cdot (h_7 - h_6)$	(7)	$W_{comp}^{LT} = \frac{1}{\eta_m} \cdot m^{LT} \cdot (h_{15} - h_{14})$	(8)
$W_{fans}^{GC} = 0.03 \cdot (m^{MT} + m^{LT} + m^{fg}) \cdot (h_7 - h_8)$	(9)	$W_{fans}^{IC} = 0.03 \cdot m^{LT} \cdot (h_{15} - h_{16})$	(10)
$(m^{MT} + m^{LT} + m^{fg}) \cdot h_{11} = m^{fg} \cdot h17 + (m^{MT} + m^{LT})$	(11)	$(m^{MT} + m^{LT} + m^{fg}) \cdot (h_9 - h_{10}) = m^{fg} \cdot (h_{18} - h_{17})$	(12)
$m^{MT} \cdot h_4 + m^{LT} \cdot h_{16} + m^{fg} \cdot h_{19} = (m^{MT} + m^{LT} + m^{fg}$	(13)	$(m^{MT} + m^{LT} + m^{fg}) \cdot (h_8 - h_9) = Q_{sc}$	(14)
$h_3 = h_2$	(15)	$h_{11} = h_{10}$	(16)
$h_{12} = h_2$	(17)	$h_{19} = h_{18}$	(18)
$\eta_{eff}^{IHX} = \frac{T_{14} - T_{13}}{T_1 - T_{13}}$	(19)	$\eta_{eff}^{Reg} = \frac{T_{18} - T_{17}}{T_9 - T_{17}}$	(20)

Ο συντελεστής συμπεριφοράς του διβάθμιου ψυκτικού συστήματος CO_2 ($COP_{booster}$) υπολογίζεται ως:

$$COP_{booster} = \frac{Q_{evap}^{MT} + Q_{evap}^{LT}}{W_{comp}^{MT} + W_{comp}^{LT} + W_{fans}^{GC}} \quad (21)$$

2.2.2. Μοντελοποίηση κύκλου ψύξης απορρόφησης (ACH)

Για τη θερμοδυναμική μοντελοποίηση του ψυκτικού κύκλου του ψύκτη απορρόφησης λαμβάνονται υπόψη οι παρακάτω θεωρήσεις, ενώ οι βασικές θερμοδυναμικές εξισώσεις υπολογισμού παρουσιάζονται στον **Πίνακα 2**:

- Στον ενδιάμεσο εναλλάκτη του διαλύματος θεωρείται αποτελεσματικότητα συναλλαγής θερμότητας (η_{eff}) 70%.
- Η κατανάλωση ενέργειας στην αντλία θεωρείται αμελητέα.
- Η θερμοκρασία απόρριψης θερμότητας στο περιβάλλον στο συμπυκνωτή (condenser) και στον απορροφητή (absorber) θεωρείται κοινή, άρα $T_{con}=T_{abs}$.
- Η κατανάλωση του πύργου ψύξης του συμπυκνωτή και του απορροφητή ($W_{c,tower}$), υπολογίζεται ως υπολογίζεται ως ποσοστό της συνολικής απορριπτόμενης θερμότητας [9].

Πίνακας 2
Βασικές θερμοδυναμικές εξισώσεις μοντελοποίησης κύκλου απορρόφησης (ACH).

$Q_{sc} = m^r \cdot (h_j - h_i)$	(22)	$Q_g = m^r \cdot h_g + m^s \cdot h_d - m^w \cdot h_c$	(23)
$Q_c = m^r \cdot (h_h - h_g)$	(24)	$Q_a = m^r \cdot h_h + m^s \cdot h_f - m^w \cdot h_a$	(25)
$m^w \cdot (h_c - h_b) = m^s \cdot (h_d - h_e)$	(26)	$\eta_{eff}^{IHX} = \frac{h_d - h_e}{h_d - h_b}$	(27)
$h_b = h_a$	(28)	$h_f = h_e$	(29)
$h_i = h_h$	(30)	$W_{c.tower} = 0.015 \cdot (Q_{cond} + Q_a)$	(31)
$m^r = m^w + m^s$	(32)	$X^w \cdot m^w = X^s \cdot m^s$	(33)

Ο συντελεστής συμπεριφοράς του ψύκτη απορρόφησης (COP_{ach}) υπολογίζεται ως:

$$COP_{ach} = \frac{Q_{sc}}{Q_g} \quad (34)$$

2.2.3. Σύγκριση ενεργειακής απόδοσης

Για την ενεργειακή αξιολόγηση της λύσης ενσωμάτωσης του κύκλου απορρόφησης στο διβάθμιο ψυκτικό σύστημα CO_2, είναι απαραίτητο να συνυπολογιστούν όλες οι καταναλώσεις της διάταξης ως ακολούθως:

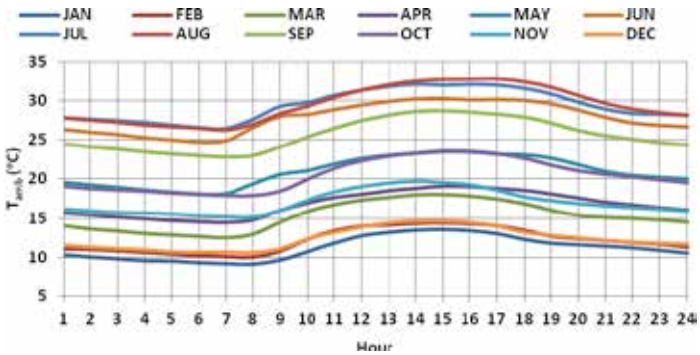
$$W_{total} = W_{comp}^{MT} + W_{comp}^{LT} + W_{fans}^{GC} + W_{fans}^{IC} + W_{c.tower} \quad (35)$$

Ταυτόχρονα, η ενεργειακή σύγκριση της προτεινόμενης διάταξης με την αντίστοιχη συμβατική γίνεται μέσω του υπολογισμού του συνολικού συντελεστή συμπεριφοράς (COP) ο οποίος ορίζεται ως:

$$COP = \frac{Q_{evap}^{MT} + Q_{evap}^{LT}}{W_{comp}^{MT} + W_{comp}^{LT} + W_{fans}^{GC} + W_{fans}^{IC} + W_{c.tower}} \quad (36)$$

2.3. Δεδομένα προσομοίωσης

Η διακύμανση της εξωτερικής θερμοκρασίας περιβάλλοντος λήφθηκε από πραγματικές μετρήσεις του τελευταίου ημερολογιακού έτους, οι οποίες συλλέχθηκαν από την κεντρική μονάδα εποπτείας της ψυκτικής εγκατάστασης του εξεταζόμενου σουπερμάρκετ. Στην **Εικόνα 4** παρουσιάζεται η μέση ωριαία θερμοκρασία περιβάλλοντος για κάθε μήνα του έτους.



Εικόνα 4: *Μέση ημερήσια διακύμανση θερμοκρασίας περιβάλλοντος για κάθε μήνα.*

Τα πραγματικά ψυκτικά φορτία συντήρησης (Q_{evap}^{MT}) και κατάψυξης (Q_{evap}^{LT}) εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από τη διακύμανση της εξωτερικής θερμοκρασίας περιβάλλοντος [10]. Για τον υπολογισμό των μεγεθών αυτών χρησιμοποιούνται οι παρακάτω σχέσεις [11]:

$$Q_{evap}^{MT,LT} = \left(1 - (1 - mf^{MT,LT}) \cdot \frac{30 - t_{amb}}{30 - 5}\right) \cdot Q^{MT,LT} \qquad ,5 \le t_{amb} \le 30 \quad (37)$$

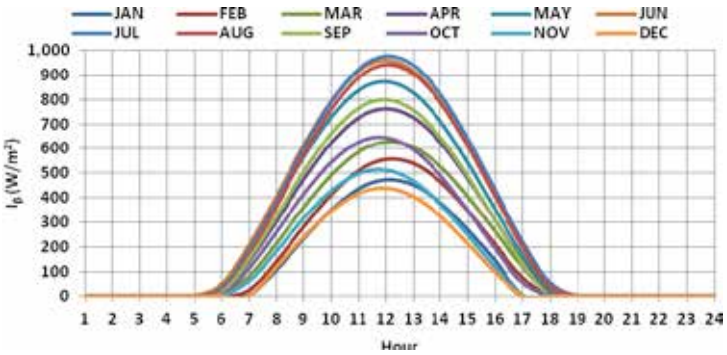
όπου mf^{MT}=0.66 και mf^{LT}=0.80, οι ελάχιστοι συντελεστές φορτίου συντήρησης και κατάψυξης αντίστοιχα. Για θερμοκρασίες μικρότερες των 5°C, το ψυκτικό φορτίο λαμβάνει τιμή ίση με αυτή του mf, ενώ για θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 30°C το ψυκτικό φορτίο αντιστοιχεί το μέγιστο εγκατεστημένο.

Ο υπολογισμός της μέσης ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση [12]:

$$\bar{I}_\beta = I_T \cdot \left[\left(1 - \frac{I_d}{I_T}\right) \cdot R_b + 0.5 \cdot \frac{I_d}{I_T} \cdot (1 + \cos(\beta)) + 0.5 \cdot \rho \cdot (1 - \cos(\beta))\right] \quad (38)$$

Η γωνία κλίσης των συλλεκτών θεωρείται β=23°, ενώ όλες οι υπόλοιπες απαιτούμενες παράμετροι υπολογίζονται σύμφωνα με τις οδηγίες των ΤΟΤΕΕ [12], όπου για τους υπολογισμούς λαμβάνονται υπόψη τα κλιματολογικά δεδομένα της Αθήνας (Ελληνικό). Η υπολογιζόμενη μέση ημερήσια διακύμανση

της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στο κεκλιμένο επίπεδο των συλλεκτών για κάθε μήνα δίνεται στο γράφημα της **Εικόνας 5**.



Εικόνα 5: *Μέση ημερήσια διακύμανση προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας για κάθε μήνα.*

2.4. Μεθοδολογία προσομοίωσης

Για τη μοντελοποίηση των συστημάτων και την πραγματοποίηση ενεργειακής ανάλυσης, υπολογίζονται με χρήση των εξισώσεων που παρουσιάστηκαν όλα τα θερμοδυναμικά μεγέθη σε κάθε σημείο της παρουσιαζόμενη διάταξης. Τα συστήματα θερμοδυναμικών εξισώσεων επιλύονται μέσω διαδικασίας βελτιστοποίησης στη Matlab, όπου για τον υπολογισμό των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων σε κάθε κατάσταση λειτουργίας γίνεται αξιοποίηση της βιβλιοθήκης CoolProp. Συγκεκριμένα, η υψηλή πίεση ph κατά τη διακρίσιμη λειτουργία (transcritical) δεν εξαρτάται άμεσα από την εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος όπως συμβαίνει κατά την υποκρίσιμη λειτουργία (subcritical), αλλά υπολογίζεται με στόχο τη μεγιστοποίηση του $COP_{booster}$. Συγκεκριμένα, αύξηση της ph συνεπάγεται αύξηση του λόγου πίεσης και της κατανάλωσης των συμπιεστών μέσης πίεσης, ενώ ταυτόχρονα αυξάνεται η ψυκτική ικανότητα του συστήματος ανά μονάδα μάζας ψυκτικού μέσου, λόγω μείωσης του flash-gas στο δοχείο υγρού [13]. Κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης η ph λαμβάνει τιμές από 74 έως 120 bar.

Η θερμική απόδοση των ηλιακών συλλεκτών κενού υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση [5]:

$$\eta_{col} = 0.82 - 2.19 \cdot \left(\frac{T_{col}^{in} - T_{amb}}{I_\beta}\right) \quad (39)$$

όπου T_{col}^{in} η θερμοκρασία επιστροφής του νερού στους συλλέκτες η οποία λαμβάνεται 80°C, ενώ αντίστοιχα η θερμοκρασία εξόδου του νερού από τους συλλέκτες T_{col}^{out} θεωρείται 95°C [6].

Επομένως, η παραγόμενη θερμότητα στους συλλέκτες, η οποία αποθηκεύεται στο δοχείο αδρανείας και είναι διαθέσιμη να προσδοθεί στη γεννήτρια του ψύκτη απορρόφησης υπολογίζεται για κάθε δεδομένη χρονική στιγμή ως:

$$Q_g = \eta_{col} \cdot A_{col} \cdot I_\beta \quad (40)$$

Για την επιλογή της θερμοκρασίας της γεννήτριας του ψύκτη απορρόφησης (T_g) θεωρούμε ότι η θερμοκρασία αυτή είναι κατά 20K μικρότερη της θερμοκρασίας εξόδου του νερού από τους συλλέκτες (T_{col}^{out}) [6]. Ωστόσο, η τιμή αυτή θα πρέπει να βρίσκεται για κάθε περίπτωση εντός του εύρους θερμοκρασιών [$T_{g,min}$,$T_{g,max}$], ώστε αφενός να είναι υψηλότερη από τη θερμοκρασία του ασθενούς διαλύματος στην υψηλή πίεση ($T_{g,min}$) και αφετέρου να είναι χαμηλότερη από τη θερμοκρασία κρυστάλλωσης του διαστήματος του συστήματος ($T_{g,max}$) [7]:

$$T_{g,min} = 1.71779 + 2.20727 \cdot T_{con,ach} - 1.21801 \cdot T_{evap,ach} \quad (41)$$

$$T_{g,max} = 49.2038 + 1.20560 \cdot T_{con,ach} + 0.237967 \cdot T_{evap,ach} \quad (42)$$

Τέλος, οι πιο σημαντικές παραδοχές στην παρούσα εργασία συνοψίζονται ακολούθως, ενώ οι βασικές παράμετροι υπολογισμού παρουσιάζονται στον **Πίνακα 3**.

- Η ανάλυση πραγματοποιείται υπό σταθερές συνθήκες λειτουργίας.
- Όλες οι στραγγαλιστικές διατάξεις θεωρούνται αδιαβατικές και επομένως οι διεργασίες εντός αυτών είναι ισελθαλπικές.
- Δεν υπάρχει εξωτερική υπερθέρμανση στις αναρροφήσεις MT και LT.
- Δεν υπάρχει υπόψυξη στο συμπυκνωτή του CO_2 και του ACH.
- Η θερμοκρασία απόρριψης θερμότητας είναι κοινή στα κυκλώματα CO_2 και ACH.
- Δεν υπάρχουν απώλειες πίεσης στις σωληνώσεις και στα εξαρτήματα/συσκευές.
- Η μετάδοση θερμότητας των διάφορων εξαρτημάτω/συσκευών με το περιβάλλον του θεωρείται αμελητέα.

Πίνακας 3
Βασικές παράμετροι υπολογισμού παρούσας εργασίας.

Παράμετρος	Σύμβολο	Τιμή	Παράμετρος	Σύμβολο	Τιμή
Εγκατεστημένη ψυκτική ισχύς MT	Q^{MT}	80 kW	Εγκατεστημένη ψυκτική ισχύς LT	Q^{LT}	20 kW
Θερμοκρασία ατμοποίησης MT	t_{evap}^{MT}	-10 °C	Θερμοκρασία ατμοποίησης LT	t_{evap}^{LT}	-30 °C
Θερμοκρασία ατμοποίησης ACH	t_{evap}^{ACH}	5 °C	Υπερθέρμανση (εσωτερική)	SH	10 K
Διαφορικό θερμοκρασίας προσέγγισης στο συμπυκνωτή (subcritical)	ΔT_{apr}^{cond}	8 K	Διαφορικό θερμοκρασίας προσέγγισης στο gas-cooler (transcritical)	ΔT_{apr}^{GC}	3 K
Διαφορικό θερμοκρασίας προσέγγισης στο intercooler	ΔT_{apr}^{IC}	3 K	Αποτελεσματικότητα εναλλακτών	η_{eff}^{hex}	70%
Θερμοκρασία νερού εισόδου στους συλλέκτες	T_{col}^{in}	80 °C	Θερμοκρασία νερού εξόδου από συλλέκτες	T_{col}^{out}	95 °C
Πλήθος συλλεκτών	N_{col}	50	Συνολική συλλεκτική επιφάνεια	A_{col}	115 m^2

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Αρχικά, η θερμοδυναμική προσομοίωση του ψυκτικού κύκλου τόσο του διβάθμιου CO_2 συστήματος, όσο και του ψύκτη απορρόφησης επικυρώνονται κατόπιν σύγκρισης με πειραματικά αποτελέσματα από τη βιβλιογραφία. Στο **Πίνακα 4** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης του αναπτυσσόμενου μοντέλο για το booster σύστημα, όπου τα οποία πιστοποιούνται από τη βιβλιογραφική αναφορά [14], με μέγιστη απόλυτη ποσοστιαία απόκλιση 3.8% στο COP. Αντίστοιχα, στον **Πίνακα 5** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σύγκρισης του μοντέλου προσομοίωσης του κύκλου απορρόφησης, τα οποία πιστοποιούνται με μέγιστη απόλυτη ποσοστιαία απόκλιση 2.6% στο COP σε σχέση με την αναφορά [15].

Πίνακας 4
Πιστοποίηση του ψυκτικού κύκλου CO_2 με βιβλιογραφική αναφορά [14].

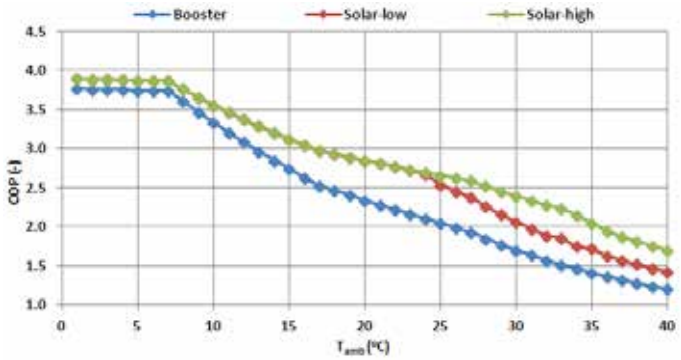
T_{evap} (°C)	Ph (bar)	T_{gc}^{out} (°C)	Literature COP	Simulation COP	dev
0	82.8	28.36	2.57	2.50	2.6%
0	89.6	33.51	1.93	2.00	3.8%
0	102.6	41.69	1.32	1.37	3.5%

-10	77.6	27.00	1.91	1.88	1.6%
-10	82.5	32.79	1.44	1.49	3.2%
-10	101.9	41.09	0.98	0.99	1.0%

Πίνακας 5
Πιστοποίηση του ψυκτικού κύκλου απορρόφησης με βιβλιογραφική αναφορά [15].

T_e^{ach}	T_g^{ach}	T_c^{ach}	T_a^{ach}	Literature			Simulation			Deviation (abs)		
(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	COP	xs	xw	COP	xw	xs	COP	xw	xs
4	70	31	31	0.79	0.59	0.54	0.80	0.53	0.58	0.3%	1.1%	1.2%
4	69	31	35	0.70	0.57	0.56	0.68	0.55	0.57	2.6%	1.6%	0.5%
5	66	28	35	0.77	0.58	0.55	0.77	0.55	0.58	0.5%	0.4%	0.9%
6	72	33	37	0.73	0.58	0.56	0.74	0.55	0.58	1.4%	1.3%	0.7%
8	63	25	37	0.82	0.58	0.54	0.83	0.54	0.58	1.5%	0.6%	0.3%
8	85	46	39	0.59	0.57	0.56	0.60	0.55	0.57	2.6%	0.9%	0.9%
9	66	28	34	0.84	0.58	0.52	0.85	0.52	0.58	1.1%	0.0%	0.9%

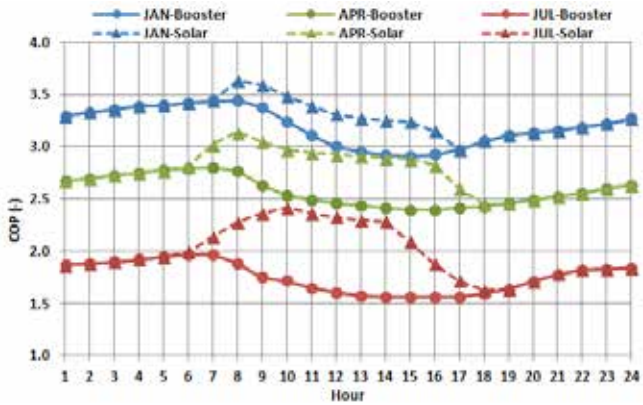
Έχοντας πιστοποιήσει την ορθότητα των υπολογιστικών μοντέλων, στη συνέχεια πραγματοποιείται παραμετρική ανάλυση των εξεταζόμενων συστημάτων. Συγκεκριμένα, για θερμοκρασίες περιβάλλοντος από 1 έως 40°C υπολογίζεται ο συντελεστής συμπεριφοράς (COP) του συμβατικού booster συστήματος, καθώς επίσης και της προτεινόμενης διάταξης ενσωμάτωσης του ψύκτη απορρόφησης, για δύο περιπτώσεις σταθερής προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, χαμηλής (450W/m^2) και υψηλής (800W/m^2) αντιστοίχως.



Εικόνα 6: *Επίδραση θερμοκρασίας περιβάλλοντος στο συντελεστή συμπεριφοράς (COP) των εξεταζόμενων τοπολογιών.*

Από τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης, τα οποία παρουσιάζονται στην **Εικόνα 6**, προκύπτει βελτίωση του COP για την προτεινόμενη διάταξη σε σχέση με το συμβατικό σύστημα. Συγκεκριμένα, υπολογίζεται μέγιστη βελτίωση του COP κατά 26.44% για την περίπτωση της χαμηλής ακτινοβολίας και 47.34% αντίστοιχα για της υψηλής.

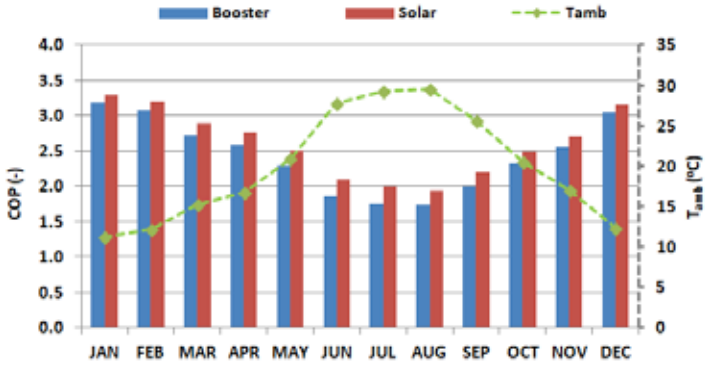
Ακολούθως, με χρήση των ετήσιων κλιματολογικών δεδομένων της περιοχής του εξεταζόμενου σουπερμάρκετ υπολογίζεται το COP της προτεινόμενης τοπολογίας της μέσης ώρας για κάθε μήνα του έτους. Στην **Εικόνα 7** συγκρίνεται η μέση ημερήσια διακύμανση του COP τριών αντιπροσωπευτικών μηνών του έτους (Ιανουάριος, Απρίλιος, Ιούλιος), σε σχέση με το συμβατικό σύστημα.



Εικόνα 7: *Μέση ημερήσια διακύμανση συντελεστή συμπεριφοράς (COP) εξεταζόμενων τοπολογιών για τρεις αντιπροσωπευτικούς μήνες.*

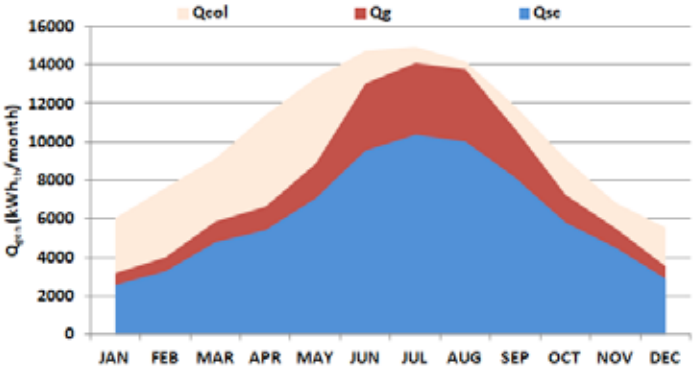
Όπως φαίνεται στο διάγραμμα, για κάθε μήνα κατά τις ώρες που σημειώνεται ηλιοφάνεια σημειώνεται βελτίωση του COP για την περίπτωση της προτεινόμενης τοπολογίας σε σχέση με το συμβατικό σύστημα. Για τις υπόλοιπες ώρες τις ημέρας κατά τις οποίες δεν υπάρχει αξιοποιήσιμη ηλιακή ακτινοβολία, η απόδοση των δύο συστημάτων ταυτίζεται. Τέλος, παρατηρείται ότι κατά τους θερινούς μήνες όπου σημειώνονται υψηλότερες θερμοκρασίες περιβάλλοντος, η απόδοση και των δύο τοπολογιών είναι χαμηλότερη σε σχέση με τους χειμερινούς μήνες, ενώ αντίστοιχα η βελτίωση του COP για την προτεινόμενη διάταξη είναι μεγαλύτερη τους μήνες αυτούς λόγω των υψηλότερων επιπέδων ηλιακής ακτινοβολίας.

Η μέση τιμή του COP για κάθε μήνα του έτους παρουσιάζεται σε σύγκριση με το συμβατικό σύστημα στην **Εικόνα 8**. Στο διάγραμμα επιβεβαιώνεται η χαμηλότερη απόδοση των συστημάτων CO_2 κατά τους θερινούς μήνες σε σχέση με τους χειμερινούς, λόγω των υψηλότερων θερμοκρασιών περιβάλλοντος, οι οποίες οδηγούν στη διακρίσιμη λειτουργία.



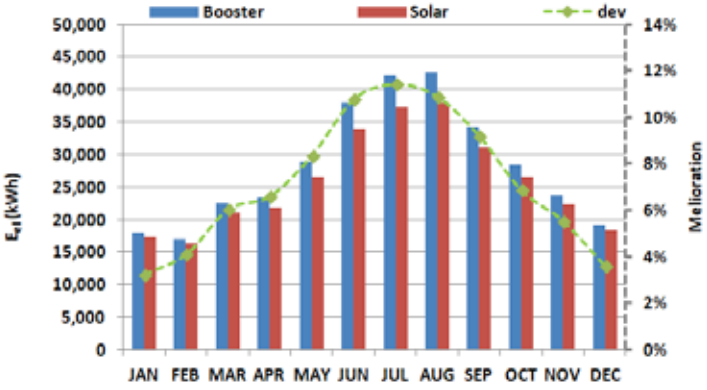
Εικόνα 8: *Ετήσια διακύμανση μέσου μηνιαίου συντελεστή συμπεριφοράς εξεταζόμενων (COP) τοπολογιών και μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας περιβάλλοντος.*

Στη συνέχεια υπολογίζεται η απαιτούμενη μηνιαία θερμότητα υπόψυξης (Q_{sc}) για την προτεινόμενη διάταξη, η οποία αποτελεί ουσιαστικά την παραγόμενη ψυκτική ισχύ στον ψύκτη απορρόφηση. Αντίστοιχα, υπολογίζεται η απαιτούμενη μηνιαία προσδιδόμενη θερμότητα στη γεννήτρια του ψύκτη απορρόφησης (Q_g), η οποία συγκρίνεται με τη μηνιαία παραγόμενη θερμότητα στους ηλιακούς συλλέκτες (Q_{col}) που διατίθεται προς αξιοποίηση.



Εικόνα 9: *Ετήσια διακύμανση μηνιαίας απορροφοούμενης θερμικής ενέργειας στον ψύκτη απορρόφησης.*

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην **Εικόνα 9**, όπου παρατηρείται ότι η παραγόμενη θερμότητα στους συλλέκτες δεν αποδίδεται ολόκληρη στη γεννήτρια. Συγκεκριμένα, αξιοποιείται η απαιτούμενη θερμότητα η οποία με τη σειρά της παράγει το επιθυμητό αποτέλεσμα υπόψυξης. Το μεγαλύτερο ποσοστό αξιοποίησης σημειώνεται κατά το μήνα Αύγουστο ο οποίος είναι και ο θερμότερος μήνας του έτους, ενώ η σημειωμένη περιοχή με ροζ χρώμα στο γράφημα παρουσιάζει εποπτικά τη θερμότητα η οποία παράγεται στους ηλιακούς συλλέκτες και δεν αξιοποιείται.



Εικόνα 10: *Ετήσια διακύμανση ηλεκτρικής κατανάλωσης εξεταζόμενων τοπολογιών.*

Τέλος, υπολογίζεται για κάθε μήνα η συνολική ηλεκτρική κατανάλωση των συστημάτων των προτεινόμενων τοπολογιών. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην **Εικόνα 10** επιβεβαιώνουν ότι η προτεινόμενη διάταξη έχει καλύτερη ενεργειακή απόδοση, καθώς υπολογίζεται ότι είναι κατά 8.93% πιο

οικονομική ετησίως σε σχέση με τη συμβατική λύση, ποσοστό που αντιστοιχεί σε εξοικονόμηση κατά 30,185.82 kWh/έτος. Το μεγαλύτερο ποσοστό εξοικονόμησης σημειώνεται για το μήνα Ιούλιο και είναι 11.44%, ο οποίος είναι ο μήνας με τη μεγαλύτερη ηλιακή ακτινοβολία.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση, μέσω ενεργειακής ανάλυσης, της ενσωμάτωσης μίας ηλιακά τροφοδοτούμενης διάταξης απορρόφησης μέσω υπόψυξης σε διβάθμιο ψυκτικό σύστημα CO_2, με σκοπό την εφαρμογή της σε πραγματική εγκατάσταση εμπορικής ψύξης. Τα πιο σημαντικά συμπεράσματα συνοψίζονται ακολούθως:

- Η προτεινόμενη τοπολογία είναι πιο αποδοτική σε σχέση με το συμβατικό σύστημα. Με χρήση πραγματικών κλιματικών δεδομένων υπολογίζεται ετήσια ενεργειακή εξοικονόμηση κατά 8,93% που αντιστοιχεί σε 30,185.82 kWh/έτος.
- Μέσω παραμετρικής ανάλυσης υπολογίζεται αύξηση του COP για την προτεινόμενη διάταξη έως και 47.35%.
- Μεγαλύτερη ενεργειακή εξοικονόμηση σημειώνεται κατά τους θερμότερους μήνες, καθώς τότε σημειώνονται τόσο μεγαλύτερα επίπεδα θερμοκρασιών, όσο και ηλιακής ακτινοβολίας. Επίσης τους θερινούς μήνες, σημειώνονται μεγαλύτερα ποσοστά αξιοποίησης της παραγόμενης θερμότητας στους ηλιακούς συλλέκτες..
- Η προτεινόμενη διάταξη είναι μία πολλά υποσχόμενη λύση για την εδραίωση των ψυκτικών συστημάτων CO_2 στην Ελλάδα, καθώς επιτρέπει την αύξηση της απόδοσής τους μέσω αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας η οποία έχει πολύ υψηλό δυναμικό στην περιοχή. Μοναδικό μειονέκτημα αποτελεί το υψηλό κόστος κτήσης της διάταξης απορρόφησης η οποία προς το παρόν δεν θεωρείται ώριμη εμπορικά τεχνολογία.
- Μπορεί να διερευνηθεί στο μέλλον η δυνατότητα αξιοποίησης της παραγόμενης θερμότητας στους ηλιακούς συλλέκτες η οποία δεν χρησιμοποιείται άμεσα από τον ψύκτη απορρόφησης, είτε για τη διάθεσή της σε άλλες ανάγκες του κτιρίου του σουπερμάρκετ (π.ψ. ZNX), είτε για την αποθήκευσή της με χρήση υλικών αλλαγής φάσης (PCM) με σκοπό την ετεροχρονισμένη απόδοσή της στο σύστημα κατά τις ώρες που δεν σημειώνεται επαρκής ηλιοφάνεια.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η συγγραφική ομάδα επιθυμεί να ευχαριστήσει ιδιαιτέρως την ΜΕΤΡΟ ΑΕΒΕ για τη δυνατότητα αξιοποίησης μετρητικών διατάξεων που χρησιμοποιούνται στις εγκαταστάσεις της, καθώς και την εν γένει υποστήριξη της ερευνητικής της δραστηριότητας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] S. A. Tassou, Y. Ge, A. Hadawey, and D. Marriott, “Energy consumption and conservation in food retailing,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 31, no. 2–3, pp. 147–156, 2011.
[2] “European Commission. Regulation (EU) No 517/2014 of the European Parliament and of the Council of 16th April 2014 on fluorinated greenhouse gases and repealing Regulation (EC) No 842/2006,” 2014.
[3] Y. T. Ge and S. A. Tassou, “Thermodynamic analysis of transcritical CO 2 booster refrigeration systems in supermarket,” vol. 52, pp. 1868–1875, 2011.
[4] P. Gullo, B. Elmegaard, and G. Cortella, “Advanced exergy analysis of a R744 booster refrigeration system with parallel compression,” *Energy*, vol. 107, pp. 562–571, 2016.
[5] E. Bellos, C. Tzivanidis, and K. A. Antonopoulos, “Exergetic, energetic and financial evaluation of a solar driven absorption cooling system with various collector types,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 102, pp. 749–759, 2016.

[6] Z. Sun, C. Wang, Y. Liang, H. Sun, S. Liu, and B. Dai, “Theoretical study on a novel CO2 Two-stage compression refrigeration system with parallel compression and solar absorption partial cascade refrigeration system,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 204, no. August, p. 112278, 2020.
[7] E. Bellos and C. Tzivanidis, “Enhancing the performance of a CO2 refrigeration system with the use of an absorption chiller,” *Int. J. Refrig.*, vol. 108, pp. 37–52, 2019.
[8] Dorin, “Dorin software,” *19.10.*, 2019. [Online]. Available: http://www.dorin.com/en/Software.
[9] M. Karampour and S. Sawalha, “State-of-the-art integrated CO2 refrigeration system for supermarkets: A comparative analysis,” *Int. J. Refrig.*, vol. 86, pp. 239–257, 2018.
[10] G. Mitsopoulos, E. Syngounas, D. Tsimpoukis, E. Bellos, C. Tzivanidis, and S. Anagnostatos, “Annual performance of a supermarket refrigeration system using different configurations with CO2 refrigerant,” *Energy Convers. Manag. X*, vol. 1, no. January, p. 100006, 2019.
[11] M. Zhang, “Energy analysis of various supermarket refrigeration systems,” *Int. Refrig. Air Cond. Conf. Pap. 856.*, pp. 1–8, 2006.
[12] a. Argiriou *et al.*, “Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-3/2010 Κλιματικά Δεδομένα Ελληνικών Περιοχών [Climate data of Greek Cities], Technical Directive by the Technical Chamber of Greece,” *Υπουργειο Περιβαλλοντοσ Ενεργειασ Και Κλιματικησ Αλλαγησ – Υ.Π.Ε.Κ.Α. Ειδικη Γραμματεια Επιθεωρησησ Περιβαλλοντοσ Και Ενεργειασ Ειδικη Υπηρεσια Επιθεωρητων Ενεργειασ Τεχνικο Επιμελητηριο Ελλαδασ*, no. 1, 2010.
[13] D. Tsimpoukis *et al.*, “Energy and environmental investigation of R744 all-in-one con fi gurations for refrigeration and heating / air conditioning needs of a supermarket,” *J. Clean. Prod.*, vol. 279, p. 123234, 2021.
[14] R. Llopis, L. Nebot-Andrés, R. Cabello, D. Sánchez, and J. Catalán-Gil, “Experimental evaluation of a CO2 transcritical refrigeration plant with dedicated mechanical subcooling,” *Int. J. Refrig.*, vol. 69, pp. 361–368, 2016.
[15] T. K. Gogoi and D. Konwar, “Exergy analysis of a H2O-LiCl absorption refrigeration system with operating temperatures estimated through inverse analysis,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 110, pp. 436–447, 2016.

ΕΥΦΥΗ ΚΤΙΡΙΑ ΓΙΑ ΕΥΦΥΕΙΣ ΠΟΛΕΙΣ: ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΕΥΦΥΟΥΣ ΕΤΟΙΜΟΤΗΤΑΣ ΚΤΙΡΙΩΝ

Στέλλα Αθανασάκη, Κατερίνα Τσικαλουδάκη[1]

[1] Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, ΑΠΘ
e-mail: athastel@civil.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην κριτική ανασκόπηση του δείκτη ευφυούς ετοιμότητας κτιρίων (Smart Readiness Indicator - SRI) και στην πρακτική εφαρμογή του σε υπάρχον κτίριο στην Ελλάδα. Ο εν λόγω δείκτης είναι ο πρώτος που αποτιμά την τεχνολογική ετοιμότητα των κτιρίων και η εισαγωγή του έγινε με την αναθεωρημένη ευρωπαϊκή οδηγία για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων το 2018. Ουσιαστικά, εξετάζει την παρουσία και αξιολογεί τη λειτουργικότητα έξυπνων υπηρεσιών, η ενσωμάτωση των οποίων στα κτίρια αποσκοπεί στην επίτευξη των τριών λειτουργιών - κλειδιών της οδηγίας, δηλαδή την *ικανότητα ανταπόκρισης στις ανάγκες των χρηστών*, την *ενεργειακή ευελιξία* και την *ενεργειακή εξοικονόμηση και λειτουργία*.

Το ευφυές κτίριο δεν είναι απλά βιώσιμο, αλλά προσαρμόζεται διαρκώς στα περιβαλλοντικά ερεθίσματα και προτιμήσεις του χρήστη και αλληλοεπιδρά μαζί του. Επιπλέον, τα ευφυή κτίρια αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι των ευφυών πόλεων, δηλαδή των σύγχρονων αστικών κέντρων που κάνουν χρήση όσο το δυνατόν περισσότερων διαθέσιμων τεχνολογιών επικοινωνίας και διαδικτύου για να βελτιώσουν την ποιότητα ζωής των κατοίκων τους, σεβόμενα το περιβάλλον και τις αρχές της αειφόρου, συμμετοχικής διαχείρισης. Σε αυτό το πλαίσιο, στην εργασία γίνεται η αναλυτική περιγραφή της μεθόδου πολυκριτηριακής ανάλυσης μέσω της οποίας ο SRI και οι επί μέρους δείκτες αξιολογούν τα κτίρια. Τέλος, πραγματοποιείται ο υπολογισμός τους σε υπάρχον κτίριο κατοικίας στην Ελλάδα με σκοπό τη διερεύνηση τυχόν δυσκολιών στην εφαρμογή της μεθοδολογίας, τον εντοπισμό τυχόν ελλείψεων και το σχολιασμό των τελικών αποτελεσμάτων.

Λέξεις Κλειδιά: *ευφυή κτίρια, δείκτης ευφυούς ετοιμότητας, ενεργειακή αποδοτικότητα, προσαρμοστικότητα, ενεργειακή ευελιξία*

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ένας από τους μακροπρόθεσμους στόχους της Ευρωπαϊκής Ένωσης για το έτος 2050, είναι η μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου κατά 80% κάτω από τα επίπεδα του 1990 και η αντίστοιχη αύξηση της χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Σπουδαίο ρόλο στην επίτευξή τους θα διαδραματίσει ο κτιριακός τομέας, οποίος εκτιμάται πως είναι υπεύθυνος για το 36% των συνολικών εκπομπών CO_2 και το 40% της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας στην Ευρώπη [1]. Συγκεκριμένα στην Ελλάδα υπάρχουν 3,7 εκατομμύρια κτίρια που δεν είναι ενεργειακά αποδοτικά και απαιτούν την κατανάλωση σημαντικών ποσοτήτων φυσικών πόρων για τη λειτουργία τους [2]. Καθίσταται συνεπώς σαφές πως η βιώσιμη διαχείριση του δομημένου περιβάλλοντος γενικότερα και των ενεργειακών συστημάτων ειδικότερα αποτελούν ζητήματα επιτακτικής ανάγκης.

Η αναθεωρημένη ευρωπαϊκή οδηγία για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων, που εκδόθηκε το 2018, θέτει εκ νέου τις βάσεις για την αντιμετώπιση των προαναφερθέντων ζητημάτων, εισάγοντας το πρώτο, εθελοντικού χαρακτήρα, σύστημα αποτίμησης της ευφυούς ετοιμότητας των κτιρίων στην Ευρώπη. Στόχος είναι η αποδέσμευση του κτιριακού τομέα από τις συμβατικές μορφές ενέργειας μέσω της στροφής τους στην υιοθέτηση σύγχρονων, έξυπνων τεχνολογιών και στην επίτευξη των 3 λειτουργιών - κλειδιών, που καθορίζει η οδηγία. Σύμφωνα με αυτές, τα κτίρια θα είναι όχι μόνο ενεργειακά αποδοτικά αλλά και ευέλικτα ικανοποιώντας παράλληλα τις ανάγκες των χρηστών τους [3]. Το υπάρχον και μελλοντικό κτιριακό δυναμικό θα μετατραπούν σε ευφυή, δηλαδή θα χαρακτηρίζονται από τη δυνατότητα αλληλεπίδρασης και προσαρμογής στα εξωτερικά, περιβαλλοντικά ερεθίσματα και στις προτιμήσεις και συνήθειες των χρηστών τους μέσω της αξιοποίησης αισθητήρων, λογισμικού και έξυπνων μετρητών [4]. Τελικά, ο κτιριακός τομέας, ως αναπόσπαστο κομμάτι του έξυπνου περιβάλλοντος σε συνδυασμό με την έξυπνη διακυβέρνηση, διαβίωση, οικονομία, κινητικότητα, καθώς και το ανθρώπινο δυναμικό, θα διαμορφώνουν τις ευφυείς πόλεις με τελικό σκοπό τη βελτίωση του επιπέδου ζωής των κατοίκων τους, την προστασία του περιβάλλοντος και την εξασφάλιση της κοινωνικής ισοτιμίας, όπως επιτάσσει η αρχή της αειφορίας [5].

2 ΔΕΙΚΤΗΣ ΕΥΦΥΟΥΣ ΕΤΟΙΜΟΤΗΤΑΣ ΚΤΙΡΙΩΝ

2.1 Δομικά στοιχεία δείκτη

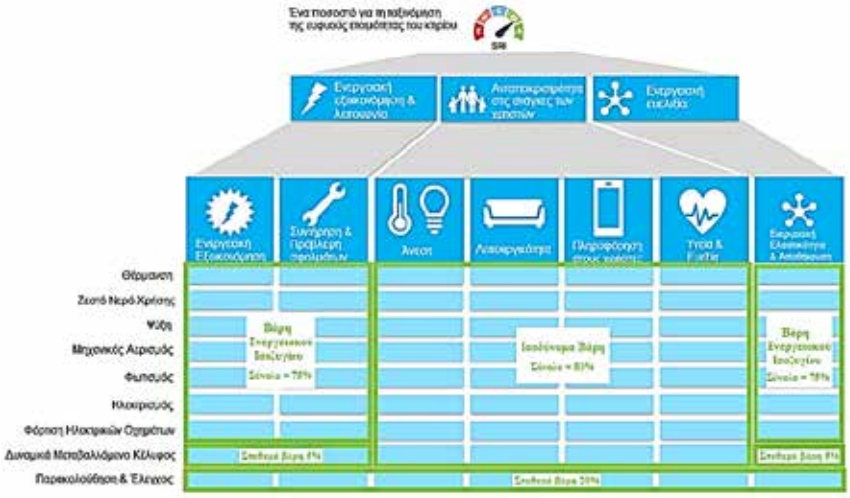
Ο δείκτης ευφυούς ετοιμότητας κτιρίων εξετάζει την ύπαρξη κι αξιολογεί το επίπεδο λειτουργικότητας καταλόγων ευφυώς έτοιμων υπηρεσιών, δηλαδή υπηρεσιών που κάνουν χρήση τεχνολογιών επικοινωνίας και διαδικτύου, αισθητήρων, μετρητών καθώς και συνδυασμού τους. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν ο έλεγχος του φυσικού φωτισμού και της θερμοκρασίας ενός χώρου βάσει αισθητήρων και μετρητών, η ενημέρωση των χρηστών ενός κτιρίου σχετικά με την κατανάλωση αλλά και την παραγωγή ενέργειας μέσω εφαρμογής κινητού τηλεφώνου και ο έλεγχος της ποιότητας αέρα εσωτερικών χώρων, που μπορεί να οδηγεί σε ενεργοποίηση των συστημάτων εξαερισμού όταν αυτό κρίνεται αναγκαίο [6].

Ο τελικός σκοπός της εφαρμογής έξυπνων υπηρεσιών σε ένα κτίριο ή κτιριακό τομέα είναι η ικανοποίηση των 3 λειτουργιών - κλειδιών της ευρωπαϊκής οδηγίας, δηλαδή: της *ενεργειακής εξοικονόμησης και λειτουργίας*, της *ικανότητας ανταπόκρισης στις ανάγκες των χρηστών* και της *ενεργειακής ευελιξίας*. Οι τρεις λειτουργίες - κλειδιά είναι ισότιμες μεταξύ τους (δηλαδή έκαστη συμμετέχει κατά το 1/3 στη διαμόρφωση του δείκτη SRI και των επί μέρους δεικτών) και η κάθε μία περιλαμβάνει κριτήρια επίδρασης, ως προς τα οποία αξιολογούνται οι προαναφερθείσες υπηρεσίες (Εικόνα 1). Πιο αναλυτικά, τα κριτήρια επίδρασης είναι συνολικά 7 και οργανώνονται ως εξής: η «ενεργειακή εξοικονόμηση» και «συντήρηση - πρόβλεψη σφαλμάτων» ανήκουν στην λειτουργία - κλειδί *ενεργειακή εξοικονόμηση και λειτουργία* και φέρουν βάρος 16,7% το κάθε ένα, τα κριτήρια επίδρασης «άνεση», «λειτουργικότητα», «πληροφόρηση στους χρήστες» και «υγεία - ευεξία» εντάσσονται στην *ικανότητα ανταπόκρισης στις ανάγκες των χρηστών* με βάρος 8,3% έκαστο και τέλος η «ενεργειακή ελαστικότητα και αποθήκευση» αποτελεί το μοναδικό κριτήριο επίδρασης της *ενεργειακής ευελιξίας* και λαμβάνει τον μέγιστο συντελεστή βαρύτητας 33,3% [6].

Εικόνα 1: Οι τρεις λειτουργίες - κλειδιά, τα κριτήρια επίδρασης και οι συντελεστές βαρύτητάς τους (απόδοση σύμφωνα με [6]).

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2 οι ευφυώς έτοιμες υπηρεσίες οργανώνονται σε 9 τεχνικούς τομείς: στη θέρμανση, στο ζεστό νερό χρήσης, στη ψύξη, στον μηχανικό αερισμό, στο φωτισμό, στον ηλεκτρισμό, στη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων, στο δυναμικά μεταβαλλόμενο κέλυφος και στην παρακολούθηση - έλεγχο. Η αξιολόγηση τους ως προς τα 7 κριτήρια επίδρασης γίνεται μέσω συντελεστών βαρύτητας, οι οποίοι αποτελούνται από τα βάρη ενεργειακού ισοζυγίου, τα σταθερά βάρη και τα ισοδύναμα βάρη:

- Τα βάρη ενεργειακού ισοζυγίου, εξαρτώνται από το είδος χρήσης του εξεταζόμενου κτιρίου ή κτιριακού τομέα (δηλαδή κτίρια κατοικίας και κτίρια άλλων χρήσεων) καθώς και από τη γεωγραφική θέση του. Συγκεκριμένα, η Ευρώπη διαιρείται σε πέντε κλιματικές ζώνες και η Ελλάδα ανήκει σε αυτή της νότιας Ευρώπης. Τα βάρη ενεργειακού ισοζυγίου εφαρμόζονται στους τεχνικούς τομείς: θέρμανση, ζεστό νερό χρήσης, ψύξη, μηχανικός αερισμός, φωτισμός, ηλεκτρισμός και φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων των λειτουργιών *ενεργειακή εξοικονόμηση* και *ενεργειακή ευελιξία*.
- Τα ισοδύναμα βάρη αφορούν μόνο στη δεύτερη λειτουργία - κλειδί, *ανταποκρισιμότητα στις ανάγκες των χρηστών* για όλους τους τομείς πέραν της παρακολούθησης - ελέγχου.
- Τα σταθερά βάρη αφορούν μόνο στους τεχνικούς τομείς της παρακολούθησης - ελέγχου για όλες τις λειτουργίες - κλειδιά και του δυναμικά μεταβαλλόμενου κελύφους για τις λειτουργίες - κλειδιά *ενεργειακή εξοικονόμηση* και *ενεργειακή ευελιξία* [6].



Εικόνα 2: Τεχνικοί τομείς, κριτήρια επίδρασης και συντελεστές βαρύτητας των τομέων οργανωμένα στις τρεις λειτουργίες - κλειδιά (απόδοση σύμφωνα με [6]).

Τα σταθερά βάρη μπορούν να λάβουν τις τιμές: 0,05 για τον τεχνικό τομέα δυναμικά μεταβαλλόμενο κέλυφος ως προς τα κριτήρια επίδρασης «ενεργειακή εξοικονόμηση», «συντήρηση - πρόβλεψη σφαλμάτων» και «ενεργειακή ελαστικότητα - αποθήκευση» και 0,20 για τον τεχνικό τομέα παρακολούθηση - έλεγχος ως προς τα 7 κριτήρια επίδρασης. Οι συντελεστές βαρύτητας ενεργειακού ισοζυγίου και τα ισοδύναμα βάρη μπορούν να προσδιορισθούν με δύο τρόπους κατά τον υπολογισμό του δείκτη ευφυούς ετοιμότητας ενός κτιρίου ή τμήματος κτιρίου. Στον Πίνακα 1 φαίνονται τα βάρη των τομέων ανά κριτήριο επίδρασης για τα κτίρια κατοικίας στη Νότια Ευρώπη, όπως δίνονται μέσα από τις δημοσιευμένες τεχνικές μελέτες [6]. Οι τιμές αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν αυτούσιες ή να υπολογισθούν από τον εκάστοτε μελετητή ως ακολούθως:

- Τα ισοδύναμα βάρη εξαρτώνται από τα σταθερά βάρη και από τον αριθμό των σχετικών τεχνικών τομέων και υπολογίζονται σύμφωνα με τον τύπο:

$$ισοδ._{\cdot τεχν.τομέας, κριτήριο\ επίδρασης} = \frac{100 - \sum(σταθερά\ βάρη)}{αριθμός\ σχετικών\ τεχν.τομέων} \quad (1)$$

- Τα βάρη ενεργειακού ισοζυγίου εξαρτώνται από τα σταθερά βάρη και το συντελεστή a_{domain} σύμφωνα με τον τύπο:

$$ενεργ.ισοζ._{\cdot τεχν.τομέας, κριτήριο\ επίδρασης} = (100 - \sum(σταθερά\ βάρη)) \times a_{τεχν.τομέας} \quad (2)$$

Ο συντελεστής $a_{τεχν.τομέας}$ δίνεται επίσης σε πίνακες (Πίνακας 2) ή υπολογίζεται ως ο λόγος της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας του εξεταζόμενου τεχνικού τομέα προς τη συνολική κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας του κτιρίου, η οποία αφορά στις απαιτήσεις για θέρμανση, ζεστό νερό χρήσης, ψύξη, αερισμό, φωτισμό, καθώς και το μερίδιο που προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές, σύμφωνα με τον τύπο:

$$a_{τεχν.τομέας} = \frac{Q_{τεχνικός\ τομέας}}{Q_{συνολικό}} \quad (3)$$

όπου

$$Q_{τεχνικός\ τομέας} = \{Q_{ΘΕΡΜ.}, Q_{Z.N.X}, Q_{ΨΥΞΗ}, Q_{ΑΕΡ.}, Q_{ΦΩΤ}, Q_{ΑΝΑΝ.ΠΗΓΕΣ}.\} \quad (4)$$

$$Q_{συνολικό} = Q_{ΘΕΡΜ.} + Q_{Z.N.X.} + Q_{ΨΥΞΗ} + Q_{ΑΕΡ.} + Q_{ΦΩΤ.} + Q_{ΑΝΑΝ.ΠΗΓΕΣ} \quad (5)$$

Πίνακας 1: Συντελεστές βαρύτητας κτιρίων κατοικίας στη Νότια Ευρώπη (απόδοση σύμφωνα με [6]).

	Ενεργειακή Εξοικονόμηση	Ενεργειακή «Ελαστικότητα» & Αποθήκευση	Άνεση	Λειτουργικότητα	Υγεία & Ευεξία	Συντήρηση & Πρόβλεψη Σφαλμάτων	Πληροφόρηση Χρηστών
Θέρμανση	0,32	0,38	0,16	0,10	0,16	0,33	0,11
Ζεστό Νερό Χρήσης	0,10	0,12	0,00	0,10	0,00	0,10	0,11
Ψύξη	0,07	0,08	0,16	0,10	0,16	0,07	0,11
Μηχανικός Αερισμός	0,09	0,00	0,16	0,10	0,16	0,10	0,11
Φωτισμός	0,03	0,00	0,16	0,10	0,16	0,00	0,00
Ηλεκτρισμός	0,15	0,17	0,00	0,10	0,00	0,15	0,11
Δυναμικά Μεταβαλλόμενο Κέλυφος	0,05	0,00	0,16	0,10	0,16	0,05	0,11
Φόρτιση Ηλεκτρικών Οχημάτων	0,00	0,05	0,00	0,10	0,00	0,00	0,11
Παρακολούθηση & Έλεγχος	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20

Πίνακας 2: Συντελεστής $a_{τεχν.\ τομέας}$ για κτίρια κατοικίας ανά κλιματική ζώνη (απόδοση σύμφωνα με [6]).

$a_{τεχν.τομέας}$	Βόρεια Ευρώπη	Δυτική Ευρώπη	Νότια Ευρώπη	ΒΑ Ευρώπη	ΝΑ Ευρώπη
ΘΕΡΜΑΝΣΗ	39,9	45,3	42,2	40,5	27,5
ΖΕΣΤΟ ΝΕΡΟ ΧΡΗΣΗΣ	12,4	10,2	13,3	18,6	7,7
ΨΥΞΗ	0,0	4,1	9,2	0,0	19,5
ΜΗΧ. ΑΕΡΙΣΜΟΣ	25,0	23,8	12,3	25,4	14,4
ΦΩΤΙΣΜΟΣ	4,9	2,0	3,6	0,8	1,2
ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΣ	17,8	14,8	19,5	14,7	29,6

2.2 Μεθοδολογία υπολογισμού δείκτη

Για τον υπολογισμό του δείκτη SRI και των επί μέρους δεικτών μπορούν να χρησιμοποιηθούν τρεις μέθοδοι:

- Η απλοποιημένη μέθοδος Α, η οποία εφαρμόσθηκε στην παρούσα μελέτη, περιλαμβάνει την αξιολόγηση ενός καταλόγου 27 υπηρεσιών και ενδείκνυται για απλά κτίρια.

- Στη μέθοδο Β ο αριθμός των υπηρεσιών διπλασιάζεται και είναι κατάλληλη για κτίρια μεγαλύτερης πολυπλοκότητας. Επίσης, η αξιολόγηση περιλαμβάνει υπηρεσίες υψηλότερου επιπέδου λειτουργικότητας σε σχέση με τις υπηρεσίες της μεθόδου Α.
- Η μέθοδος Γ βρίσκεται υπό διερεύνηση και θα βασίζεται στην αξιολόγηση πραγματικών, μετρήσιμων δεδομένων της λειτουργίας του εξεταζόμενου κτιρίου.

Πιο αναλυτικά, η μεθοδολογία υπολογισμού του δείκτη ευφυούς ετοιμότητας είναι κοινή για τις μεθόδους Α και Β και μπορεί να διακριτοποιηθεί σε 7 βήματα [6].

1) Πρώτο βήμα: Διαλογή υπηρεσιών

Το πρώτο στάδιο είναι η διαλογή, δηλαδή η καταγραφή όλων των υπηρεσιών του κτιρίου για κάθε έναν από τους 9 τεχνικούς τομείς. Εξετάζεται ποιες υπηρεσίες είναι παρούσες, ενώ από τις απούσες ελέγχεται ποιες είναι επιθυμητό ή και απαραίτητο από τη νομοθεσία να υπάρχουν έστω και με τον ελάχιστο βαθμό λειτουργικότητας. Το βήμα αυτό αποτελεί το πιο χρονοβόρο κομμάτι της διαδικασίας, ιδίως για σύνθετα κτίρια, και επηρεάζει όλα τα επόμενα στάδια καθώς και το τελικό αποτέλεσμα.

2) Δεύτερο βήμα: Ορισμός επιπέδου λειτουργικότητας υπηρεσιών

Τη λεπτομερή καταγραφή των υπηρεσιών ακολουθεί η αξιολόγησή τους βάσει του επιπέδου λειτουργικότητάς τους, με βαθμολογία από 0 έως 4. Στο επίπεδο 0 κατατάσσονται οι υπηρεσίες εκείνες που δεν εμφανίζουν καμία λειτουργικότητα ενώ στο επίπεδο 4 κατατάσσονται όσες εμφανίζουν τη μέγιστη δυνατή λειτουργικότητα. Για παράδειγμα, ο έλεγχος απόδοσης θερμότητας είναι μια υπηρεσία που ανήκει στον τεχνικό τομέα της θέρμανσης. Ο βαθμός λειτουργικότητας 0 αντιστοιχεί σε μη αυτόματο έλεγχο, ενώ ο μέγιστος βαθμός επιτυγχάνεται όταν ο έλεγχος μπορεί να πραγματοποιείται ανεξάρτητα για κάθε χώρο του εξεταζόμενου κτιρίου, και υπάρχει η δυνατότητα πληροφόρησης του χρήστη και ελέγχου πληρότητας του χώρου με αισθητήρες. Η αξιολόγηση μπορεί να γίνει με αυτοψία στους χώρους του κτιρίου, μελέτη τεχνικών εγγράφων ή και συνδυασμό τους.

3) Τρίτο βήμα: Υπολογισμός αποδόσεων για κάθε κριτήριο επίδρασης

Έχοντας προσδιορίσει το βαθμό λειτουργικότητας της κάθε υπηρεσίας μπορεί να καθορισθεί η απόδοσή της για τα 7 κριτήρια επίδρασης. Εν συνεχεία, αθροίζονται οι αποδόσεις των υπηρεσιών κάθε τεχνικού τομέα για κάθε κριτήριο επίδρασης, όπως φαίνεται παρακάτω:

$$I(d, i_c) = \sum_{i}^{Nd} I_{ic}\,(FL(S_{i,d}) \qquad (6)$$

όπου:

d είναι ο αριθμός του τεχνικού τομέα υπό εξέταση, d ∈ ℕ,

ic είναι ο αριθμός του κριτηρίου επίδρασης υπό εξέταση, $ic \in \mathbb{N}$,

Nd είναι ο συνολικός αριθμός υπηρεσιών στον τεχνικό τομέα d, $Nd \in \mathbb{N}$,

$S_{i,d}$ είναι η υπηρεσία i του τεχνικού τομέα d, $i \in \mathbb{N}$, $1 \leq i \leq NSd$,

$FL(S_{i,d})$ είναι το επίπεδο λειτουργικότητας της υπηρεσίας Si,d που είναι διαθέσιμη στο κτίριο ή στο τμήμα του κτιρίου,

$I_{ic}\,(FL(S_{i,d}))$ είναι η απόδοση της υπηρεσίας Si,d για το κριτήριο επίδρασης αριθμού ic, σύμφωνα με το επίπεδο λειτουργικότητας της υπηρεσίας, $I_{ic}(FL(S_{i,d})) \in \mathbb{N}$,

$I(d,\ i_c)$ είναι η συνολική απόδοση του τεχνικού τομέα αριθμού d, $I(d,i_c) \in \mathbb{N}$ για το κριτήριο επίδρασης αριθμού ic.

Στην περίπτωση που μια υπηρεσία απαντάται σε περισσότερα του ενός διαφορετικά τμήματα του κτιρίου και παρουσιάζει διαφορετικά επίπεδα λειτουργικότητας προτείνεται ο υπολογισμός του ανωτέρω αθροίσματος ως ένας σταθμισμένος μέσος όρος, με μέτρο στάθμισης την επιφάνεια. Αυτό γενικά αποτελεί ένα σημαντικό ζήτημα στα μεγάλα κτίρια, η λεπτομερής αντιμετώπιση του οποίου αναμένεται να οριστικοποιηθεί στις επίσημες οδηγίες εφαρμογής του δείκτη.

4) Τέταρτο βήμα: Υπολογισμός μέγιστων αποδόσεων κριτηρίων επίδρασης

Κατά αντιστοιχία με όσα αναφέρθηκαν στο προηγούμενο βήμα υπολογίζεται το άθροισμα των μέγιστων δυνατών αποδόσεων της κάθε υπηρεσίας για κάθε ένα από τα 7 κριτήρια επίδρασης.

$I_{max}(d, i_c) = \sum_i^{N_d} I_{ic}\,(FL_{max}(S_{i,d}))$ (7)

όπου:

$FL_{max}(S_{i,d})$ είναι το μέγιστο επίπεδο λειτουργικότητας που μπορεί να επιτύχει μια υπηρεσία $S_{i,d}$ σύμφωνα με τον κατάλογο των ευφυώς έτοιμων υπηρεσιών,

$I_{ic}(FL_{max}(S_{i,d}))$ είναι η απόδοση του κριτηρίου επίδρασης αριθμού ic στην υπηρεσία $S_{i,d}$, για τον μέγιστο βαθμό λειτουργικότητάς της, δηλαδή η μέγιστη δυνατή απόδοση, $I_{ic}(FL_{max}(S_{i,d})) \in \mathbb{N}$,

$I_{max}(d,ic)$ είναι η μέγιστη δυνατή συνολική απόδοση του κριτηρίου επίδρασης αριθμού ic στον τεχνικό τομέα αριθμού d, $I_{max}(d, ic) \in \mathbb{N}$.

5) Πέμπτο βήμα: Δείκτης ευφυούς ετοιμότητας ανά κριτήριο επίδρασης

Εν συνεχεία, το συνολικό αποτέλεσμα του δείκτη ευφυούς ετοιμότητας για κάθε κριτήριο επίδρασης μπορεί να υπολογισθεί ως ο λόγος του σταθμισμένου αθροίσματος των αποδόσεων (βήμα 3) προς το σταθμισμένο άθροισμα των μέγιστων αποδόσεων (βήμα 4). Η εν λόγω στάθμιση γίνεται λαμβάνοντας υπόψη τη σημασία, δηλαδή το βάρος του κάθε τεχνικού τομέα αναφορικά με το κάθε κριτήριο επίδρασης.

$SR_{ic} = \frac{\sum_{d=1}^{N} W_{d,ic} \times I(d,ic)}{\sum_{d=1}^{N} W_{d,ic} \times I_{max}(d,ic)} \times 100$ (8)

όπου:

d είναι ο αριθμός του τεχνικού τομέα υπό εξέταση, d ∈ ℕ,

N είναι ο συνολικός αριθμός τεχνικών τομέων, $N \in \mathbb{N}$,

$W_{d,\,ic}$ είναι ο συντελεστής βαρύτητας, εκφρασμένος σε μορφή ποσοστού, του τεχνικού τομέα αριθμού d για το κριτήριο επίδρασης αριθμού ic,

S_{Ric} είναι το αποτέλεσμα του δείκτη ευφυούς ετοιμότητας, εκφρασμένο σε μορφή ποσοστού για το κριτήριο επίδρασης αριθμού ic.

Εναλλακτικά, δίνεται η δυνατότητα παροχής λεπτομερούς πληροφόρησης για τον δείκτη ευφυούς ετοιμότητας για κάθε τομέα ξεχωριστά ανά κριτήριο επίδρασης. Αυτό το υποσύνολο του δείκτη έχει τη χρησιμότητά του και μπορεί να υπολογισθεί σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$SR_{d,ic} = \frac{I(d,ic)}{I_{max}(d,ic)} \times 100$ (9)

6) Έκτο βήμα: Δείκτης ευφυούς ετοιμότητας ανά λειτουργία - κλειδί

$SR_f = \sum_{ic=1}^{M} W_f\,(ic) \times SR_{ic}$ (10)

όπου:

SR_f είναι το αποτέλεσμα του δείκτη ευφυούς ετοιμότητας για την λειτουργία - κλειδί f,

M είναι ο συνολικός αριθμός κριτηρίων επίδρασης, $M \in \mathbb{N}$,

W_f, είναι ο συντελεστής βαρύτητας, εκφρασμένος σε μορφή ποσοστού, του κριτηρίου επίδρασης αριθμού ic για την λειτουργία - κλειδί f,

SR_{ic} είναι το αποτέλεσμα του δείκτη ευφυούς ετοιμότητας για το κριτήριο επίδρασης αριθμού ic.

7) Έβδομο βήμα: Συνολικός δείκτης ευφυούς ετοιμότητας για κτίριο ή τμήμα κτιρίου

Τελικά, αθροίζοντας τους υπό δείκτες για κάθε λειτουργία - κλειδί προκύπτει ο συνολικός δείκτης ευφυούς ετοιμότητας SRI.

$SRI = \sum S_{rfi}$ (11)

όπου:

SRI είναι το συνολικό αποτέλεσμα του δείκτη ευφυούς ετοιμότητας και

S_{rfi} είναι το αποτέλεσμα του δείκτη ευφυούς ετοιμότητας για την λειτουργία - κλειδί fi (i=1,2,3).

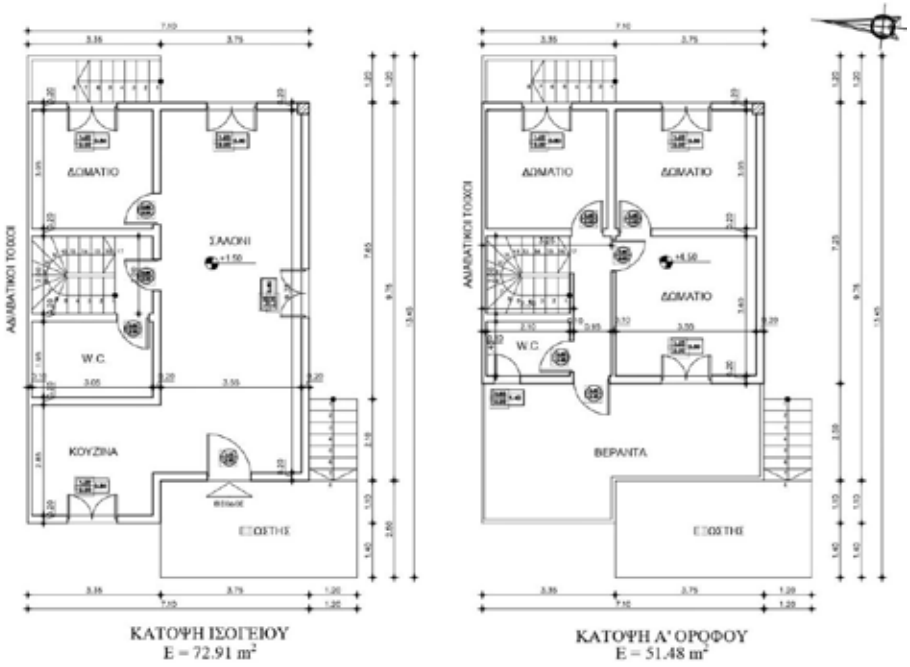
3 ΠΡΑΚΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ

3.1 Περιγραφή κτιρίου

Για την πρακτική εφαρμογή της μεθοδολογίας υπολογισμού του δείκτη SRI επιλέχθηκε μια μονοκατοικία, συνολικής επιφάνειας 197,30 m^2 που βρίσκεται στο νομό Πιερίας, άρα στην κλιματική ζώνη της νότιας Ευρώπης και στη ζώνη Γ της ελληνικής επικράτειας κατά K.Ev.A.K. [7]. Η κατοικία που κατασκευάσθηκε το 1992 δεν έχει ανακαινισθεί, είναι πλημμελώς θερμομονωμένη και διαθέτει συστήματα θέρμανσης, ψύξης και παραγωγής ζεστού νερού χρήσης. Τα δύο πρώτα έχουν, κατά παραδοχή, χαρακτηριστικά ίδια με αυτά του κτιρίου αναφοράς. Πρόκειται για ένα ενεργοβόρο κτίριο, το οποίο κατατάσσεται στην ενεργειακή κλάση Ζ, και αποτελεί αντιπροσωπευτικό παράδειγμα συμβατικής, ελληνικής κατοικίας [8]. Η ενδεδειγμένη μέθοδος υπολογισμού του δείκτη, η οποία και ακολουθήθηκε, ήταν η απλοποιημένη μέθοδος Α.

3.1.1 Αρχιτεκτονική διαμόρφωση κτιρίου

Όσον αφορά στην αρχιτεκτονική διαμόρφωση, η υπό εξέταση κατοικία αποτελεί την μία εκ των δύο δίδυμων, διώροφων μονοκατοικιών που διαμορφώνουν μία ενιαία οικοδομή επί του ιδίου οικοπέδου. Οι μονοκατοικίες βρίσκονται σε επαφή στη μία όψη τους (βόρεια όψη) και διαχωρίζονται με αντισεισμικό αρμό. Οι υπόλοιπες όψεις είναι ελεύθερες, ενώ μόνο η δυτική σκιάζεται από γειτονικό κτίριο. Το εξεταζόμενο κτίριο επικαλύπτεται από τετράρριχτη στέγη, κλειστού τύπου, με ξύλινο σκελετό. Ο φέρων οργανισμός του κτιρίου είναι κατασκευασμένος από οπλισμένο σκυρόδεμα που δεν έχει μονωθεί και οι εξωτερικές τοιχοποιίες από θερμομονωτικούς οπτόπλινθους, σύμφωνα με μαρτυρία του ιδιοκτήτη. Τέλος, όλα τα εξωτερικά κουφώματα διαθέτουν πλαίσιο αλουμινίου και διπλό υαλοπίνακα, με εξαίρεση αυτά του υπογείου που είναι μεταλλικά με μονό υαλοπίνακα. Η κατοικία αναπτύσσεται σε 3 επίπεδα. Το υπόγειο αποτελεί μη θερμαινόμενο, βοηθητικό χώρο, ενώ η κατοικία βρίσκεται στο υπερυψωμένο ισόγειο και στον Α' όροφο. Το υπόγειο και το ισόγειο έχουν το ίδιο ακριβώς περίγραμμα, ενώ ο Α' όροφος είναι κατασκευασμένος σε εσοχή. Η επικοινωνία μεταξύ των επιπέδων γίνεται με εσωτερική κλίμακα, η οποία αποτελεί επίσης μη θερμαινόμενο χώρο και διαχωρίζεται πλήρως από τους θερμαινόμενους χώρους του ισογείου και του ορόφου μέσω ξύλινων θυρών (Εικόνα 3).



Εικόνα 3: Κάτοψη Ισογείου & κάτοψη Α' Ορόφου (ιδία επεξεργασία).

3.1.2 Συστήματα κτιρίου

Το κτίριο διαθέτει λέβητα πετρελαίου και ξύλου για την ικανοποίηση των αναγκών θέρμανσης αλλά και του ζεστού νερού χρήσης κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών. Ο θερμοστατικός έλεγχος της λειτουργίας της εγκατάστασης είναι αυτόματος, με κεντρικό θερμοστάτη και συνεχή έλεγχο παραγωγής θερμότητας. Κατά τη θερινή περίοδο το ζεστό νερό χρήσης προέρχεται από ηλιακό θερμοσίφωνα, ο οποίος λειτουργεί με εγκατάσταση ηλιακού συλλέκτη, ενώ επιπλέον υπάρχει ηλεκτρικός θερμοσίφωνας που χρησιμοποιείται σπάνια, καθώς τα προαναφερθέντα συστήματα καλύπτουν τις ανάγκες των χρηστών. Ο έλεγχος παραγωγής ζεστού νερού χρήσης πραγματοποιείται από τους χρήστες της εξεταζόμενης κατοικίας. Οι χρήστες επίσης ελέγχουν την απόδοση του συστήματος ψύξης, το οποίο περιλαμβάνει αερόψυκτη αντλία θερμότητας. Τέλος, για τις ανάγκες της παρούσας έρευνας και στοχεύοντας στην εξαγωγή πιο γενικευμένων συμπερασμάτων, έγινε η παραδοχή πως τα συστήματα θέρμανσης και ψύξης που διαθέτει το κτίριο είναι όμοια με αυτά που ορίζονται για το κτίριο αναφοράς σύμφωνα με τον Κ.Εν.Α.Κ. [7].

3.2 Διαμόρφωση σεναρίων

Συνολικά, διαμορφώθηκαν 2 σενάρια υπολογισμού του δείκτη ευφυούς ετοιμότητας κτιρίων και των επί μέρους δεικτών, ένα «αυστηρό» και ένα «ευνοϊκό», τα οποία διαφέρουν ως προς τον αριθμό των τεχνικών τομέων που λαμβάνονται υπόψη στους υπολογισμούς. Έκαστο υποδιαιρέθηκε σε 2 υπό - σενάρια προσδιορισμού των συντελεστών βαρύτητας. Στα υπό - σενάρια Α χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές του Πίνακα 1 για τα κτίρια κατοικίας στη νότια Ευρώπη ενώ στα υπό - σενάρια Β τα βάρη προσδιορίσθηκαν από τα μεγέθη πρωτογενούς ενέργειας του κτιρίου, τα οποία υπολογίστηκαν με το λογισμικό ΤΕΕ - ΚΕΝΑΚ (Εικόνα 4). Όπως αναμενόταν, η θέρμανση καταλαμβάνει το μεγαλύτερο ποσοστό κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας της κατοικίας με 84%, ενώ η ψύξη και το ζεστό νερό χρήσης είναι υπεύθυνα για το 8% της συνολικής, καταναλισκόμενης πρωτογενούς ενέργειας το κάθε ένα [9].

Εικόνα 4: Πρωτογενής ενέργεια ανά τελική χρήση (kWh/m²).

3.2.1 Αυστηρό σενάριο

Στο αυστηρό σενάριο έγινε η θεώρηση πως όλες οι υπηρεσίες του συνοπτικού καταλόγου (Μέθοδος Α) είναι σχετικές και όλοι οι τεχνικοί τομείς είναι απαραίτητοι για την εκτίμηση του δείκτη. Στην περίπτωση όπου οι υπηρεσίες κάποιων τομέων απουσίαζαν παντελώς από το κτίριο θεωρήθηκε πως οφείλουν να υπάρχουν έστω και με τον ελάχιστο δυνατό βαθμό λειτουργικότητάς τους, δηλαδή το επίπεδο μηδέν. Πιο συγκεκριμένα, παρούσες υπηρεσίες ήταν μόνο αυτές των τεχνικών τομέων, της θέρμανσης, ψύξης, ζεστού νερού χρήσης, φωτισμού και δυναμικά μεταβαλλόμενου κελύφους ενώ απούσες ήταν οι υπηρεσίες των υπόλοιπων 4 τομέων, δηλαδή του μηχανικού αερισμού, του ηλεκτρισμού, της φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων και της παρακολούθησης - ελέγχου. Επαναλαμβάνεται πως το σύστημα θέρμανσης ελέγχεται αυτόματα μέσω κεντρικού θερμοστάτη και ο έλεγχος παραγωγής θερμότητας είναι συνεχής κι έτσι βαθμολογούνται με 1 και 0 αντιστοίχως όσον αφορά στο επίπεδο λειτουργικότητάς τους. Ο έλεγχος απόδοσης της ψύξης δεν είναι αυτόματος αλλά ελέγχεται από το χρήστη και βαθμολογείται με 0. Το ίδιο ισχύει και για το σύστημα παραγωγής ζεστού νερού χρήσης, το οποίο επίσης παίρνει την ελάχιστη βαθμολογία (επίπεδο λειτουργικότητας = 0). Τέλος, οι παρούσες υπηρεσίες των τομέων φωτισμός και κέλυφος, που περιλαμβάνουν διακόπτες και εξωτερικά, προστατευτικά ρολά αντίστοιχα, ελέγχονται χειροκίνητα συνεπώς είναι μηδενικού βαθμού λειτουργικότητας.

Στο πρώτο υπό - σενάριο «αυστηρό Α» χρησιμοποιήθηκαν αυτούσιες οι τιμές του Πίνακα 1. Όσον αφορά στο δεύτερο υπό - σενάριο «αυστηρό Β» χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα της πρωτογενούς ενέργειας ανά τελική χρήση του κτιρίου (Εικόνα 4) και προέκυψε ο καινούριος πίνακας συντελεστών βαρύτητας βάσει του τύπου (3) (Πίνακας 3). Μπορεί να παρατηρηθεί πως μόνο στους τεχνικούς τομείς θέρμανση, ψύξη και ζεστό νερό χρήσης αποδίδονται μη μηδενικά βάρη, καθώς γι' αυτούς υπάρχει η δυνατότητα υπολογισμού με το λογισμικό ΤΕΕ - ΚΕΝΑΚ. Παρόλα αυτά, και οι υπόλοιποι 6 τομείς έλαβαν μέρος στους υπολογισμούς, καθώς θεωρήθηκαν σχετικοί, λαμβάνοντας μηδενικά βάρη. Διαπιστώνεται πως το μεγαλύτερο βάρος εξακολουθεί να δίνεται στον τεχνικό τομέα της θέρμανσης, ενώ απέχει σημαντικά από τα βάρη της ψύξης και του ζεστού νερού χρήσης συγκρινόμενα με τους αντίστοιχους συντελεστές που δίνονται στον Πίνακα 1. Τέλος και οι τρεις τομείς διατηρούν τα ίδια βάρη για τα κριτήρια επίδρασης «ενεργειακή εξοικονόμηση», «ενεργειακή ελαστικότητα - αποθήκευση» και «συντήρηση - πρόβλεψη σφαλμάτων», καθώς δεν υπήρχε η δυνατότητα διαφοροποίησής τους.

Πίνακας 3: Συντελεστές βαρύτητας υπό - σεναρίου «αυστηρό Β».

ΝΟΤΙΑ ΕΥΡΩΠΗ	Αυστηρό Σενάριο - Όλοι οι τομείς θεωρούνται σχετικοί						
	Ενεργειακή Εξοικονόμηση	Ενεργειακή «Ελαστικότητα» & Αποθήκευση	Άνεση	Λειτουργικότητα	Υγεία & Ευεξία	Συντήρηση & Πρόβλεψη Σφαλμάτων	Πληροφόρηση Χρηστών
Θέρμανση	0,84	0,84	0,50	0,33	0,50	0,84	0,33
Ζεστό Νερό Χρήσης	0,08	0,08	0,00	0,33	0,00	0,08	0,33
Ψύξη	0,08	0,08	0,50	0,33	0,50	0,08	0,33
Μηχανικός Αερισμός	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Φωτισμός	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ηλεκτρισμός	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Δυναμικά Μεταβαλλόμενο Κέλυφος	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Φόρτιση Ηλεκτρικών Οχημάτων	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Παρακολούθηση & Έλεγχος	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

3.2.2 Ευνοϊκό σενάριο

Το δεύτερο εξεταζόμενο σενάριο, που αναμένεται να είναι και το πιο «ευνοϊκό» για την αποτίμηση του δείκτη του κτιρίου, είναι αυτό κατά το οποίο δεν θεωρούνται σχετικές οι υπηρεσίες που απουσιάζουν, καθώς και κάποιες υπηρεσίες μηδενικού επιπέδου λειτουργικότητας. Για το λόγο αυτό, εξαιρείται από τη διαδικασία υπολογισμού ένας σημαντικός αριθμός τεχνικών τομέων, όπως ο μηχανικός αερισμός, ο φωτισμός, ο ηλεκτρισμός, το δυναμικά μεταβαλλόμενο κέλυφος, η φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων και η παρακολούθηση - έλεγχος. Έτσι, η ευφυής ετοιμότητα του κτιρίου θα αποτιμηθεί λαμβάνοντας υπόψη τους υπόλοιπους τρεις τομείς: τη θέρμανση, την ψύξη και το ζεστό νερό χρήσης. Οι βαθμοί λειτουργικότητας των υπηρεσιών τους είναι ίδιοι με αυτούς που προσδιορίστηκαν στο αυστηρό σενάριο αντικατοπτρίζοντας την υφιστάμενη κατάσταση των συστημάτων του κτιρίου.

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί πως παρόλο που το σενάριο αυτό χαρακτηρίστηκε εξαρχής ως «ευνοϊκό», είναι αρκετά αντιπροσωπευτικό της πραγματικότητας όσον αφορά στα κτίρια κατοικίας στην Ελλάδα και στη σχέση τους με την εφαρμογή ευφυών τεχνολογιών. Η νομοθετημένη υποχρέωση χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για παράδειγμα, περιορίζεται στην παραγωγή ενός ελάχιστου ποσοστού ζεστού νερού χρήσης, που είναι συγκεκριμένα 60% για τα καινούρια και τα ριζικώς ανακαινιζόμενα κτίρια σύμφωνα με τον Κανονισμό Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων [10]. Επίσης, μόλις πρόσφατα ψηφίσθηκε νομοθεσία που προωθεί την ανάπτυξη της ηλεκτροκίνησης στη χώρα [11]. Τέλος, για τα κτίρια κατοικίας δεν είναι υποχρεωτική η μελέτη φωτισμού και μηχανικού αερισμού, ούτε η ενσωμάτωση διατάξεων ελέγχου και αυτοματισμών. Γίνεται επομένως αντιληπτό πως η εξαίρεση αρκετών τεχνικών τομέων στην Ελλάδα, βάσει της νομοθεσίας και μόνο, αποτελεί μια λογική τακτική.

Έχοντας προσδιορίσει τους τεχνικούς τομείς που λαμβάνουν μέρος στους υπολογισμούς του ευνοϊκού σεναρίου διαμορφώθηκαν τα 2 υπό - σενάρια. Στο πρώτο υπό - σενάριο «ευνοϊκό Α» οι συντελεστές βαρύτητας ενεργειακού ισοζυγίου των 6 τεχνικών τομέων που αφαιρέθηκαν από τον υπολογισμό του δείκτη ισομοιράσθηκαν στους εναπομείναντες 3 τεχνικούς τομείς (Πίνακας 4). Τα ισοδύναμα βάρη υπολογίσθηκαν εκ νέου σύμφωνα με τον τύπο (1), ενώ όλα τα σταθερά βάρη είναι πλέον μηδενικά. Παρατηρείται πως η θέρμανση εξακολουθεί να έχει τον μεγαλύτερο συντελεστή βαρύτητας, αλλά η διαφορά της από τα βάρη της ψύξης και του ζεστού νερού χρήσης έχει πλέον μειωθεί. Στο δεύτερο υπό - σενάριο «ευνοϊκό Β» τα βάρη είναι ακριβώς τα ίδια με το αντίστοιχο του αυστηρού σεναρίου, καθώς δεν έχει λάβει χώρα καμία απολύτως αλλαγή ούτε στο κέλυφος ούτε στα συστήματα του κτιρίου, με αποτέλεσμα τα μεγέθη πρωτογενούς ενέργειας να παραμένουν σταθερά (Πίνακας 3). Συνεπώς, ο πίνακας του υπό - σεναρίου «ευνοϊκό Β» ταυτίζεται με αυτόν του «αυστηρό Β», λόγω του περιορισμού του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε, παρά τη διαφορετική αρχική θεώρηση.

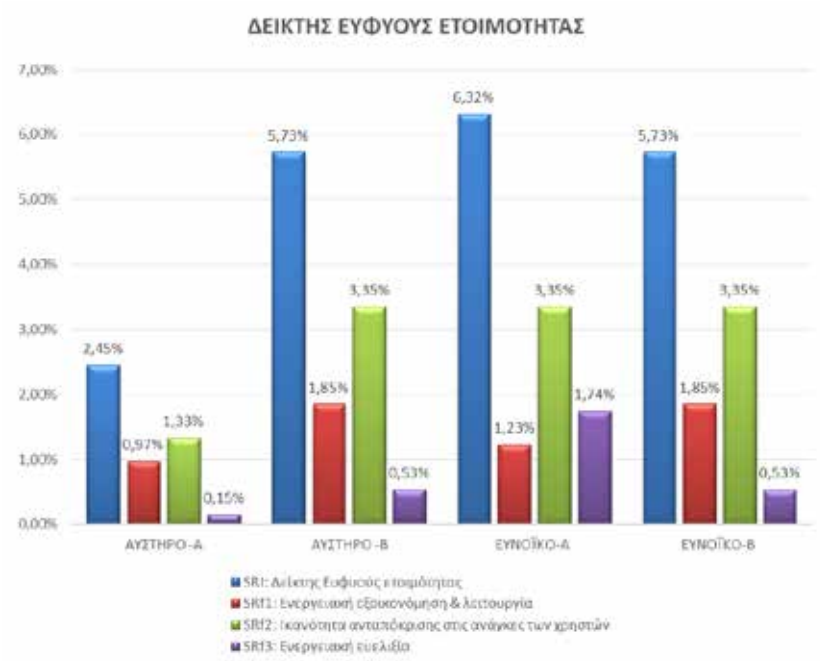
Πίνακας 4: Συντελεστές βαρύτητας υπό - σεναρίου «ευνοϊκό Α».

ΝΟΤΙΑ ΕΥΡΩΠΗ	Ευνοϊκό Σενάριο - Μη σχετικοί οι τομείς : VENT, RENEW, DE, EV, MC & LIGHT & σχετικοί οι 3 τομείς : HEAT, DHW & COOL						
	Ενεργειακή Εξοικονόμηση	Ενεργειακή «Ελαστικότητα» & Αποθήκευση	Άνεση	Λειτουργικότητα	Υγεία & Ευεξία	Συντήρηση & Πρόβλεψη Σφαλμάτων	Πληροφόρηση Χρηστών
Θέρμανση	0,49	0,52	0,50	0,33	0,50	0,49	0,33
Ζεστό Νερό Χρήσης	0,27	0,26	0,00	0,33	0,00	0,27	0,33
Ψύξη	0,24	0,22	0,50	0,33	0,50	0,24	0,33
Μηχανικός Αερισμός	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Φωτισμός	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ηλεκτρισμός	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Δυναμικά Μεταβαλλόμενο Κέλυφος	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Φόρτιση Ηλεκτρικών Οχημάτων	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Παρακολούθηση & Έλεγχος	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Οι απαραίτητοι υπολογισμοί για το συνολικό δείκτη SRI και τους επί μέρους δείκτες έγιναν με τη χρήση λογιστικών φύλλων Excel και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά με τη μορφή γραφήματος (Εικόνα 5). Στο αυστηρό σενάριο τόσο ο δείκτης SRI όσο και οι SR_{f1}, SR_{f2} και SR_{f3} (όπου f_1: «ενεργειακή εξοικονόμηση και λειτουργία», f_2: «ικανότητα ανταπόκρισης στις ανάγκες των χρηστών» και f_3: «ενεργειακή ευελιξία» οι 3 λειτουργίες - κλειδιά) σημείωσαν πολύ χαμηλές τιμές. Συγκεκριμένα, οι μεγαλύτερες τιμές επιτεύχθηκαν για το υπό - σενάριο «αυστηρό Β» με SRI = 5,73%, SR_{f1}= 1,85%, SR_{f2} = 3,35% και SR_{f3} = 0,53% και είναι σημαντικά μεγαλύτερες του υπό - σεναρίου «αυστηρό Α», όπου οι τιμές ήταν SRI = 2,45%, SR_{f1}= 0,97%, SR_{f2} = 1,33% και SR_{f3} = 0,15% αντίστοιχα. Στο ευνοϊκό σενάριο η εικόνα των αποτελεσμάτων αλλάζει. Οι διαφορές μεταξύ των δύο υπό - σεναρίων είναι μικρότερες σε σχέση με αυτές του αυστηρού σεναρίου. Συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα για το υπό - σενάριο «ευνοϊκό Α» ήταν: SRI = 6,32%, SR_{f1}= 1,23%, SR_{f2} = 3,35% και SR_{f3} = 1,74%, ενώ στο υπό - σενάριο «ευνοϊκό Β» προέκυψαν οι τιμές: SRI = 5,73%, SR_{f1}= 1,85%, SR_{f2} = 3,35% και SR_{f3} = 0,53%.

Συγκρίνοντας, τα δύο σενάρια μεταξύ τους φαίνεται πως το ευνοϊκό οδήγησε σε υψηλότερες τιμές συνολικού δείκτη αλλά και επί μέρους δεικτών. Το αποτέλεσμα αυτό είναι λογικό, καθώς στο ευνοϊκό σενάριο αφαιρέθηκαν από τους υπολογισμούς 6 τομείς, οι υπηρεσίες των οποίων είχαν μηδενικό επίπεδο λειτουργικότητας στο αυστηρό σενάριο (ήταν απούσες αλλά επιθυμητές). Επίσης, τα υπό - σενάρια Β του ευνοϊκού και του αυστηρού σεναρίου οδήγησαν σε ίδια ακριβώς αποτελέσματα λόγω της χρήσης ίδιων συντελεστών βαρύτητας. Συνολικά, ο δείκτης SRI σημείωσε χαμηλές τιμές με την μέγιστη να φτάνει το 6,32%. Όσον αφορά στις 3 λειτουργίες - κλειδιά, η *ικανότητα ανταπόκρισης στις ανάγκες των χρηστών* σημείωσε την μεγαλύτερη τιμή 3,35%, ενώ η *ενεργειακή ευελιξία* την ελάχιστη 0,15%. Οι τιμές της λειτουργίας *ενεργειακή εξοικονόμηση & λειτουργία* κυμάνθηκαν από 0,97% έως 1,85%. Τα αποτελέσματα αυτά ήταν αναμενόμενα, καθώς το εξεταζόμενο κτίριο είναι μια συμβατική κατοικία που διαθέτει ελάχιστες από τις ευφυείς υπηρεσίες των 9 τεχνικών τομέων. Επιπλέον, οι παρούσες υπηρεσίες δεν χαρακτηρίζονται από υψηλά επίπεδα λειτουργικότητας, όπως αποτυπώνεται έντονα στην ενεργειακή ευελιξία και εξοικονόμηση των συστημάτων του κτιρίου.



Εικόνα 5: Αποτελέσματα δείκτη SRI και επί μέρους δεικτών SR_{f1}, SR_{f2} και SR_{f3}.

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτέλεσε η αποτίμηση της ευφυούς ετοιμότητας των κτιρίων με το δείκτη Smart Readiness Indicator, εν συντομία SRI, ο οποίος εισήχθη στην ευρωπαϊκή πραγματικότητα με την αναθεωρημένη οδηγία για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων το 2018. Ο δείκτης SRI αξιολογεί τα κτίρια μέσω της διαδικασίας διαλογής ευφυώς έτοιμων υπηρεσιών, η οποία περιλαμβάνει την εξέταση της παρουσίας και την αξιολόγηση του βαθμού λειτουργικότητάς τους. Εν συνεχεία, ακολουθώντας μία μέθοδο πολυπαραγοντικής ανάλυσης, υπολογίζονται οι αποδόσεις των προαναφερθεισών υπηρεσιών, οι οποίες οργανώνονται σε 9 τεχνικούς τομείς, για 7 κριτήρια επίδρασης. Τελικά, υπολογίζεται ο συνολικός δείκτης ευφυούς ετοιμότητας και οι επί μέρους δείκτες των τριών λειτουργιών - κλειδιών, *ενεργειακή εξοικονόμηση και λειτουργία*, *ικανότητα ανταπόκρισης στις ανάγκες των χρηστών* και *ενεργειακή ευελιξία*.

Τη θεωρητική ανάλυση του δείκτη ακολούθησε η πρακτική εφαρμογή υπολογισμού του. Ως αντικείμενο εξέτασης επιλέχθηκε ένα συμβατικό κτίριο κατοικίας στην Ελλάδα, ενεργειακής κλάσης Ζ, το οποίο δεν διαθέτει την πλειοψηφία των υπηρεσιών που αξιολογεί ο δείκτης, ενώ οι υπάρχουσες υπηρεσίες χαρακτηρίζονται από χαμηλό βαθμό λειτουργικότητας. Ως αποτέλεσμα, οι τιμές του SRI και των επί μέρους δεικτών που υπολογίσθηκαν ήταν αρκετά χαμηλές. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ταυτόχρονα την ύπαρξη μεγάλου περιθωρίου βελτίωσης όσον αφορά στην ευφυή ετοιμότητα του εξεταζόμενου κτιρίου. Η αφαίρεση τεχνικών τομέων διαπιστώθηκε πως επηρεάζει τόσο τις τιμές του δείκτη όσο και την απόδοση συντελεστών βαρύτητας, δημιουργώντας την ανάγκη διαμόρφωσης υπό - σεναρίων στην παρούσα εργασία για τη χρηστή αντιμετώπιση των τελευταίων. Προς επίρρωση των ανωτέρω, αναπτύχθηκαν δύο προσεγγίσεις. Στην πρώτη χρησιμοποιήθηκαν οι πίνακες των βαρών που συνοδεύουν τη μεθοδολογία του δείκτη και τα βάρη ισομοιράσθηκαν στους εναπομείναντες στον υπολογισμό τομείς, ενώ στη δεύτερη τα βάρη υπολογίσθηκαν από τα μεγέθη πρωτογενούς ενέργειας του κτιρίου, που προσδιορίσθηκαν με το λογισμικό ΤΕΕ - ΚΕΝΑΚ. Όπως διαπιστώθηκε, όσο μικρότερος ο αριθμός των τεχνικών τομέων που λαμβάνονται υπόψη στους υπολογισμούς τόσο μικρότερες είναι και οι διαφορές που προκύπτουν μεταξύ των δύο προσεγγίσεων.

Συνολικά, η μεθοδολογία μπορεί να χαρακτηριστεί ως σχετικά απλή και γρήγορη στην εφαρμογή της για κτίρια μικρής πολυπλοκότητας όπως το εξεταζόμενο. Αντιθέτως, στα πιο σύνθετα κτίρια η διαδικασία γίνεται πιο πολύπλοκη με τη φάση της διαλογής, που είναι καθοριστικής σημασίας, να παρουσιάζει τον μεγαλύτερο βαθμό δυσκολίας. Το ζήτημα αυτό οφείλει να αντιμετωπισθεί συντονισμένα από τη νομοθεσία της κάθε χώρας, έτσι ώστε ο δείκτης να αποτελέσει ένα κοινό μέτρο σύγκρισης των κτιρίων και να προωθηθεί η εφαρμογή ευφυών έτοιμων τεχνολογιών στις ανακαινίσεις υπαρχόντων κτιρίων καθώς και στην κατασκευή νέων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Märzinger, T., and Österreicher, D., 2019, “Supporting the Smart Readiness Indicator - A Methodology to Integrate A Quantitative Assessment of the Load Shifting Potential of Smart Buildings,” Energies, Vol.12 (1955), pp. 1-22.

[2] European Construction Sector Observatory, 2017, “Policy measure fact sheet - GREECE,” European Commission, pp. 1-5.

[3] Eur. Union, 2018, ‘Directive 2018/844 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on energy efficiency,’ Official Journal of the European Union, Eur. Union, pp. L 156/75-L 156/91

[4] Buckman, A. H., Mayfield, M., and Beck, S. B., 2014, “What is a Smart Building?,” Smart and Sustainable Built Environment, UK, Vol.3 (2), pp. 92–109.

[5] Elfiky, I. A., Abouzeid, M. N., and Plattus, A. J., 2019, “A PROPOSED ASSESSMENT SCHEME FOR SMART SUSTAINABLE URBAN DEVELOPMENT,” CSCE Annual Conference, Laval (Greater Montreal), pp. GEN119-1– GEN119-10.

[6] Verbeke, S., Aerts, D. A., Rynders, G., Ma, Y., and Waide, P., 2020, “THIRD INTERIM REPORT OF THE SECOND TECHNICAL SUPPORT STUDY ON THE SMART READINESS INDICATOR FOR BUILDINGS,” ENER/C3/2018-447/06.

[7] Τ. Ε. Ελλάδας, 2017, “Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2017: ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΕΘΝΙΚΕΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΚΤΗΡΙΩΝ ΚΑΙ ΤΗΝ ΕΚΔΟΣΗ ΤΟΥ ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΤΙΚΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ,” Αθήνα

[8] Dascalaki, E. G., Kontoyiannidis, S., Balaras, C. A., and Droutsa, K. G., 2013, “Energy certification of Hellenic buildings: First findings,” Energy and Buildings, Vol. 65, pp. 429-437.

[9] Αθανασάκη, Σ., 2020, “Ευφυή κτίρια για ευφυείς πόλεις: Διερεύνηση του Δείκτη Ευφυούς Ετοιμότητας Κτιρίων,” Διπλωματική εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ.

[10] ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ-ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ, ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ, 2010, “ ΦΕΚ Β’ 407 /9-4-2010: Έγκριση Κανονισμού Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων, ” Αθήνα

[11] ΠΡΟΕΔΡΟΣ ΤΗΣ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑΣ, 2020, “ΦΕΚ Α' 142/23-07-2020: Προώθηση της ηλεκτροκίνησης και άλλες διατάξεις,” Αθήνα

ΔΕΙΚΤΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΕΠΙΔΟΣΗΣ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΚΤΙΡΙΩΝ ΤΡΙΤΟΓΕΝΟΥΣ ΤΟΜΕΑ ΑΠΟ ΣΥΝΟΠΤΙΚΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΤΙΚΩΝ & ΕΠΙΘΕΩΡΗΣΕΩΝ

Καλλιόπη Γ. Δρούτσα[1,3]*, Κων/νος Α. Μπαλαράς[1], Σίμων Κοντογιαννίδης[1], Σπυρίδων Λυκούδης[2], Έλενα Γ. Δασκαλάκη[1], Αθανάσιος Α. Αργυρίου[3]

[1] Ομάδα Εξοικονόμησης Ενέργειας, Ινστιτούτο Ερευνών Περιβάλλοντος & Βιώσιμης Ανάπτυξης, Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών,
[2] Ανεξάρτητος ερευνητής, Καλαμάτα,
[3] Εργαστήριο Φυσικής της Ατμόσφαιρας, Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Πατρών
*pdroutsa@noa.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται αντιπροσωπευτικοί δείκτες επίδοσης για την ενεργειακή συμπεριφορά κτιρίων του τριτογενούς τομέα. Η ανάλυση βασίζεται σε δεδομένα που προκύπτουν από δυο διαφορετικές προσεγγίσεις. Η πρώτη και πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μεθοδολογία για την αποτύπωση της ενεργειακής συμπεριφοράς των κτιρίων είναι η ανάλυση των δεδομένων που περιλαμβάνονται στα Πιστοποιητικά Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων (ΠΕΑ), τα οποία συγκεντρώνονται στην επίσημη βάση των πιστοποιητικών της πλατφόρμας buildingcert. Τα διαθέσιμα δεδομένα των ΠΕΑ περιορίζονται στα γενικά χαρακτηριστικά του κτιρίου (π.χ. χρήση, χρονική περίοδος κατασκευής, νομός, συνολική και θερμαινόμενη επιφάνεια), και στα αποτελέσματα των ενεργειακών υπολογισμών (π.χ. ενεργειακή κλάση, πρωτογενής ενέργεια και εκπομπές CO_2). Αρχικά γίνεται ένας ποιοτικός έλεγχος των διαθέσιμων στοιχείων για τυχόν λανθασμένες, μη πλήρεις ή ακραίες τιμές, ώστε να εξασφαλιστεί η εγκυρότητα των συμπερασμάτων. Στη συνέχεια, τα δεδομένα αναλύονται για την εξαγωγή δεικτών επίδοσης των κτιρίων τόσο συνολικά όσο και για τις τελικές χρήσεις στις διαφορετικές χρήσεις κτιρίων.

Η δεύτερη προσέγγιση βασίζεται στην επεξεργασία των στοιχείων που συγκεντρώνονται κατά τις ενεργειακές επιθεωρήσεις κτιρίων για την έκδοση των ΠΕΑ. Τα αναλυτικά δεδομένα περιλαμβάνουν πληροφορίες για το κτίριο (τοποθεσία, προσανατολισμός), λεπτομέρειες για τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά (επιφάνειες, συντελεστή θερμοπερατότητας) και τα χαρακτηριστικά των ηλεκτρομηχανολογικών εγκαταστάσεων (συστήματα, αποδόσεις, πηγές ενέργειας). Αυτά τα αναλυτικά δεδομένα επιτρέπουν ένα διαφορετικό, λεπτομερέστερο και αναλυτικότερο ποιοτικό έλεγχο των διαθέσιμων στοιχείων. Τα ελεγμένα δεδομένα χρησιμοποιούνται με τον υπολογιστικό πυρήνα του ΤΕΕ-ΚΕΝΑΚ για τον υπολογισμό της ενεργειακής απαίτησης, της τελικής και πρωτογενούς κατανάλωσης ενέργειας του κτιρίου, για τις επιμέρους τελικές χρήσεις και για ολόκληρο το κτίριο.

Στη συνέχεια υπολογίζονται οι δείκτες ενεργειακής επίδοσης που προκύπτουν από τις δύο αυτές προσεγγίσεις, αξιοποιώντας τις δύο διαφορετικές βάσεις δεδομένων. Η σύγκριση των μέσων τιμών, διακυμάνσεων και στατιστικών κατανομών των δεικτών γίνεται με τη χρήση παραμετρικών και μη-παραμετρικών μεθόδων. Σκοπός είναι να αναδειχθούν οι όποιες διαφοροποιήσεις μεταξύ των δύο προσεγγίσεων και να διερευνηθεί η ανάγκη ανάπτυξης μιας διαδικασίας που θα είναι εύκολο να εφαρμοσθεί και θα επιτρέπει τον προσδιορισμό αξιόπιστων δεικτών επίδοσης.

Λέξεις Κλειδιά: *Κτίρια Τριτογενούς Τομέα, Δείκτες ενεργειακής επίδοσης, Ενεργειακές Επιθεωρήσεις, Πιστοποιητικά Ενεργειακής Απόδοσης*

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα κτίρια του τριτογενούς τομέα παρουσιάζουν μεγάλη ετερογένεια και πολλές ιδιομορφίες σε σχέση με τον οικιακό τομέα, με πολλές διαφορετικές επιμέρους χρήσεις, ειδικές απαιτήσεις και χαρακτηριστικά και μεγάλα μεγέθη. Κατά μέσο όρο αντιπροσωπεύουν περίπου το 25% της συνολικής επιφάνειας κτιρίων στην Ευρώπη, ποσοστό που κυμαίνεται από 11% στην Ιταλία μέχρι 41% στην Σλοβακία. Η μέση τελική χρήση ενέργειας στα Ευρωπαϊκά κτίρια είναι 273.6 kWh/m^2, κυμαινόμενη από 130.6 kWh/m^2 στην Βουλγαρία μέχρι 652.5kWh/m^2 στην Ιταλία [1].

Στην Ελλάδα υπάρχουν περίπου 785.500 κτίρια αποκλειστικής χρήσης τριτογενούς τομέα, που αποτελούν το 21% του ελληνικού κτιριακού αποθέματος, σύμφωνα με την τελευταία απογραφή κτιρίων. Από αυτά περίπου 20% είναι καταστήματα και γραφεία, 4% ξενοδοχεία και 2% σχολεία. [2]. Κατά μέσο όρο τα ξενοδοχεία και εστιατόρια καλύπτουν περίπου το 30% της συνολικής επιφάνειας δαπέδου και ακολουθούν καταστήματα (28%), γραφεία (22%), κτίρια σχολείων (16%) και νοσοκομεία (4%) [3]. Η τελική κατανάλωση ενέργειας στα κτίρια τριτογενούς τομέα για το 2019, είναι περίπου 2,1 ΜΤΙΠ, που αντιστοιχεί στο 35% της συνολικής κατανάλωσης του κτιριακού τομέα στην Ελλάδα [4].

Η ενεργειακή πιστοποίηση των κτιρίων διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των νέων και υφισταμένων κτιρίων, με μακροπρόθεσμο στόχο την απεξάρτηση του άκρως αναποτελεσματικού κτιριακού αποθέματος από ανθρακούχες εκπομπές. Στην Ελλάδα, και σε μεγάλο βαθμό στην Ευρώπη, δεν υπάρχουν επικαιροποιημένα αναλυτικά δεδομένα για τις καταναλώσεις των κτιρίων του τριτογενούς τομέα, ούτε αντίστοιχα δεδομένα για την αποτελεσματικότητα των διαφόρων επεμβάσεων εξοικονόμησης ενέργειας. Καθώς ο αριθμός των ενεργειακών πιστοποιητικών πληθαίνει, αποτελεί μια πολύ καλή βάση δεδομένων για την χαρτογράφηση των χαρακτηριστικών των διαφόρων κτιρίων και την εξαγωγή δεικτών για την ενεργειακή συμπεριφορά τους στην υφιστάμενη κατάσταση.

Στην παρούσα εργασία γίνεται μια προσπάθεια σύγκρισης των αντιπροσωπευτικών δεικτών επίδοσης για την ενεργειακή συμπεριφορά κτιρίων σε επιλεγμένες βασικές χρήσεις του τριτογενούς τομέα, οι οποίοι προκύπτουν από δυο διαφορετικές προσεγγίσεις. Η πρώτη και πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη προσέγγιση αφορά στην ανάλυση των συνοπτικών δεδομένων που περιλαμβάνονται στα Πιστοποιητικά Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων (ΠΕΑ), τα οποία συγκεντρώνονται στην επίσημη βάση των πιστοποιητικών της πλατφόρμας buildingcert. Η δεύτερη προσέγγιση βασίζεται στην επεξεργασία των αναλυτικών στοιχείων που συγκεντρώνονται κατά τις ενεργειακές επιθεωρήσεις κτιρίων για την έκδοση των πιστοποιητικών. Η ανάλυση που ακολουθεί αφορά μόνο σε δεδομένα που αναφέρονται σε ολόκληρα κτίρια ενιαίας χρήσης.

Αρχικά γίνεται ποιοτικός έλεγχος των διαθέσιμων στοιχείων για να απομακρυνθούν λανθασμένες ή μη πλήρεις εγγραφές καθώς και τυχόν ακραίες τιμές ώστε να εξασφαλιστεί η εγκυρότητα των συμπερασμάτων. Μετά από τη συγκεκριμένη διαδικασία προκύπτουν δυο ανεξάρτητες βάσεις δεδομένων, η “Βάση ΠΕΑ” και η “Βάση Επιθεωρήσεων” αντίστοιχα. Στη συνέχεια για κάθε μια βάση δεδομένων, τα ποιοτικά ελεγμένα δεδομένα ομαδοποιούνται σε διαφορετικές χρήσεις κτιρίων και αναλύονται για την εξαγωγή δεικτών επίδοσης των κτιρίων τόσο συνολικά όσο και για τις διάφορες τελικές χρήσεις.

Σύμφωνα με τις Τεχνικές Οδηγίες του ΤΕΕ, καθορίζονται συνολικά 60 διαφορετικοί τύποι κτιρίων, οι οποίοι μπορούν να ομαδοποιηθούν σε 30 χρήσεις κτιρίων, ενσωματώνοντας διαφορετικούς τύπους με κοινές παραδοχές και τυπικές τιμές για τους υπολογισμούς. Οι τελικές χρήσεις που λαμβάνονται υπόψη στην ενεργειακή αξιολόγηση των κτιρίων του τριτογενούς τομέα είναι η θέρμανση, η ψύξη, ο μηχανικός αερισμός (ο οποίος συμπεριλαμβάνεται στη θέρμανση και την ψύξη), ο φωτισμός και το ζεστό νερό χρήσης (ΖΝΧ). Για ορισμένες χρήσεις κτιρίων (π.χ. Γραφεία) το ΖΝΧ θεωρείται αμελητέο και δεν λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς.

Η συγκεκριμένη εργασία επικεντρώνεται σε 5 χρήσεις κτιρίων τριτογενούς τομέα και συγκεκριμένα Ξενοδοχεία (ετήσιας λειτουργίας), Κλειστά Γυμναστήρια/Κολυμβητήρια, Σχολεία (πρωτοβάθμιας και δευτεροβάθμιας εκπαίδευσης), Νοσοκομεία/Κλινικές και Γραφεία. Οι συγκεκριμένες χρήσεις συνήθως περιλαμβάνουν κτίρια με μεγάλη θερμαινόμενη επιφάνεια και θερμαινόμενο όγκο, ιδιομορφίες ως προς τη λειτουργία τους και μεγαλύτερη ομοιομορφία ως προς τα χαρακτηριστικά τους σε σχέση με άλλες χρήσεις.

2. ΣΥΝΟΠΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ (ΠΕΑ)

Μέχρι τον Δεκέμβριο του 2016 είχαν εκδοθεί περίπου 960.000 ενεργειακά πιστοποιητικά από τα οποία 17% αναφέρονται σε κτίρια του τριτογενούς τομέα. Η συντριπτική πλειοψηφία των πιστοποιητικών αφορούν κτιριακές μονάδες (τμήματα κτιρίου συγκεκριμένης χρήσης), ενώ μόνο 20.252 πιστοποιητικά αφορούν ολόκληρα κτίρια (ανεξάρτητα κτίρια ενιαίας χρήσης), τα οποία αποτελούν περίπου το 20% των πιστοποιητικών για τον τριτογενή τομέα. Η ανάλυση που ακολουθεί εστιάζει μόνο στα ολόκληρα κτίρια, καθώς θεωρούνται πιο αντιπροσωπευτικά όσον αφορά στην ενεργειακή συμπεριφορά.

Τα διαθέσιμα δεδομένα των ΠΕΑ περιορίζονται στα γενικά χαρακτηριστικά του κτιρίου (π.χ. χρήση, χρονική περίοδος κατασκευής, νομός, συνολική και θερμαινόμενη επιφάνεια) και στα αποτελέσματα των ενεργειακών υπολογισμών (π.χ. ενεργειακή κλάση, πρωτογενής ενέργεια και εκπομπές CO_2) και γι' αυτό χαρακτηρίζονται ως συνοπτικά.

2.1. Ποιοτικός έλεγχος δεδομένων ΠΕΑ

Ο βασικός ποιοτικός έλεγχος των διαθέσιμων στοιχείων πραγματοποιείται σε δυο επίπεδα, σύμφωνα με τη μεθοδολογία που είχε αναπτυχθεί στο [5] ώστε να εξασφαλιστεί η εγκυρότητα των συμπερασμάτων. Στο πρώτο επίπεδο γίνεται ένας έλεγχος για να εντοπιστούν τα λανθασμένα ή ασαφή δεδομένα. Με αυτόν τον τρόπο, αποκλείονται τα πιστοποιητικά που δεν είχαν υποβληθεί οριστικά, δεν ήταν πλήρως συμπληρωμένα, εκδόθηκαν από επιθεωρητές στους οποίους είχαν επιβληθεί κυρώσεις, εκδόθηκαν για το ίδιο κτίριο κατά την πρώτη φάση επιδοτούμενων προγραμμάτων, περιείχαν αμφισβητούμενα δεδομένα (π.χ. αρνητικές τιμές, θερμαινόμενη επιφάνεια μεγαλύτερη από συνολική ή μικρότερη από 20% της συνολικής, μηδενικές εκπομπές CO_2 για καύσιμο εκτός βιομάζας, κατανάλωση ζεστού νερού χρήσης (ΖΝΧ) για χρήσεις με μηδενική απαίτηση βάσει ΚΕΝΑΚ), περιείχαν «ύποπτες» τιμές (π.χ. πρωτογενή ενέργεια μικρότερη από 5 kWh/m^2 και μεγαλύτερη από 8.000 kWh/m^2).

Στη συνέχεια εφαρμόζεται ένας επιπλέον έλεγχος για τον εντοπισμό οριακών/ακραίων τιμών στα δεδομένα που προέκυψαν από τον έλεγχο πρώτου επιπέδου. Σε αυτό το δεύτερο επίπεδο ο έλεγχος εφαρμόζεται στα δεδομένα ανά επιμέρους χρήση κτιρίων, καθώς στον τριτογενή τομέα υπάρχουν ιδιαιτερότητες στην ενεργειακή συμπεριφορά των κτιρίων ανά χρήση. Με τη μέθοδο του θηκογράμματος (box plot) εντοπίζονται και αποκλείονται οι τιμές που μπορούν να θεωρηθούν ακραίες. Ακραίες χαρακτηρίζονται οι τιμές που είτε είναι μεγαλύτερες από το ανώτερο εξωτερικό φράγμα (Q3 + 3×(Q3-Q1)), ή μικρότερες από το κατώτερο εξωτερικό φράγμα (Q1 – 3×(Q3-Q1)), όπου Q1 είναι το 1ο Τεταρτημόριο (η τιμή κάτω από την οποία βρίσκεται το 25% των τιμών της μεταβλητής) και Q3 το 3ο Τεταρτημόριο (η τιμή κάτω από την οποία βρίσκεται το 75% των τιμών της μεταβλητής) [6].

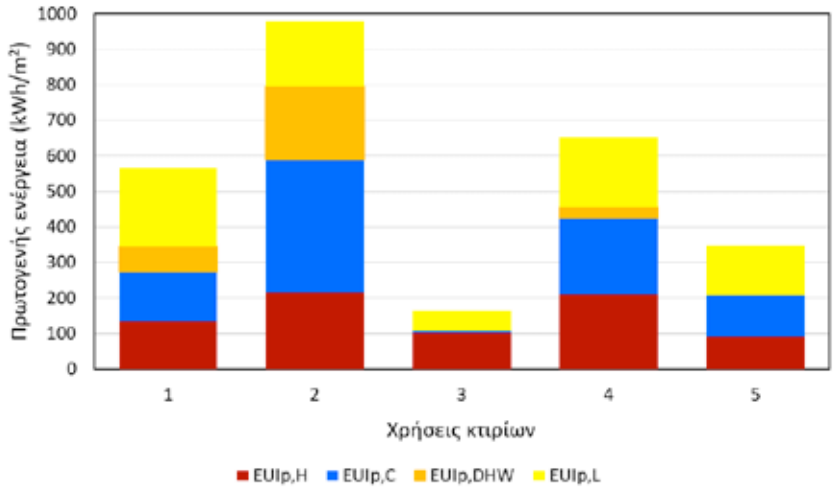
Σαν αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας, τα ποιοτικά ελεγμένα πιστοποιητικά ολόκληρων κτιρίων του τριτογενούς τομέα που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση που ακολουθεί είναι περίπου 16.300. Από αυτά, τα 2.861 (περίπου 15%) αντιστοιχούν στις 5 επιλεγμένες χρήσεις κτιρίων, και αποτελούν τη Βάση ΠΕΑ για τη συγκεκριμένη εργασία.

2.2. Επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων – Βάση ΠΕΑ

Τα κτίρια που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση που ακολουθεί, αντιστοιχούν περίπου στο 45% της θερμαινόμενης επιφάνειας, όπως φαίνεται αναλυτικά στον Πίνακα 1. Το 42% των επιθεωρούμενων κτιρίων έχουν κατασκευαστεί πριν από το 1980, το 54% μεταξύ 1981-2010 και μόλις το 4% μετά το 2010. Η ίδια κατανομή ισχύει και για τη συνολική θερμαινόμενη επιφάνεια. Τα επιθεωρούμενα κτίρια βρίσκονται σε 51 διαφορετικές πόλεις της Ελλάδας, καλύπτοντας και τις 4 κλιματικές ζώνες που ορίζονται στον ΚΕΝΑΚ [7], με το 16% (10% της συνολικής θερμαινόμενης επιφάνειας) να βρίσκονται στη Ζώνη Α, 56% (56%) στη Ζώνη Β, 26% (31%) στη Ζώνη Γ και μόλις το 3% (3%) στη Ζώνη Δ.

Τα κτίρια του τριτογενούς τομέα δεν έχουν την ομοιομορφία των κτιρίων κατοικιών ως προς τις συνθήκες λειτουργίας τους και έχουν υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις (π.χ. χειρουργεία, μονάδες εντατικής, εσωτερικά κολυμβητήρια, κ.α.), με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν σημαντική διαφοροποίηση στην κατανάλωση ενέργειας ανάλογα με την χρήση. Η μέση υπολογιζόμενη πρωτογενής ενέργεια για τις 5 επιλεγμένες χρήσεις κτιρίων κυμαίνεται από 163.6 (διάμεσος 145.3) έως 977.7 (974.4) kWh/m^2. Η χαμηλότερη κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας αντιστοιχεί στα Σχολεία, τα οποία έχουν περιορισμένο ωράριο και περίοδο λειτουργίας και μικρά εσωτερικά κέρδη, ενώ το ΖΝΧ δεν συνυπολογίζεται. Τα Κλειστά Γυμναστήρια/Κολυμβητήρια παρουσιάζουν την υψηλότερη κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας, εξαιτίας των υψηλών τους απαιτήσεων για νωπό αέρα και ΖΝΧ και των μεγάλων εσωτερικών κερδών. Η αντίστοιχη μέση τιμή για τα ολόκληρα κτίρια κατοικιών κυμαίνεται μεταξύ 240.8 kWh/m^2 στις πολυκατοικίες και 384.2 kWh/m^2 στις μονοκατοικίες [8].

Η κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας ανά τελική χρήση για τις 5 επιλεγμένες χρήσεις κτιρίων παρουσιάζεται στην Εικόνα 1. Ο φωτισμός αποτελεί το 20-40% της τελικής πρωτογενούς κατανάλωσης του κτιρίου, εμφανίζοντας τη μέγιστη συνεισφορά στα Ξενοδοχεία και στα Γραφεία, το οποίο μπορεί να αποδοθεί στον συνδυασμό των υψηλών απαιτήσεων φωτισμού και της παλαιότητας του συστήματος φωτισμού. Η θέρμανση χώρων αποτελεί το 22-61% της τελικής πρωτογενούς κατανάλωσης, με τη μέγιστη συνεισφορά να παρατηρείται, όπως είναι αναμενόμενο, στα Σχολεία, εξαιτίας της περιόδου λειτουργίας τους (κυρίως την περίοδο θέρμανσης και πρωινές ώρες). Η ψύξη χώρων κυμαίνεται μεταξύ 5-38% της συνολικής κατανάλωσης με μέγιστη συνεισφορά στα Κλειστά Γυμναστήρια/Κολυμβητήρια κυρίως λόγω των μεγάλων θερμαινόμενων όγκων και των υψηλών απαιτήσεων νωπού αέρα. Στα Νοσοκομεία/Κλινικές υπάρχει ισοδύναμη συνεισφορά και των τριών αυτών τελικών χρήσεων. Το ΖΝΧ έχει τη μικρότερη συνεισφορά από τις 4 τελικές χρήσεις η οποία κυμαίνεται από 4% μέχρι 21%. Στον Πίνακα 2 παρουσιάζεται η συνολική υπολογιζόμενη πρωτογενής ενέργεια και η κατανομή της ανά τελική χρήση για τις 5 επιλεγμένες χρήσεις κτιρίων.



Χρήσεις κτιρίων: 1-Ξενοδοχεία, 2-Κλειστά Γυμναστήρια/Κολυμβητήρια, 3-Σχολεία, 4-Νοσοκομεία/Κλινικές, 5- Γραφεία

Εικόνα 1. Μέση υπολογιζόμενη πρωτογενής ενέργεια για θέρμανση (EUIp,H), ψύξη (EUIp,C), ΖΝΧ θέρμανση (EUIp,DHW) και φωτισμό (EUIp,L) ανά χρήση κτιρίου, από τη Βάση ΠΕΑ.

3. ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ (Αρχεία ενεργειακών επιθεωρήσεων)

Τα στοιχεία που συγκεντρώνονται από τις ενεργειακές επιθεωρήσεις κτιρίων υποβάλλονται στην πλατφόρμα buildingcert για την έκδοση ΠΕΑ. Συνολικά μέχρι τον Δεκέμβριο του 2016 είχαν υποβληθεί περίπου 24000 αρχεία ενεργειακών επιθεωρήσεων για ολόκληρα κτίρια του τριτογενούς τομέα.

Τα δεδομένα των ενεργειακών επιθεωρήσεων περιλαμβάνουν επιπλέον πληροφορίες για το κτίριο εκτός από τα γενικά χαρακτηριστικά που περιλαμβάνονται στα ΠΕΑ (αριθμός ορόφων, προσανατολισμός, κ.α.), λεπτομέρειες για τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά (επιφάνειες, συντελεστή θερμοπερατότητας, συντελεστή σκίασης) καθώς και τα χαρακτηριστικά των ηλεκτρομηχανολογικών εγκαταστάσεων (συστήματα, αποδόσεις, πηγές ενέργειας) και χαρακτηρίζονται ως αναλυτικά δεδομένα. Τα αρχεία αυτά δεν περιλαμβάνουν αποτελέσματα ενεργειακών υπολογισμών.

Αρχικά πραγματοποιείται ένας ποιοτικός έλεγχος των διαθέσιμων στοιχείων. Στη συνέχεια, τα ποιοτικά ελεγμένα δεδομένα χρησιμοποιούνται με τον υπολογιστικό πυρήνα του ΤΕΕ-ΚΕΝΑΚ για τον υπολογισμό της ενεργειακής απαίτησης, της τελικής και πρωτογενούς κατανάλωσης ενέργειας του κτιρίου, για τις επιμέρους τελικές χρήσεις και για ολόκληρο το κτίριο. Τα αποτελέσματα των συγκεκριμένων υπολογισμών χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της ενεργειακής συμπεριφοράς των κτιρίων και για τον προσδιορισμό ενεργειακών δεικτών επίδοσης.

3.1. Ποιοτικός έλεγχος δεδομένων ενεργειακών επιθεωρήσεων

Τα αναλυτικά δεδομένα επιτρέπουν έναν διαφορετικό, λεπτομερέστερο και αναλυτικότερο ποιοτικό έλεγχο των διαθέσιμων στοιχείων. Σε πρώτο επίπεδο τα αρχεία των ενεργειακών επιθεωρήσεων αποκλείονται στην περίπτωση που περιέχουν δεδομένα:

Βήμα 1: ημιτελή ή εμφανώς λανθασμένα (π.χ. αρνητικές τιμές, θερμαινόμενη επιφάνεια μεγαλύτερη από συνολική).

Βήμα 2: δεν είναι συμβατά με τις αντίστοιχες επιτρεπόμενες και προτεινόμενες τιμές για την ενεργειακή επιθεώρηση κτιρίου όπως αυτές έχουν οριστεί στην Τεχνική Οδηγία Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας [9], Οδηγίες και Έντυπα Εκθέσεων Ενεργειακών Επιθεωρήσεων Κτηρίων, Συστημάτων Θέρμανσης και Συστημάτων Κλιματισμού. Συγκεκριμένα: Λόγος διείσδυσης αέρα από ανοίγματα προς την επιφάνεια των ανοιγμάτων μεγαλύτερος από 16 $m^3/h/m^2$ ή μικρότερος από 0.4 $m^3/h/m^2$, Συντελεστής θερμοπερατότητας μεγαλύτερος από 6 W/(m²K) για εξωτερικό τοίχο, 7.5 W/(m²K) για οροφή, 5 W/(m²K) για πιλοτή και 7 W/(m²K) για διαφανή επιφάνεια, Συντελεστής σκίασης μεγαλύτερος από 1, Δεν υπάρχει μηχανικός αερισμός, Θεωρητικό σύστημα θέρμανσης εκτός από λέβητα πετρελαίου με απόδοση 93.5%, μέσο μηνιαίο ποσοστό κάλυψης θερμικού φορτίου μικρότερο από 100%, Θεωρητικό σύστημα ψύξης εκτός από αντλία θερμότητας με ονομαστικό δείκτη αποδοτικότητας 2.8, μέσο μηνιαίο ποσοστό κάλυψης ψυκτικού φορτίου μικρότερο από 100%.

Βήμα 3: αμφισβητούμενα. Συγκεκριμένα: Διείσδυση αέρα (από κουφώματα, καμινάδες και θυρίδες εξαερισμού) μικρότερη από 0.1 ACH ή μεγαλύτερη από 10 ACH; Λόγος θερμαινόμενου όγκου προς θερμαινόμενη επιφάνεια μικρότερος από 2m; Λόγος συνολικής επιφάνειας προς ανεμιστήρες οροφής (αν υπάρχουν) μικρότερος από 10 m^2/ανεμιστήρα;

Στη συνέχεια και κατά αντιστοιχία με την διαδικασία που ακολουθείται στα ΠΕΑ, εφαρμόζεται ένας επιπλέον έλεγχος για τον εντοπισμό οριακών/ακραίων τιμών στα δεδομένα που προέκυψαν από τον έλεγχο πρώτου επιπέδου. Για τον σκοπό αυτό τα δεδομένα των ενεργειακών επιθεωρήσεων ομαδοποιούνται σε τριάντα χρήσεις κτιρίου (BU1 με BU30), τρεις χρονικές περιόδους κατασκευής (πριν το 1980, μεταξύ 1981 – 2010 και μετά το 2010) και τέσσερις κλιματικές ζώνες (από τη Ζώνη Α – έως τη Ζώνη Δ). Στα ομαδοποιημένα δεδομένα χρησιμοποιείται η μέθοδος του θηκογράμματος για τον εντοπισμό ακραίων τιμών και αποκλείονται αρχεία στα οποία έστω και ένα δεδομένο χαρακτηρίζεται ως ακραία τιμή. Σαν αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας, τα αρχεία ενεργειακών επιθεωρήσεων που χρησιμοποιούνται τελικά είναι 2.445. Από αυτά, τα 488 (περίπου 20%) αντιστοιχούν στις 5 επιλεγμένες χρήσεις κτιρίων, και αποτελούν τη Βάση Επιθεωρήσεων για τη συγκεκριμένη εργασία.

3.2. Επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων – Βάση Επιθεωρήσεων

Η χρονική και χωρική κατανομή των κτιρίων αυτών είναι παρόμοια με τα αντίστοιχα κτίρια από τη Βάση ΠΕΑ, όπως απεικονίζεται στον Πίνακα 1. Το 42% έχουν κατασκευαστεί πριν από το 1980, το 51% μεταξύ 1981-2010 και μόλις το 7% μετά το 2010. Η κατανομή δεν διαφοροποιείται ούτε και για τη συνολική θερμαινόμενη επιφάνεια, αφού το 63% αντιστοιχεί σε κτίρια της δεύτερης περιόδου (1981-2010) και μόνο το 4% στα νέα κτίρια που έχουν κατασκευαστεί μετά την εφαρμογή του ΚΕΝΑΚ. Τα επιθεωρούμενα κτίρια βρίσκονται σε 51 διαφορετικές πόλεις της Ελλάδας, καλύπτοντας και τις 4 κλιματικές ζώνες, με το 17% (26% της συνολικής θερμαινόμενης επιφάνειας) να βρίσκονται στη Ζώνη Α, 63% (42%) στη Ζώνη Β, 17% (30%) στη Ζώνη Γ και το 3% (2%) στη Ζώνη Δ.

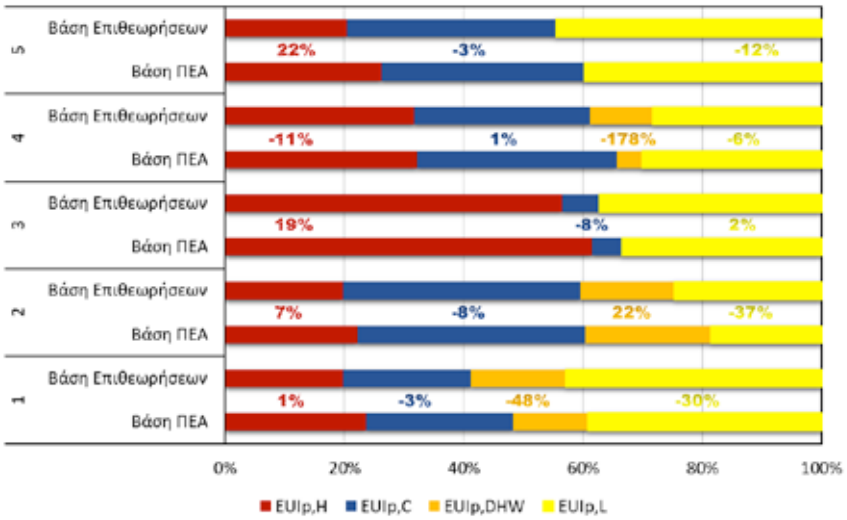
Τα δεδομένα που περιλαμβάνονται στη Βάση Επιθεωρήσεων δεν περιλαμβάνουν αποτελέσματα ενεργειακών υπολογισμών, οπότε όλα τα δεδομένα των αρχείων επιθεωρήσεων χρησιμοποιήθηκαν με τον υπολογιστικό πυρήνα του ΤΕΕ-ΚΕΝΑΚ για τον υπολογισμό της πρωτογενούς κατανάλωσης ενέργειας του κτιρίου, για τις επιμέρους τελικές χρήσεις και για ολόκληρο το κτίριο.

Ο φωτισμός αποτελεί τη σημαντικότερη τελική χρήση για 2 χρήσεις κτιρίων (Γραφεία και Ξενοδοχεία) με 45% και 40% της τελικής πρωτογενούς κατανάλωσης αντίστοιχα. Η θέρμανση χώρων αποτελεί το 56% της τελικής πρωτογενούς κατανάλωσης στα Σχολεία. Η ψύξη χώρων με 40% αποτελεί τη σημαντικότερη τελική χρήση στα Κλειστά Γυμναστήρια/ Κολυμβητήρια. Η υπολογιζόμενη συνολική πρωτογενής ενέργεια και η κατανομή της στις τελικές χρήσεις στις 5 επιλεγμένες χρήσεις κτιρίων παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.

4. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται οι αντιπροσωπευτικοί δείκτες επίδοσης για την ενεργειακή συμπεριφορά κτιρίων του τριτογενούς τομέα (πρωτογενής ενέργεια συνολικά για το κτίριο και για τις τέσσερεις τελικές χρήσεις), από δεδομένα που προκύπτουν από δυο διαφορετικές προσεγγίσεις. Η πρώτη χρησιμοποιεί συνοπτικά δεδομένα που περιλαμβάνονται στα Πιστοποιητικά Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων (ΠΕΑ) και η δεύτερη αναλυτικά δεδομένα που συγκεντρώνονται σε ένα προγενέστερο στάδιο, κατά τις ενεργειακές επιθεωρήσεις κτιρίων για την έκδοση των πιστοποιητικών.

Η πλειοψηφία των δημοσιευμένων στοιχείων για αντιπροσωπευτικούς δείκτες και τιμές αναφοράς σχετικά με την ενεργειακή συμπεριφορά των κτιρίων προέρχονται από τα ΠΕΑ. Αυτό είναι αναμενόμενο αφού τα δεδομένα από ΠΕΑ είναι πιο εύκολα διαθέσιμα σε αντίθεση με τα πρωτογενή δεδομένα από τις ενεργειακές επιθεωρήσεις κτιρίων. Έχοντας όμως δυο διαφορετικές βάσεις δεδομένων δημιουργείται το ερώτημα αν υπάρχουν σημαντικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων των δύο προσεγγίσεων. Η συγκεκριμένη πληροφορία είναι πολύ σημαντική καθώς τα αναλυτικά δεδομένα θεωρούνται καλύτερης ποιότητας και επιτρέπουν πιο αναλυτικό έλεγχο για πιθανά σφάλματα, με αποτέλεσμα οι δείκτες επίδοσης που προκύπτουν από τα αναλυτικά δεδομένα να είναι πιο αξιόπιστοι. Στην συγκεκριμένη εργασία, λόγω των πιο λεπτομερών ελέγχων τα αναλυτικά δεδομένα είναι κατά 80-97% λιγότερα από τα συνοπτικά. Σε ορισμένες χρήσεις κτιρίων αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μην υπάρχουν ακόμη διαθέσιμα ένας ικανοποιητικός αριθμός δεδομένων, που όμως μπορεί να βελτιωθεί στο άμεσο μέλλον με την διενέργεια περισσότερων ενεργειακών επιθεωρήσεων. Άλλη μια σημαντική παράμετρος διαφοροποίησης από άλλα παρόμοια δημοσιευμένα στοιχεία είναι ότι η παρούσα εργασία βασίζεται στην ανάλυση μόνο ολόκληρων κτιρίων ενιαίας χρήσης. Η διαφοροποίηση αυτή μπορεί να είναι σημαντική σε ορισμένες χρήσεις κτιρίων, όπως τα γραφεία. Για παράδειγμα, τα δεδομένα που προέρχονται από μια κτιριακή μονάδα με χρήση γραφείου, δηλαδή ένα διαμέρισμα σε μια πολυκατοικία που χρησιμοποιείται ως γραφείο, διαφοροποιούνται σημαντικά από ένα αυτοτελές κτίριο γραφείων. Στην Εικόνα 2 παρουσιάζεται η κατανομή της πρωτογενούς ενέργειας ανά τελική χρήση όπως προκύπτει από την Βάση ΠΕΑ σε σύγκριση με την αντίστοιχη που προκύπτει από την Βάση Επιθεωρήσεων.



Χρήσεις κτιρίων: 1-Ξενοδοχεία, 2-Κλειστά Γυμναστήρια/Κολυμβητήρια, 3-Σχολεία, 4-Νοσοκομεία/Κλινικές, 5-Γραφεία

Εικόνα 2. Κατανομή της μέσης υπολογιζόμενης πρωτογενούς ενέργειας για θέρμανση (EUIp,H), ψύξη (EUIp,C), ZNX (EUIp,DHW) και φωτισμό (EUIp,L) ανά χρήση κτιρίου, από τη Βάση ΠΕΑ και από την Βάση Επιθεωρήσεων, και ποσοστιαία μεταβολή των επιμέρους ποσοτήτων μεταξύ των δύο βάσεων δεδομένων.

Η γενική εικόνα είναι παρόμοια για τις δύο βάσεις δεδομένων. Υπάρχουν διαφοροποιήσεις των δεικτών μεταξύ των δυο βάσεων, οι οποίες οφείλονται κυρίως στον διαφορετικό ποιοτικό έλεγχο. Η πρωτογενής ενέργεια για ZNX παρουσιάζει την μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ των δεδομένων της Βάσης ΠΕΑ και της Βάσης Επιθεωρήσεων, με τις δυο μεγαλύτερες τιμές να αντιστοιχούν στα Νοσοκομεία/Κλινικές και στα Ξενοδοχεία. Αυτό πιθανόν να οφείλεται και στη μεγάλη διαφορά της τυπικής κατανάλωσης ζεστού νερού χρήσης ανάμεσα στις διάφορες υπό-κατηγορίες των συγκεκριμένων χρήσεων κτιρίων (100% και 72% στην τυπική κατανάλωση ανά κλίνη αντίστοιχα) [10]. Τη δεύτερη μεγαλύτερη ποσοστιαία διαφορά παρουσιάζει η πρωτογενής ενέργεια για φωτισμό, με τις δυο μεγαλύτερες τιμές να αντιστοιχούν στα Κλειστά Γυμναστήρια/Κολυμβητήρια και στα Ξενοδοχεία. Η θέρμανση παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ποσοστιαία διαφοροποίησή της στα Γραφεία και Σχολεία. Τέλος, η πρωτογενής ενέργεια για ψύξη έχει τη μικρότερη ποσοστιαία διαφορά μεταξύ των δύο βάσεων.

Η παρατηρούμενη διαφοροποίηση μεταξύ των αποτελεσμάτων των δύο προσεγγίσεων καθιστά αναγκαία την διερεύνηση ύπαρξης μιας εύκολα εφαρμόσιμης διαδικασίας που θα επιτρέπει τον προσδιορισμό της αξιοπιστίας των δεικτών επίδοσης. Με αυτόν τον τρόπο θα είναι δυνατή η χρήση των δεδομένων της Βάσης ΠΕΑ, ώστε να είναι εύκολα υλοποιήσιμη, αλλά θα διασφαλίζει τα αποτελέσματα που προκύπτουν μέσω της σύγκρισης με τα δεδομένα της Βάσης Επιθεωρήσεων. Για τον σκοπό αυτό, και με δεδομένο ότι υπάρχουν δύο ανεξάρτητες διαδικασίες όπως ήδη παρουσιάστηκε στις ενότητες 2 και 3, είναι απαραίτητο να ελεγχθεί η συμβατότητα των αποτελεσμάτων τους. Για τον σκοπό αυτό γίνεται η σύγκριση των μέσων τιμών, των διακυμάνσεων και των στατιστικών κατανομών των δεικτών επίδοσης (πρωτογενής ενέργεια συνολική -EUIp, για θέρμανση-EUIp,H, για ψύξη-EUIp,C, για ZNX-EUIp,DHW και για φωτισμό-EUIp,L) από τις δυο ανεξάρτητες προσεγγίσεις, με τη χρήση αμφίπλευρων παραμετρικών και μη-παραμετρικών μεθόδων στατιστικού ελέγχου υποθέσεων.

Η γενική ιδέα της διαδικασίας είναι η εξής: αρχικά επιλέγεται ως μηδενική υπόθεση αυτή για την οποία υπάρχει αμφισβήτηση, και εξετάζεται αν απορρίπτεται ή δεν απορρίπτεται με βάση το τι παρατηρείται στο τυχαίο δείγμα. Πιο συγκεκριμένα, υποθέτοντας ότι η μηδενική υπόθεση είναι αληθής, αν αυτό που παρατηρείται στο δείγμα είναι ακραίο, δηλαδή, αν έχει πολύ μικρή πιθανότητα να συμβεί (τιμή $p< 0.05$), τότε η υπόθεση απορρίπτεται. Σε αντίθετη περίπτωση, δηλαδή, αν αυτό που παρατηρείται στο δείγμα δεν είναι ακραίο-σπάνιο, τότε δεν υπάρχουν αρκετές ενδείξεις για την απόρριψη της (τιμή $p> 0.05$).

Αρχικά χρησιμοποιείται ο παραμετρικός έλεγχος Levene's [11] για τη σύγκριση των διακυμάνσεων των δεικτών επίδοσης των δειγμάτων. Η μηδενική υπόθεση που ελέγχεται είναι η ισότητα των διακυμάνσεων, δηλαδή ότι δεν υπάρχει διαφοροποίηση μεταξύ των διακυμάνσεων. Στη συνέχεια, ανάλογα εάν ισχύει ή όχι η ισότητα των διακυμάνσεων στα δύο δείγματα, εφαρμόζεται το κατάλληλο t-test για την σύγκριση των μέσων τιμών των δεικτών επίδοσης, με μηδενική υπόθεση ότι δεν διαφέρουν μεταξύ τους. Επιπλέον, εφαρμόζονται και τρεις μη παραμετρικοί έλεγχοι για την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων. Πρόκειται για τον μη παραμετρικό έλεγχο Conover για την ισότητα των διακυμάνσεων, τον έλεγχο Mann-Whitney (M-W) για την ισότητα των διαμέσων, και τέλος τον έλεγχο Kolmogorov-Smirnov (K-S) για την ομοιογένεια των κατανομών των δυο ανεξάρτητων δειγμάτων [12].

Τα αποτελέσματα των στατιστικών ελέγχων για κάθε δείκτη επίδοσης (Πίνακας 3) συνοψίζονται στον κωδικό απόρριψης (F), με τη μορφή τριψήφιου αριθμού: το πρώτο ψηφίο αναφέρεται στα αποτελέσματα από τον έλεγχο της ισότητας των μέσων τιμών και των διαμέσων (t-test, M-W), το δεύτερο στον έλεγχο της ισότητας των διακυμάνσεων (Levene's, Conover) και το τρίτο ψηφίο στον έλεγχο ομοιογένειας (K-S). Για τα πρώτα δυο ψηφία το "0" αντιστοιχεί στην ισότητα των μέσων τιμών ή των διακυμάνσεων τόσο στον παραμετρικό όσο και στον μη παραμετρικό έλεγχο, ενώ το "1" στην απόρριψή της σε τουλάχιστον έναν από τους δύο ελέγχους. Για το τρίτο ψηφίο το "0" αντιστοιχεί στην ομοιογένεια των κατανομών στον έλεγχο K-S test, ενώ το "1" στην απόρριψή της. Για παράδειγμα, η περίπτωση 010 αντιστοιχεί σε ισότητα των μέσων τιμών και διαμέσων, σε απόρριψη της ισότητας των διακυμάνσεων και σε ομοιογενείς κατανομές των δυο δειγμάτων.

Η διαφοροποίηση ή μη για κάθε δείκτη επίδοσης μπορεί να εξαχθεί με βάση τον κωδικό απόρριψης. Δίνεται μεγαλύτερη βαρύτητα στη μέση τιμή/διάμεσο δεδομένου ότι, ουσιαστικά, αυτή είναι η στατιστική παράμετρος που συνήθως χρησιμοποιείται. Συγκεκριμένα θωρούμε ότι τα αποτελέσματα μεταξύ των δυο προσεγγίσεων διαφοροποιούνται (Δ) όταν υπάρχει απόρριψη στον έλεγχο των μέσων τιμών (πρώτο ψηφίο κωδικού απόρριψης), ενώ δεν διαφοροποιούνται (ΔΔ) στις άλλες περιπτώσεις.

Τα αποτελέσματα για την συνολική πρωτογενή κατανάλωση σε μερικές περιπτώσεις είναι σε αντίθεση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα από τις τελικές χρήσεις που την καθορίζουν, καθώς μπορεί να προέρχονται από αντισταθμιστικές διακυμάνσεις των τελικών χρήσεων. Οι δείκτες επίδοσης μεταξύ των δύο διαφορετικών προσεγγίσεων δεν διαφοροποιούνται στα Νοσοκομεία/ Κλινικές καθώς και στα Κλειστά Γυμναστήρια /Κολυμβητήρια, τόσο για τη συνολική πρωτογενή κατανάλωση όσο και για τις τελικές χρήσεις. Σε αντίθεση, οι άλλες τρεις χρήσεις κτιρίων φαίνεται να παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις σε κάποιους από τους δείκτες επίδοσης. Στα Ξενοδοχεία συνολικά τρεις δείκτες παρουσιάζουν στατιστικά σημαντική διαφοροποίηση, τόσο η συνολική κατανάλωση, όσο και δύο από τις τέσσερις τελικές χρήσεις (ZNX και φωτισμός, που αθροιστικά αποτελούν πάνω από το 50% της συνολικής κατανάλωσης). Στα Γραφεία υπάρχει σημαντική διαφοροποίηση σε δυο από τις τρεις τελικές χρήσεις (αθροιστικά πάνω από το 65% της συνολικής κατανάλωσης). Στα Σχολεία η κατανάλωση για θέρμανση (που συνεισφέρει πάνω από 55% στη συνολική κατανάλωση) παρουσιάζει διαφοροποίηση και αυτό ίσως επηρεάζει και τη συνολική κατανάλωση η οποία επίσης εμφανίζει διαφοροποίηση. Αξίζει να σημειωθεί ότι η πρωτογενής κατανάλωση για ψύξη δεν παρουσιάζει διαφοροποίηση σε καμία από τις χρήσεις κτιρίων, κάτι που τονίζει ίσως οφείλεται στο γεγονός ότι η μηνιαία μέθοδος υπολογισμού δεν έχει πολύ μεγάλη ευαισθησία όσον αφορά στην Ψύξη, κάτι που είχε διαφανεί και από το γεγονός ότι παρουσιάζει τη μικρότερη ποσοστιαία μεταβολή μεταξύ των δύο βάσεων.

Πίνακας 3: Αποτελέσματα παραμετρικών και μη παραμετρικών στατιστικών ελέγχων για τους δείκτες ενεργειακής επίδοσης. Οι περιπτώσεις που αποτυγχάνουν οι αντίστοιχοι έλεγχοι απεικονίζονται με σκίαση

Tests	EUIp,H	EUIp,C	EUIp,DHW	EUIp,L	EUIp
1-Ξενοδοχεία					
t-test / p	0.15 / 0.88	-0.45 / 0.65	-1.73 / 0.09	-2.23 / 0.03	-2.38 / 0.02
M-W / p	-0.62 / 0.53	-0.43 / 0.67	-2.70 / 0.01	1.92 / 0.05	-1.86 / 0.06
Levene's / p	2.862 / 0.09	0.19 / 0.66	11.24 / 0.00	23.93 / 0.00	18.28 / 0.00
Conover / p	-0.82 / 0.41	-0.07 / 0.94	-3.24 / 0.00	-3.18 / 0.00	-2.37 / 0.02
K-S / p	0.78 / 0.58	0.66 / 0.77	1.41 / 0.04	1.30 / 0.07	0.95 / 0.33
Κωδικός απόρριψης, F	000	000	111	110	110
Κατάσταση Διαφοροποίησης	ΔΔ	ΔΔ	Δ	Δ	Δ
2-Κλειστά Γυμναστήρια /Κολυμβητήρια					
t-test / p	0.46 / 0.64	-0.74 / 0.46	1.38 / 0.17	-1.16 / 0.26	-0.28 / 0.78
M-W / p	-0.44 / 0.66	-0.01 / 0.99	-1.26 / 0.21	-0.32 / 0.75	-0.16 / 0.88
Levene's / p	0.43 / 0.51	1.23 / 0.27	0.04 / 0.84	24.14 / 0.00	7.35 / 0.01
Conover / p	-0.09 / 0.93	-0.83 / 0.41	-0.17 / 0.87	-3.49 / 0.00	-0.65 / 0.51
K-S / p	0.75 / 0.62	0.44 / 0.99	1.15 / 0.14	0.61 / 0.85	0.64 / 0.81
Κωδικός απόρριψης, F	000	000	000	010	010
Κατάσταση Διαφοροποίησης	ΔΔ	ΔΔ	ΔΔ	ΔΔ	ΔΔ
3-Σχολεία					
t-test / p	2.32 / 0.02	-0.87 / 0.38		0.52 / 0.61	2.45 / 0.01
M-W / p	-3.01 / 0.00	-1.07 / 0.29		-0.94 / 0.35	-3.28 / 0.00
Levene's / p	3.29 / 0.07	1.72 / 0.19		0.05 / 0.82	1.18 / 0.28
Conover / p	-0.58 / 0.56	-0.58 / 0.56		-0.08 / 0.94	-0.08 / 0.94
K-S / p	1.75 / 0.00	1.04 / 0.23		1.47 / 0.03	1.95 / 0.00
Κωδικός απόρριψης, F	101	000		000	101
Κατάσταση Διαφοροποίησης	Δ	ΔΔ		ΔΔ	Δ
4 - Νοσοκομεία/ Κλινικές					
t-test / p	-0.53 / 0.60	0.05 / 0.96	-1.94 / 0.08	-0.43 / 0.66	-0.93 / 0.36
M-W / p	-0.07 / 0.94	-0.07 / 0.94	-0.97 / 0.33	-0.50 / 0.62	-0.44 / 0.66
Levene's / p	3.35 / 0.07	0.04 / 0.84	74.66 / 0.00	1.81 / 0.18	3.33 / 0.07
Conover / p	-0.68 / 0.50	-0.05 / 0.96	-1.79 / 0.07	-1.01 / 0.31	-0.52 / 0.60
K-S / p	0.76 / 0.61	0.71 / 0.70	1.11 / 0.17	0.76 / 0.61	0.66 / 0.78
Κωδικός απόρριψης, F	000	000	000	000	000
Κατάσταση Διαφοροποίησης	ΔΔ	ΔΔ	ΔΔ	ΔΔ	ΔΔ
5 - Γραφεία					
t-test / p	4.10 / 0.00	-0.82 / 0.41		-2.32 / 0.02	0.24 / 0.81
M-W / p	-4.54 / 0.00	-1.04 / 0.30		-1.68 / 0.09	-1.81 / 0.07
Levene's / p	13.43 / 0.00	0.07 / 0.79		31.91 / 0.00	2.67 / 0.10
Conover / p	-2.65 / 0.01	-0.06 / 0.95		-5.89 / 0.00	-1.52 / 0.13

K-S / p	2.50 / 0.00	0.88 / 0.42		1.69 / 0.01	1.03 / 0.24
Κωδικός απόρριψης, F	111	000		111	000
Κατάσταση Διαφοροποίησης	Δ	ΔΔ		Δ	ΔΔ

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκαν οι δείκτες επίδοσης για την ενεργειακή συμπεριφορά ολόκληρων κτιρίων για 5 βασικές χρήσεις του τριτογενούς τομέα, οι οποίοι προέκυψαν από δυο ανεξάρτητες βάσεις. Η πρώτη βάση περιλάμβανε δεδομένα των Πιστοποιητικών Ενεργειακής Απόδοσης (κυρίως αποτελέσματα ενεργειακών υπολογισμών), ενώ η δεύτερη πρωτογενή δεδομένα των ενεργειακών επιθεωρήσεων κτιρίων πριν την έκδοση των πιστοποιητικών. Προηγήθηκε ποιοτικός έλεγχος των διαθέσιμων στοιχείων για λανθασμένες, ή ακραίες τιμές, ώστε να εξασφαλιστεί η εγκυρότητα των συμπερασμάτων. Σε κάθε βάση εφαρμόστηκε διαφορετικός ποιοτικός έλεγχος εξαιτίας της φύσης των δεδομένων, με αποτέλεσμα να αποκλειστούν το 12% και 90% των αρχικών δεδομένων, αντίστοιχα. Τελικά αναλύθηκαν δεδομένα από συνολικά 2861 ΠΕΑ και 488 επιθεωρήσεις κτιρίων.

Στη συνέχεια υπολογίστηκε η πρωτογενής ενέργεια συνολικά για το κτίριο και για τις τέσσερεις τελικές χρήσεις για τις 5 επιλεγμένες χρήσεις κτιρίων. Η συνολική πρωτογενής ενέργεια που προέκυψε από τα αρχεία επιθεωρήσεων ήταν μεγαλύτερη από την αντίστοιχη των ΠΕΑ για τα Ξενοδοχεία, Κλειστά Γυμναστήρια/Κολυμβητήρια και Νοσοκομεία/Κλινικές, ενώ για τα Γραφεία δεν παρουσίασε καμιά διαφοροποίηση. Η ποσοστιαία μεταβολή μεταξύ των δεικτών των δυο βάσεων κυμάνθηκε μεταξύ 0-18%, με τη μεγαλύτερη τιμή να αντιστοιχεί στα Ξενοδοχεία. Η ίδια τάση παρατηρήθηκε για την πρωτογενή ενέργεια και για τις τελικές χρήσεις εκτός από την ενέργεια για θέρμανση, η οποία ήταν μεγαλύτερη όταν προερχόταν από τα ΠΕΑ στο 80% των χρήσεων κτιρίων. Ο φωτισμός ήταν η σημαντικότερη τελική χρήση για το 40% των χρήσεων κτιρίων, ενώ η θέρμανση και η ψύξη για το 20%. Στα Νοσοκομεία/Κλινικές παρατηρήθηκε ισοδύναμη συνεισφορά και των τριών αυτών τελικών χρήσεων.

Σε δεύτερο στάδιο, έγινε σύγκριση των μέσων τιμών και των διακυμάνσεων των δεικτών επίδοσης μεταξύ των δυο ανεξάρτητων βάσεων, με τη χρήση παραμετρικών και μη-παραμετρικών ελέγχων, ώστε να διαπιστωθεί αν υπάρχουν στατιστικά σημαντικές διαφοροποιήσεις. Ο δείκτης επίδοσης για την πρωτογενή κατανάλωση φωτισμού είναι ο λιγότερο αξιόπιστος, αφού σε τρεις από τις πέντε επιλεγμένες χρήσεις κτιρίων εμφανίζεται διαφοροποιημένος μεταξύ των δυο προσεγγίσεων. Το γεγονός αυτό ίσως να οφείλεται και στο ότι τα δεδομένα για το φωτισμό δεν μπορούν να ελεγχθούν, καθώς επίσης και στη μεγάλη μεταβλητότητα της παραμέτρου σε μερικές χρήσεις κτιρίων. Οι δείκτες επίδοσης για τη συνολική και για την κατανάλωση για θέρμανση διαφοροποιούνται σε δυο χρήσεις κτιρίων, ενώ ο δείκτης για την κατανάλωση ΖΝΧ σε μια από τις τρεις χρήσεις κτιρίων που έχουν κατανάλωση ΖΝΧ.

Η συγκεκριμένη διαδικασία μπορεί να εφαρμοστεί σε όλες τις χρήσεις κτιρίων ώστε να υπάρχει μια πρώτη εκτίμηση για την αξιοπιστία των δεικτών επίδοσης των κτιρίων του τριτογενούς τομέα. Η διαδικασία ποιοτικού ελέγχου των ΠΕΑ ίσως θα πρέπει να αυστηροποιηθεί ώστε να εντοπίζονται περισσότερες λανθασμένες τιμές. Καθώς θα αυξάνεται ο αριθμός των ενεργειακών επιθεωρήσεων και των πιστοποιητικών θα μειώνεται το στατιστικό σφάλμα στον υπολογισμό των ενεργειακών δεικτών οι οποίοι θα είναι πιο αντιπροσωπευτικοί για κάθε χρήση κτιρίου.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Μέρος της έρευνας έγινε στα πλαίσια του έργου "ΘΕΣΠΙΑ 2" (Θεμελίωση Συνεργιστικών και ολοκληρωμένων μεθοδολογιών και εργαλείων παρακολούθησης, διαχείρισης και πρόγνωσης Περιβαλλοντικών παραμέτρων και πιέσεων»), που εντάσσεται στη «Δράση Στρατηγικής Ανάπτυξης Ερευνητικών και Τεχνολογικών Φορέων» και χρηματοδοτείται από το Επιχειρησιακό Πρόγραμμα «Ανταγωνιστικότητα, Επιχειρηματικότητα και Καινοτομία» στο πλαίσιο του ΕΣΠΑ 2014-2020, με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Ευρωπαϊκό Ταμείο Περιφερειακής Ανάπτυξης).
Η επίσημη βάση δεδομένων για το μητρώο των πιστοποιητικών ενεργειακή απόδοσης (www.buildingcert.gr) αναπτύχθηκε και συντηρείται από το Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας ΥΠΕΝ σε συνεργασία με το Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ). Οι συγγραφείς

ευχαριστούν το ΥΠΕΝ για την άδεια πρόσβασης στα ΠΕΑ. Η χρήση των δεδομένων και μέρος της εργασίας αυτής πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής της Κ.Γ. Δρούτσα στο Εργαστήριο Φυσικής της Ατμόσφαιρας του Τμήματος Φυσικής στο Πανεπιστήμιο Πατρών. Η ανάλυση που πραγματοποίησαν οι συγγραφείς και τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην εργασία δεν απηχούν κατ' ανάγκη την επίσημη γνώμη του Υπουργείου. Οι συγγραφείς κατέβαλαν κάθε δυνατή προσπάθεια για την προετοιμασία της εργασίας προς όφελος του κοινού με τις διαθέσιμες πληροφορίες.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] EUBuilding Stock Observatory, https://ec.europa.eu/energy/eu-buildings-datamapper_en

[2] ΕΛΣΤΑΤ 2015. Απογραφή Κτιρίων 2011. www.statistics.gr/census-buildings-2011

[3] Building stock characteristics, https://ec.europa.eu/energy/eu-buildings-factsheets_en

[4] EU energy in figures. Statistical pocketbook 2020. https://ec.europa.eu/energy/en/data-analysis/energy-statistical-pocketbook

[5] Droutsa, K.G., Balaras, C.A., Lykoudis, S., Kontoyiannidis, S., Dascalaki, E.G., and Argiriou, A.A., 2020, "Baselines for Energy Use & Carbon Emission Intensities in Hellenic Non-Residential Buildings", Energies, 13(8), pp. 1-29

[6] Tukey, J.W.. 1977, Exploratory Data Analysis, Addison-Wesley Publishing Company Reading, Mass. — Menlo Park, Cal., London, Amsterdam, Don Mills, Ontario, XVI, 688 S

[7] Έγκριση Κανονισμού Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων. ΦΕΚ 2367, Ιούλιος 2017

[8] Droutsa, K.G., Kontoyiannidis, S., Dascalaki, E.G., and Balaras, C.A., 2016, "Mapping the Energy Performance of Hellenic Residential Buildings from EPC (energy performance certificate) Data", Energy, 98, pp. 284-295.

[9] Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-4/2017 Α΄έκδοση ΦΕΚ 4003/Β/17-11-2017

[10] Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2017 Α έκδοση ΦΕΚ 4003/Β/17-11-2017)

[11] Levene, H, 1960, In Contributions to Probability and Statistics: Essays in Honor of Harold Hotelling, I. Olkin et al. eds., Stanford University Press, pp. 278-292

[12] Sprent, P, 1993, Applied non parametric statistical methods. 2nd ed. Chapman and Hall, London

ΑΝΤΙΠΡΟΣΩΠΕΥΤΙΚΕΣ ΤΥΠΟΛΟΓΙΕΣ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΚΤΙΡΙΩΝ ΤΡΙΤΟΓΕΝΟΥΣ ΤΟΜΕΑ

Καλλιόπη Γ. Δρούτσα[1,2*], Σίμων Κοντογιαννίδης[1], Κων/νος Α. Μπαλαράς[1], Έλενα Γ. Δασκαλάκη[1], Αθανάσιος Α. Αργυρίου[2]

[1] Ομάδα Εξοικονόμησης Ενέργειας, Ινστιτούτο Ερευνών Περιβάλλοντος & Βιώσιμης Ανάπτυξης, Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών,
[2] Εργαστήριο Φυσικής της Ατμόσφαιρας, Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Πατρών
*pdroutsa@noa.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία εστιάζει στα Ελληνικά κτίρια του τριτογενούς τομέα, για τα οποία υπάρχουν λιγότερες και πιο γενικές πληροφορίες σε σχέση με τα κτίρια κατοικιών, σε μια προσπάθεια καθορισμού αντιπροσωπευτικών τυπολογιών. Για τον καθορισμό τυπικών χαρακτηριστικών αναλύονται τα διαθέσιμα στοιχεία από τις ενεργειακές επιθεωρήσεις κτιρίων του τριτογενούς τομέα, τα οποία χρησιμοποιούνται για την έκδοση Πιστοποιητικού Ενεργειακής Απόδοσης (ΠΕΑ) από την επίσημη πλατφόρμα buildingcert. Τα δεδομένα από τις ενεργειακές επιθεωρήσεις περιλαμβάνουν γενικές πληροφορίες για το κτίριο (π.χ. τοποθεσία, προσανατολισμός, συνολική επιφάνεια, θερμαινόμενη επιφάνεια, όγκος), κατασκευαστικά χαρακτηριστικά (π.χ. επιφάνεια τοίχου, συντελεστή θερμοπερατότητας, συντελεστής σκίασης) καθώς και χαρακτηριστικά των ηλεκτρομηχανολογικών (Η/Μ) εγκαταστάσεων (π.χ. τύπος συστήματος, απόδοσης, μορφή ενέργειας). Τα αναλυτικά αυτά δεδομένα αποτελούν μια πηγή πολύτιμων πληροφοριών για το κτιριακό απόθεμα, οι οποίες δεν είναι διαθέσιμες από τις στατιστικές έρευνες και άλλες επίσημες αναφορές για τις πολυπληθείς χρήσεις των κτιρίων του τριτογενούς τομέα.

Αρχικά γίνεται ένας βασικός ποιοτικός έλεγχος των διαθέσιμων στοιχείων, ώστε να αποκλειστούν τυχόν λανθασμένες ή ακραίες τιμές και να εξασφαλιστεί η εγκυρότητα και αντιπροσωπευτικότητα των συμπερασμάτων. Στη συνέχεια, τα ποιοτικά ελεγμένα δεδομένα ομαδοποιούνται και αναλύονται για την προτεινόμενη τυπολογία των κτιρίων του τριτογενή τομέα. Η επεξεργασία των δεδομένων επιχειρείται για τριανταμία διαφορετικές χρήσεις κτιρίων, για τρεις χρονικές περιόδους κατασκευής (πριν από το 1980, μεταξύ 1981-2010 και μετά το 2010) και για τις τέσσερις κλιματικές ζώνες (Ζώνη Α, Ζώνη Β, Ζώνη Γ, Ζώνη Δ). Για κάθε μία από αυτές τις κατηγορίες, για τις οποίες υπάρχουν επαρκή δεδομένα, υπολογίζεται η μέση τιμή για τα χαρακτηριστικά του κελύφους και των Η/Μ συστημάτων.

Λέξεις Κλειδιά: *Κτίρια Τριτογενούς Τομέα, Ενεργειακές Επιθεωρήσεις, Τυπολογία Κτιρίων, Κέλυφος, Η/Μ Συστήματα*

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αποτελεσματική χρήση της ενέργειας αποτελεί βασικό πυλώνα της ενεργειακής και κλιματικής πολιτικής της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ), μαζί με την ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και τη μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου. Ο κτιριακός τομέας συγκεντρώνει υψηλό μερίδιο στην τελική κατανάλωση ενέργειας (περίπου 40% στην ΕΕ) και αναγνωρίζεται ως ένας από τους τομείς με σημαντική δυνατότητα εξοικονόμησης ενέργειας δεδομένης της διαφοροποίησης των κτιρίων από πλευράς ποιότητας και ηλικίας.

Λαμβάνοντας υπόψη την παλαιότητα του κτιριακού αποθέματος και τον σχετικά μικρό ρυθμό κατασκευής νέων κτιρίων, η μεγάλης έκτασης ενεργειακή αναβάθμιση παλαιών κτιρίων είναι σημαντική για την ενεργειακή αναβάθμιση μέχρι το 2050 και την εξοικονόμηση ενέργειας με ταυτόχρονη βελτίωση των συνθηκών άνεσης. Στην Ευρώπη το ποσοστό των nZEB ως προς τις νέες κατασκευές κυμαίνεται από 0,0% μέχρι 0,3% (Δανία) με μέση τιμή 0,1%, ενώ στην Ελλάδα το ποσοστό αυτό είναι πρακτικά μη ανιχνεύσιμο στο κτιριακό απόθεμα [1].

Εκτιμάται ότι τα κτίρια του τριτογενή τομέα καλύπτουν περίπου το 26% της συνολικής επιφάνειας δαπέδου του Ευρωπαϊκού κτιριακού αποθέματος, ποσοστό που κυμαίνεται από 11% στην Ιταλία μέχρι 41% στη Σλοβακία. Η συνολική χρήση τελικής ενέργειας κυμαίνεται μεταξύ 130,6kWh/m^2 στη Βουλγαρία και 652,5kWh/m^2 στην Ιταλία, με μέση τιμή 273,6kWh/m^2 [1].

Στην Ελλάδα τα κτίρια που δεν χρησιμοποιούνται ως κατοικίες, αποτελούν περίπου το 5% του συνόλου των κτιρίων και αντιπροσωπεύουν το 26% της συνολικής επιφάνειας του κτιριακού αποθέματος. Από αυτά, περίπου το 57% είναι κτίρια γραφείων και εμπορικής χρήσης, το 19% εκπαιδευτικά κτίρια, το 16% ξενοδοχεία και περίπου 8% νοσοκομεία και κλινικές [2]. Το 38,7% του συνόλου των Ελληνικών κτιρίων του τριτογενούς τομέα έχει κατασκευαστεί πριν το 1980, το 59,0% μέχρι το 2010, ενώ για το υπόλοιπο 2,3% το έτος κατασκευής εντοπίζεται στην τελευταία πενταετία [4]. Ένα μεγάλο ποσοστό των κτιρίων δεν διαθέτουν θερμομόνωση και παρουσιάζουν χαμηλή ενεργειακή απόδοση, ενώ παράλληλα στην πλειοψηφία τους διαθέτουν παλιές ηλεκτρομηχανολογικές (Η/Μ) εγκαταστάσεις. Η συνολική χρήση πρωτογενούς ενέργειας στα κτίρια του τριτογενούς τομέα κυμαίνεται μεταξύ 167,2kWh/m^2 και 1003,9kWh/m^2 ανάλογα με τη χρήση του κτιρίου, με μέση τιμή 448,0kWh/m^2, μεγαλύτερη κατά 26% από την αντίστοιχη τιμή για τις κατοικίες [3].

Αντίθετα με τα κτίρια κατοικιών, για τις πολυπληθείς χρήσεις των κτιρίων του τριτογενούς τομέα δεν υπάρχουν επαρκή διαθέσιμα στοιχεία από στατιστικές μελέτες και άλλες επίσημες αναφορές για τα ενεργειακά χαρακτηριστικά του κτιριακού κελύφους και των Η/Μ συστημάτων.

Στην παρούσα εργασία γίνεται ανάλυση και επεξεργασία των διαθέσιμων στοιχείων που συγκεντρώνονται κατά τις ενεργειακές επιθεωρήσεις κτιρίων του τριτογενούς τομέα, τα οποία χρησιμοποιούνται για την έκδοση Πιστοποιητικού Ενεργειακής Απόδοσης (ΠΕΑ) και προέρχονται από την επίσημη πλατφόρμα buildingcert. Η ανάλυση που ακολουθεί αφορά μόνο σε δεδομένα που αναφέρονται σε ολόκληρα κτίρια ενιαίας χρήσης. Σταδιακά, τα δεδομένα αυτά αποκαλύπτουν πολύτιμες πληροφορίες για την καλύτερη κατανόηση των χαρακτηριστικών των Ελληνικών κτιρίων του τριτογενή τομέα.

Για να διασφαλιστεί η καλύτερη δυνατή ποιότητα των διαθέσιμων στοιχείων, αλλά και η εγκυρότητα των συμπερασμάτων, αρχικά γίνεται ένας ποιοτικός έλεγχος για να απομακρυνθούν λανθασμένες ή μη πλήρεις εγγραφές καθώς και τυχόν ακραίες τιμές. Τα δεδομένα από τις ενεργειακές επιθεωρήσεις περιλαμβάνουν γενικές πληροφορίες για το κτίριο (π.χ. τοποθεσία, προσανατολισμός, συνολική επιφάνεια, θερμαινόμενη επιφάνεια, όγκος), κατασκευαστικά χαρακτηριστικά (π.χ. επιφάνεια τοίχου, συντελεστή θερμοπερατότητας, συντελεστής σκίασης) καθώς και χαρακτηριστικά των Η/Μ εγκαταστάσεων (π.χ. τύπος συστήματος, απόδοσης, μορφή ενέργειας).

Η επεξεργασία των δεδομένων επιχειρείται για διαφορετικές χρήσεις κτιρίων, χρονικές περιόδους κατασκευής και κλιματικές ζώνες που απαρτίζουν την τυπολογία των κτιρίων του τριτογενούς τομέα. Για κάθε έναν από αυτούς τους τύπους, για τον οποίο υπάρχουν επαρκή δεδομένα, καθορίζονται τα τυπικά χαρακτηριστικά του κελύφους και των Η/Μ συστημάτων.

1.1. Τυπολογία κτιρίων τριτογενούς τομέα

Η ταξινόμηση των κτιρίων του τριτογενούς τομέα, γίνεται με βάση τρία κριτήρια τα οποία διαφοροποιούν την ενεργειακή συμπεριφορά κάθε κτιριακού τύπου από τους υπόλοιπους, κατά

αντιστοιχία με την Ελληνική τυπολογία κτιρίων κατοικιών TABULA [5]. Τα κριτήρια αυτά είναι: η κύρια χρήση του κτιρίου, η ηλικία του και το κλίμα της περιοχής στην οποία βρίσκεται.

Για την ταξινόμηση της χρήσης των κτιρίων ακολουθείται σε γενικές γραμμές η κατηγοριοποίηση που ορίζεται στην Τεχνική Οδηγία 20701-4 [6[. Τα κτίρια του τριτογενούς τομέα διακρίνονται σε συνολικά 60 διαφορετικούς τύπους με βάση την κύρια χρήση τους, οι οποίοι μπορούν να ομαδοποιηθούν σε 30 χρήσεις κτιρίων, ενσωματώνοντας τους διαφορετικούς τύπους που έχουν κοινές παραδοχές και τυπικές τιμές λειτουργίας που χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς. Για παράδειγμα, οι τύποι κτιρίων Νοσοκομείο και Κλινική, ενοποιούνται στην χρήση Νοσοκομείο/Κλινική, έχοντας συνεχή ετήσια λειτουργία (24 ώρες/ημέρα, 365 ημέρες/έτος), εσωτερική θερμοκρασία/υγρασία λειτουργίας 22ºC/35% για την περίοδο θέρμανσης και 26ºC/50% για την περίοδο ψύξης, απαιτήσεις για νωπό αέρα 0,5 $m^3/hr/m^2$ θερμαινόμενης επιφάνειας, ημερήσια κατανάλωση ζεστού νερού χρήσης (ZNX) μεταξύ 22,0–43,9 m^3/κλίνη, ετήσιο αριθμό ωρών τεχνητού φωτισμού 7571 ώρες/έτος, εσωτερικά θερμικά κέρδη από άτομα/συσκευές 27,0/7,5 W/m^2 θερμαινόμενης επιφάνειας (τα εσωτερικά θερμικά κέρδη από τον φωτισμό υπολογίζονται με βάση την εγκατεστημένη ισχύ).

Η ηλικία καθορίζει τον τύπο του κτιριακού κελύφους, τον αντίστοιχο βαθμό θερμομόνωσής του ακόμα και, σε ένα μεγάλο βαθμό, το είδος των Η/Μ εγκαταστάσεών του. Λαμβάνονται υπόψη δυο ημερομηνίες ορόσημα για την περίοδο κατασκευής του κτιρίου και συγκεκριμένα το 1980, έτος έναρξης της εφαρμογής του προγενέστερου Κανονισμού Θερμομόνωσης Κτιρίων (ΚΘΚ) και το 2011, έτος έναρξης της εφαρμογής του Κανονισμού Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων (ΚΕΝΑΚ). Με αυτόν τον τρόπο δημιουργούνται τρεις περίοδοι κατασκευής. Τα κτίρια της πρώτης περιόδου (Τ1: μέχρι το 1980) περιλαμβάνουν τα παλιά κτίρια, τα οποία θεωρούνται στην πλειοψηφία τους αμόνωτα, παρότι είναι και η κατηγορία κτιρίων που έχουν υποστεί πολλές ανακαινίσεις. Τα κτίρια της δεύτερης περιόδου (Τ2: μεταξύ 1981-2010) θεωρούνται μερικώς θερμομονωμένα. Παρά το γεγονός ότι ο ΚΘΚ τέθηκε σε εφαρμογή από το 1980, η ενσωμάτωση θερμομόνωσης υπήρξε πλημμελής κατά την πρώτη δεκαετία (1980-1990) εφαρμογής. Τέλος τα κτίρια της τρίτης περιόδου (Τ3: μετά το 2010) περιλαμβάνουν τα νέα κτίρια, τα οποία θεωρούνται ότι είναι θερμομονωμένα κατά ΚΕΝΑΚ.

Σύμφωνα με τον κανονισμό, η Ελλάδα χωρίζεται σε τέσσερις κλιματικές ζώνες, με βάση τις βαθμοημέρες θέρμανσης (ΒΗΘ). Η κατανομή των κλιματικών ζωνών κυμαίνεται από την νότια Ζώνη Α με τις πιο ήπιες κλιματικές συνθήκες (859 ΒΗΘ), τις ενδιάμεσες Ζώνες Β (1164 ΒΗΘ) και Γ (1825 ΒΗΘ) μέχρι τη βόρεια και πιο κρύα Ζώνη Δ (2260 ΒΗΘ).

Συνεπώς, η ελληνική τυπολογία περιλαμβάνει συνολικά 372 τύπους. Η τιμή αυτή προκύπτει από τον συνδυασμό των παραμέτρων ταξινόμησης, δηλαδή: 31 χρήσεις κτιρίων Χ 3 περίοδοι κατασκευής Χ 4 κλιματικές ζώνες.

1.2. Ποιοτικός έλεγχος δεδομένων

Ο βασικός ποιοτικός έλεγχος των διαθέσιμων στοιχείων πραγματοποιείται σε δυο επίπεδα. Στο πρώτο επίπεδο εντοπίζονται τα λανθασμένα ή ασαφή δεδομένα, ενώ στο δεύτερο επίπεδο αποκλείονται οι ακραίες τιμές.

Στον έλεγχο πρώτου επιπέδου, τα αρχεία των ενεργειακών επιθεωρήσεων αποκλείονται στην περίπτωση που περιέχουν δεδομένα:

- Ημιτελή ή εμφανώς λανθασμένα (π.χ. αρνητικές τιμές, λόγος θερμαινόμενου όγκου προς θερμαινόμενη επιφάνεια μικρότερος από 2m, θερμαινόμενη επιφάνεια μεγαλύτερη από συνολική)
- Μη συμβατά με τις αντίστοιχες επιτρεπόμενες και προτεινόμενες τιμές όπως αυτές έχουν οριστεί στην Τεχνική Οδηγία 20701-4 [6]. Συγκεκριμένα οι παράμετροι που ελέγχθηκαν για συμβατότητα είναι η διείσδυση αέρα από τα ανοίγματα, ο συντελεστής θερμοπερατότητας εξωτερικού τοίχου/οροφής/πιλοτής/διαφανούς επιφάνειας, ο συντελεστής σκίασης, ο μηχανικός αερισμός, το θεωρητικό σύστημα θέρμανσης και ψύξης, το μέσο μηνιαίο ποσοστό κάλυψης θερμικού και ψυκτικού φορτίου.
- Αμφισβητούμενα ως προς την ορθότητά τους, όπως διείσδυση αέρα μικρότερη από 0,1 αλλαγές αέρα την ώρα (ACH) ή μεγαλύτερη από 10 ACH; λόγος θερμαινόμενου όγκου προς θερμαινόμενη επιφάνεια μικρότερος από 2m; Λόγος συνολικής επιφάνειας προς ανεμιστήρες οροφής μικρότερος από 10 m^2/ανεμιστήρα;

Για τον ποιοτικό έλεγχο δεύτερου επιπέδου τα δεδομένα ομαδοποιούνται ανά τυπολογία κτιρίων, σε τριανταμία χρήσεις κτιρίου, τρεις χρονικές περιόδους κατασκευής και τέσσερις κλιματικές ζώνες. Για τον εντοπισμό οριακών τιμών χρησιμοποιείται η μέθοδος του θηκογράμματος. Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη μέθοδο, υπολογίζεται το ενδοτεταρτημοριακό εύρος του δείγματος (IQR) το οποίο αποτελεί μέτρο της μεταβλητότητας των παρατηρήσεων, σαν η διαφορά μεταξύ του Τρίτου (Q3) και Πρώτου (Q1) τεταρτημόριου του δείγματος. Μια τιμή του δείγματος χαρακτηρίζεται ως «ακραία τιμή» στην περίπτωση που είναι μεγαλύτερη από το ανώτερο εξωτερικό φράγμα (Q3 + 3×(Q3-Q1)) ή μικρότερη από το κατώτερο εξωτερικό φράγμα (Q1 – 3×(Q3-Q1)). Με αυτή τη μέθοδο εντοπίζονται οι ακραίες τιμές για κάθε ένα δεδομένο της ενεργειακής επιθεώρησης ξεχωριστά. Το αρχείο επιθεώρησης αποκλείεται στην περίπτωση που έστω και ένα δεδομένο χαρακτηρίζεται ως ακραία τιμή.

Τα αρχεία ενεργειακών επιθεωρήσεων που χρησιμοποιούνται τελικά είναι περίπου 2445 και αναφέρονται στη συνέχεια ως Βάση Επιθεωρήσεων.

2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΕΠΙΘΕΩΡΗΣΕΩΝ

Τα κτίρια που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση που ακολουθεί κατανέμονται σε συνολικά 239 τυπολογίες. Όπως φαίνεται αναλυτικά στον Πίνακα 1, σε αυτές περιλαμβάνονται 43 τυπολογίες με πληθυσμό από 10 κτίρια και πάνω ανά τυπολογία (πράσινα σκιασμένα κελιά), και 196 τυπολογίες με πληθυσμό κάτω από 10 κτίρια (γκρι γραμμοσκιασμένα κελιά). Τα διαθέσιμα δεδομένα δεν καλύπτουν ακόμη όλους τους δυνατούς συνδυασμούς των τυπολογιών, όπως φαίνεται με τα κενά κελιά του πίνακα.

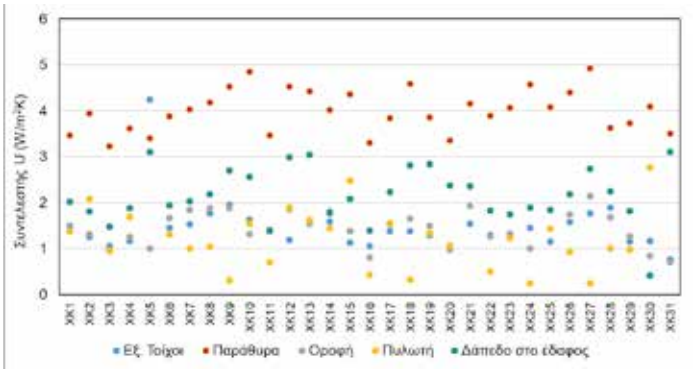
Πίνακας 1: Κατανομή των κτιρίων της Βάσης Επιθεωρήσεων στις τυπολογίες για τις τρεις περιόδους κατασκευής (Τ1-Τ3) και τέσσερεις κλιματικές ζώνες (ΖΑ-ΖΔ)

ΧΡΗΣΗ ΚΤΙΡΙΟΥ (ΧΚ)	ΤΥΠΟΛΟΓΙΕΣ											
	Τ1				Τ2				Τ3			
	ΖΑ	ΖΒ	ΖΓ	ΖΔ	ΖΑ	ΖΒ	ΖΓ	ΖΔ	ΖΑ	ΖΒ	ΖΓ	ΖΔ
1.Ξενοδοχείο ετήσιας λειτουργίας	8	20	4	1	15	17	6	2	3	2	4	
2.Ξενοδοχείο θερινής λειτουργίας	29	24	6		194	35	4		5	3		
3.Ξενώνας ετήσιας λειτουργίας	9	16	2		22	12	4	1	2	4	2	1
4.Ξενώνας θερινής λειτουργίας	20	26	6		93	26	10		2	2	1	
5.Ξενώνας χειμερινής λειτουργίας							1					
6.Οικοτροφείο / Κοιτώνας	1	3	2			2				3		
7.Εστιατόριο	30	49	11	3	29	42	4	4	1	2	3	2
8.Ζαχαροπλαστείο / Καφενείο	23	48	23	6	13	29	10	4	5	2	2	
9.Νυχτερινό κέντρο διασκέδασης/ Μουσική σκηνή	9	5	2		3	3	2	1				
10.Θέατρο / Κινηματογράφος	1	4				3	1					
11.Χώρος εκθέσεων / Μουσείο	1	2	3		3	2	4			1		
12.Χώρος συνεδρίων / Αμφιθέατρο / Δικαστήριο		1			2	1	1					
13.Τράπεζα	2	4	1			5	2	1				
14.Αίθουσα πολλαπλών χρήσεων	4	10	3	2		3	2	1	1	2	1	1
15.Κλειστό γυμναστήριο / Κλειστό κολυμβητήριο	3	4	3		2	2	1	1	1	1	1	
16.Νηπιαγωγείο	4	1	1	1	1		4	1		5	3	1
17.Πρωτοβάθμια / Δευτεροβάθμια εκπαίδευση	5	25	6	2	5	16	22		1	2	4	1
18.Τριτοβάθμια εκπαίδευση/ Αίθουσα διδασκαλίας	2	4	1		1	4	3					
19.Φροντιστήριο/ Ωδείο	3	5	5		3	4	4	1	1		2	
20.Νοσοκομείο/ Κλινική	2	2	3		2	1	2			1		
21.Αγροτικό ιατρείο/ Υγειονομικός σταθμός/ Κέντρο υγείας/ Ιατρείο	3	6	4		3	3	5	2	3	3	1	
22.Ψυχιατρείο/ Ίδρυμα ατόμων με ειδικές ανάγκες/ Ίδρυμα χρονίως πασχόντων/ Οίκος ευγηρίας/ Βρεφοκομείο	1	5	2		2	3	4		1	2	1	
23.Βρεφικός σταθμός/ Παιδικός σταθμός	1	7	2		4	7	3		1	5	1	2
24.Αστυνομική διεύθυνση		2	1			2						
25.Εμπορικό κέντρο/ Υπεραγορά	3	4	3		4	3	4		1		1	
26.Κατάστημα / Φαρμακείο	130	210	78	11	81	177	34	3	1	5	2	1
27.Ινστιτούτο γυμναστικής		2			2	2	1	1				
28.Κουρείο/ Κομμωτήριο	2	3	2		2		1				1	
29.Γραφείο	19	86	11	2	13	122	14	4	4	5	4	1
30.Βιβλιοθήκη		2				4						
31.Ξενοδοχείο χειμερινής λειτουργίας					1							

Το 45% των επιθεωρούμενων κτιρίων είναι παλιά και έχουν κατασκευαστεί πριν από το 1980, το 50% μεταξύ 1981-2010 και μόλις το 5% μετά το 2010. Τα κτίρια βρίσκονται σε 60 διαφορετικές πόλεις της Ελλάδας, καλύπτοντας και τις 4 κλιματικές ζώνες, με το 35% να βρίσκονται στη Ζώνη Α, 47% στη Ζώνη Β, 15% στη Ζώνη Γ και μόλις το 3% στη Ζώνη Δ.

2.1. Χαρακτηριστικά Κελύφους

Από την ανάλυση των μέσων τιμών για τους επιμέρους συντελεστές θερμοπερατότητας για τοίχους, παράθυρα, οροφές, πυλωτές και δάπεδα στο έδαφος ανά χρήση κτιρίου (Εικόνα 1), προκύπτει ότι τα κτίρια δεν έχουν την απαιτούμενη θερμική προστασία. Γενικά οι συντελεστές θερμοπερατότητας για τα παράθυρα έχουν τις υψηλότερες τιμές (κυμαίνονται μεταξύ 3,2 – 4,9 W/m^{2}K) με εξαίρεση το ΧΚ5 (Πίνακας 1) το οποίο όμως περιλαμβάνει μόνο ένα κτίριο και δεν μπορεί να θεωρηθεί αντιπροσωπευτικό. Αντίθετα, οι χαμηλότερες μέσες τιμές αντιστοιχούν στις πυλωτές (κυμαίνονται μεταξύ 0,25 – 2,76W/m^{2}K).

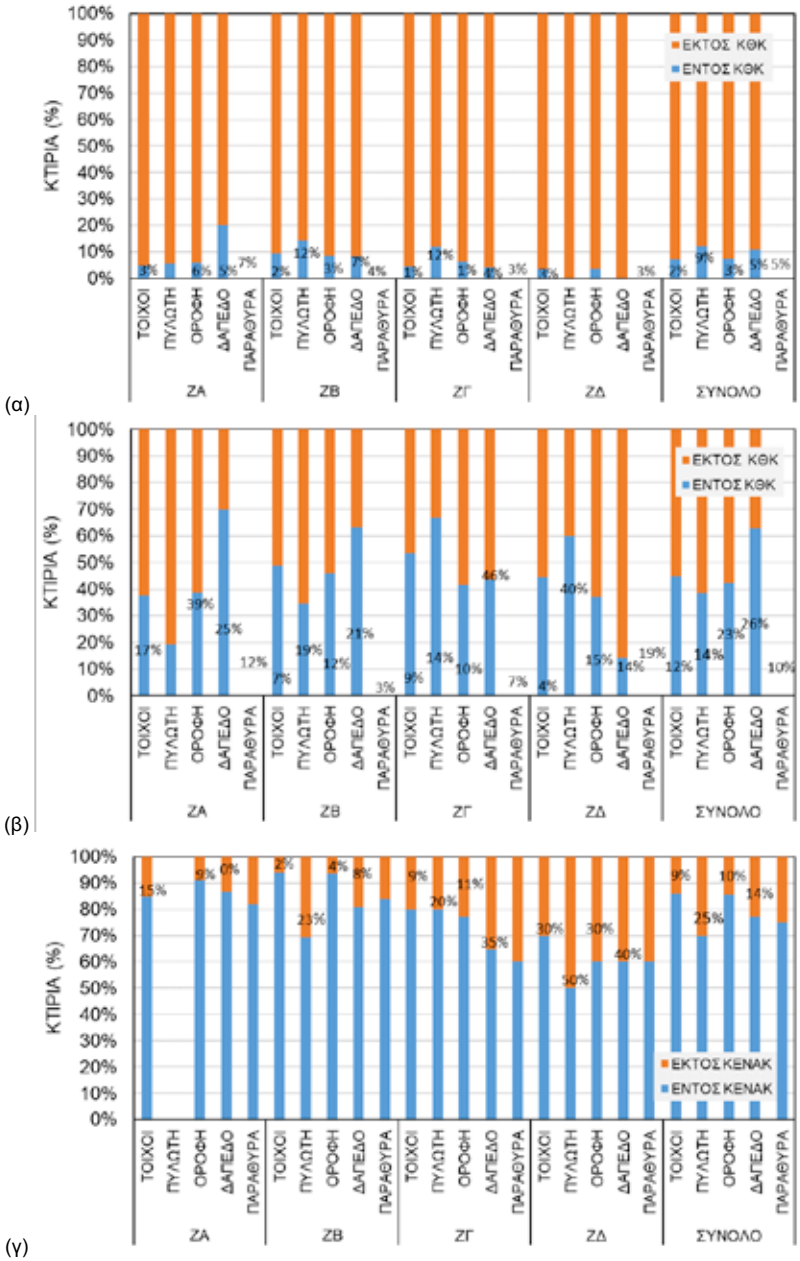


Εικόνα 1. Μέσος συντελεστής θερμοπερατότητας για στοιχεία κελύφους ανά χρήση κτιρίου (ΧΚ1-ΧΚ31).

Στις Εικόνες 2α-γ παρουσιάζεται η συμφωνία των συντελεστών θερμοπερατότητας ανά στοιχείο του κελύφους με τους εκάστοτε ισχύοντες κανονισμούς ανά περίοδο κατασκευής και κλιματική ζώνη. Για τα παλιά κτίρια (περίοδος Τ1) δεν υπήρχαν ανώτερα επιτρεπτά όρια για τους συντελεστές θερμοπερατότητας. Παρόλα αυτά, ένα μικρό ποσοστό κτιρίων είτε είχαν από την κατασκευή τους μόνωση σε κάποιο στοιχείο του κελύφους είτε έχουν κάνει κάποια ανακαίνιση, με μεγαλύτερα ποσοστά στη Ζώνη Β, Ζώνη Α, Ζώνη Γ και λιγότερο στη Ζώνη Δ.

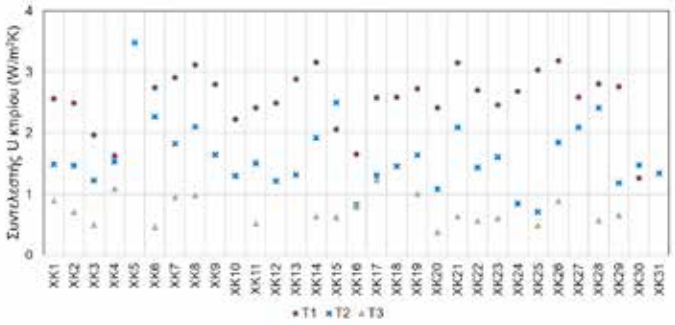
Γενικά τα μεγαλύτερα ποσοστά κτιρίων σύμφωνα με τους κανονισμούς εμφανίζονται στις πυλωτές. Εξαίρεση αποτελεί το δάπεδο σε έδαφος για τη Ζώνη Α, το οποίο όμως πιθανόν να οφείλεται στην αρκετά μεγάλη επιτρεπόμενη τιμή κατά ΚΘΚ για τη ζώνη αυτή (3,0 W/m^{2}K) και για το λόγο αυτό τα ποσοστά για τον συγκεκριμένο συντελεστή είναι πολύ μικρά στις άλλες ζώνες. Στο κάτω τμήμα των Εικόνων 2$^{\alpha}$ και 2β εμφανίζονται τα ποσοστά των κτιρίων που οι συντελεστές τους είναι σύμφωνα με τα ελάχιστα όρια για υφιστάμενα κτίρια κατά ΚΕΝΑΚ, παρά το ότι δεν ήταν σε ισχύ. Για την περίοδο κατασκευής Τ2, αν και ήταν σε ισχύ ο ΚΘΚ γενικά το ποσοστό των κτιρίων σε συμφωνία με τα ελάχιστα όρια του κανονισμού είναι χαμηλό. Κατά μέσο όρο η Ζώνη Γ εμφανίζει τα μεγαλύτερα ποσοστά συμμόρφωσης, ενώ η Ζώνη Δ έχει τα μικρότερα. Για τη Ζώνη Α και Ζώνη Β, η συμμόρφωση του συντελεστή θερμοπερατότητας για το δάπεδο σε έδαφος παρουσιάζει υψηλά ποσοστά, το οποίο όμως πιθανόν να οφείλεται στην αρκετά μεγάλη επιτρεπόμενη τιμή κατά ΚΘΚ για τις ζώνες αυτές (3,0 και 1,9W/m^{2}K, αντίστοιχα).

Αξιοπρόσεκτο είναι ότι ακόμη και τα νέα κτίρια (περίοδος Τ3) δεν είναι πλήρως συμμορφωμένα με τις ελάχιστες απαιτήσεις για το κέλυφος και κυρίως τα κτίρια που βρίσκονται στη Ζώνη Δ. Σε αρκετές περιπτώσεις οι συντελεστές θερμοπερατότητας είναι κάτω και από τα επιτρεπόμενα όρια του ΚΘΚ.



Εικόνα 2. Ποσοστά κτιρίων για τα οποία ο μέσος συντελεστής θερμοπερατότητας ανά στοιχείο κελύφους βρίσκεται σε συμφωνία με τους ισχύοντες κανονισμούς, ανά κλιματική Ζώνη (ΖΑ-ΖΔ) και συνολικά για τα κτίρια της περιόδου κατασκευής Τ1 (α), Τ2 (β) και Τ3 (γ). Στα (α) και (β) εμφανίζονται τα ποσοστά των κτιρίων που οι συντελεστές τους είναι σύμφωνοι με τα ελάχιστα όρια για υφιστάμενα κτίρια κατά ΚΕΝΑΚ, ενώ στο (γ) τα ποσοστά των κτιρίων που οι συντελεστές τους δεν είναι σύμφωνοι ούτε με τα όρια του ΚΘΚ.

Ο σταθμισμένος συντελεστής θερμοπερατότητας κτιρίου (U-κτιρίου) προκύπτει από το άθροισμα του γινομένου του συντελεστή θερμοπερατότητας για τοίχους, παράθυρα, οροφή, πυλωτές και δάπεδα στο έδαφος με τις αντίστοιχες επιφάνειες προς το άθροισμα των επιφανειών. Ο σταθμισμένος συντελεστής θερμοπερατότητας κτιρίου κυμαίνεται μεταξύ 0,22 – 6,00W/m^{2}K, με μέση τιμή 2,10 W/m^{2}K. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3, ο σταθμισμένος συντελεστής θερμοπερατότητας κτιρίου ανά χρήση κτιρίου και περίοδο κατασκευής μειώνεται από την Τ1 προς την Τ3 με εξαίρεση την Τ2 στα Κλειστά γυμναστήρια/ κολυμβητήρια (ΧΚ15) και Βιβλιοθήκες (ΧΚ30), πιθανόν λόγω ανακαίνισης των κτιρίων της Τ1 περιόδου. Η μείωση του σταθμισμένου συντελεστή θερμοπερατότητας κτιρίου για την περίοδο Τ2 κυμαίνεται μεταξύ 6% (ξενώνες θερινής λειτουργίας-ΧΚ4) και 77% (Εμπορικά κέντρα/Υπεραγορές- ΧΚ25). Η ΧΚ4 της περιόδου Τ2 παρουσιάζει μικρές μειώσεις σε όλους τους επιμέρους συντελεστές θερμοπερατότητας (μεταξύ 1% και 16%). Αντίθετα, η ΧΚ25 προβαίνει σε πιο συχνές ανακαινίσεις και οι μειώσεις σε όλους τους επιμέρους συντελεστές θερμοπερατότητας κυμαίνονται (μεταξύ 40% και 125%). Η διακύμανση του συντελεστή θερμοπερατότητας κτιρίου ανά χρήση κτιρίου και ανά κλιματική ζώνη δεν παρουσιάζει κάποια συγκεκριμένη τάση.



Εικόνα 3. Μέσος σταθμισμένος συντελεστής θερμοπερατότητας κτιρίου ανά χρήση κτιρίου (ΧΚ1-ΧΚ31) και περίοδο κατασκευής (Τ1-Τ3).

2.2. Χαρακτηριστικά Η/Μ Συστημάτων

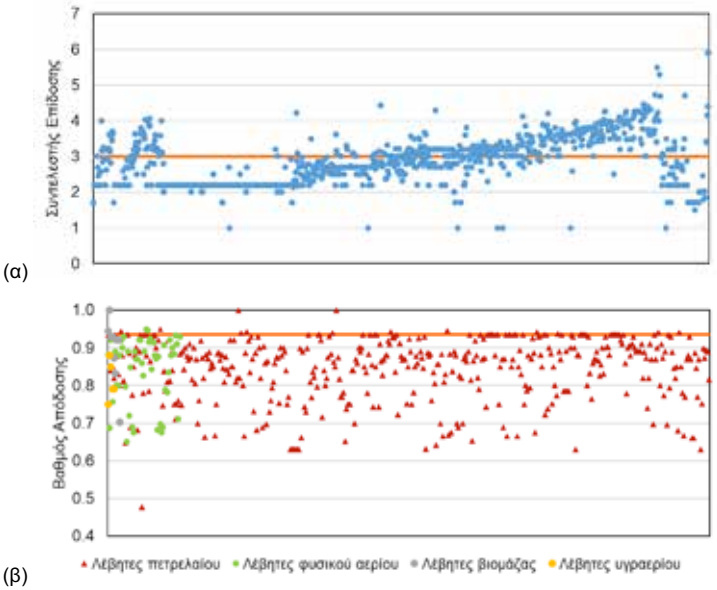
2.2.1. Σύστημα θέρμανσης

Το 35% των κτιρίων που επιθεωρήθηκαν δεν είχαν κανένα σύστημα θέρμανσης στο 100% της επιφάνειάς τους (5% των κτιρίων ανήκουν στα ξενοδοχεία και στους ξενώνες θερινής λειτουργίας), ενώ το 3% είναι μερικώς θερμαινόμενα στο 2%-96% της επιφάνειάς τους. Οι χρήσεις κτιρίων με τα υψηλότερα ποσοστά μη θερμαινόμενων κτιρίων είναι τα καταστήματα και τα εστιατόρια με ποσοστό 54% και 10% αντίστοιχα.

Το πιο κοινό βασικό σύστημα θέρμανσης στα κτίρια του τριτογενούς τομέα είναι οι αντλίες θερμότητας (κεντρικές ή τοπικές) στο 67% των κτιρίων και ακολουθούν οι λέβητες με 31%. Οι αντλίες θερμότητας χρησιμοποιούνται πιο συχνά σε Ξενοδοχεία θερινής λειτουργίας (79%), Τράπεζες (67%) και Εμπορικά κέντρα/Υπεραγορές (65%), ενώ πιο σπάνια σε σχολεία και νηπιαγωγεία. Ο συντελεστής επίδοσης των αντλιών θερμότητας (COP) κυμαίνεται μεταξύ 1,0 – 5,9, με μέση τιμή 2,9, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4α. Περίπου το 40% των κτιρίων έχουν εγκατεστημένες αντλίες θερμότητας με συντελεστή επίδοσης μεγαλύτερο από 3,0 (τυπική τιμή για συστήματα που έχουν εγκατασταθεί μετά το 2001, σύμφωνα με την σχετική τεχνική οδηγία).

Οι λέβητες σαν βασικό σύστημα θέρμανσης χρησιμοποιούνται πιο συχνά σε Σχολεία Πρωτοβάθμιας και Δευτεροβάθμιας εκπαίδευσης (93%), Αστυνομικές διευθύνσεις (80%) και Νηπιαγωγεία (78%), ενώ πιο σπάνια σε ξενοδοχεία και ξενώνες θερινής λειτουργίας και Εμπορικά κέντρα/Υπεραγορές (4%). Η συντριπτική πλειοψηφία των κτιρίων (87%) χρησιμοποιεί πετρέλαιο, το 10% φυσικό αέριο, το 2% υγραέριο και μόλις 1% βιομάζα. Στα κτίρια στα οποία υπάρχει σύστημα θέρμανσης, ο βαθμός απόδοσης της μονάδας λέβητα-καυστήρα κυμαίνεται μεταξύ 47,0% – 100,0%, με μέση τιμή 85,0%. Οι λέβητες πετρελαίου παρουσιάζουν τις μικρότερες τιμές μέσου βαθμού απόδοσης, ίσως επειδή είναι και παλαιότεροι σε πολλές περιπτώσεις. Γενικά οι βαθμοί απόδοσης των μονάδων λέβητα-καυστήρα είναι χαμηλοί. Ο μέσος βαθμός απόδοσης είναι μεγαλύτερος από τον βαθμό απόδοσης του κτιρίου

αναφοράς (93,5%) στο 22% των κτιρίων με υγραέριο, στο 13% των κτιρίων με πετρέλαιο και στο 4% των κτιρίων με φυσικό αέριο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4β. Όλα τα κτίρια με βιομάζα έχουν μέσο βαθμό απόδοσης μικρότερο από 93,5%.

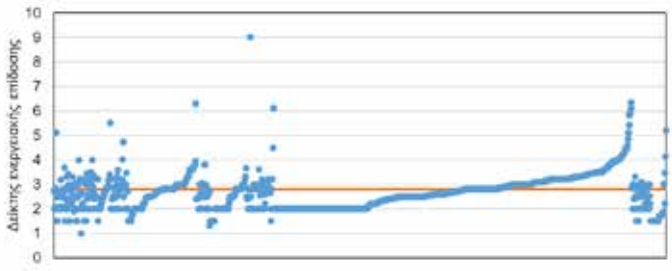


Εικόνα 4. Συντελεστής επίδοσης των αντλιών θερμότητας (α) και βαθμός απόδοσης των συστημάτων λέβητα-καυστήρα (β) για θέρμανση χώρων, με τις αντίστοιχες τιμές κτιρίου αναφοράς (γραμμές).

2.2.2. Σύστημα ψύξης

Το 39% των κτιρίων που επιθεωρήθηκαν δεν είχαν κανένα σύστημα ψύξης. Συγκεκριμένα τα Σχολεία Πρωτοβάθμιας και Δευτεροβάθμιας εκπαίδευσης και τα Νηπιαγωγεία παρουσιάζουν τα υψηλότερα ποσοστά κτιρίων χωρίς καθένα σύστημα ψύξης (65%), λόγω και της λειτουργίας τους κυρίως τους χειμερινούς μήνες. Περίπου το 4% των κτιρίων έχουν σύστημα ψύξης σε ένα τμήμα της επιφάνειάς τους, που κυμαίνεται μεταξύ 7%-98%.

Η συντριπτική πλειοψηφία των κτιρίων χρησιμοποιούν ψύκτες ή αντλίες θερμότητας (κεντρικές ή τοπικές) με χρήση ηλεκτρικής ενέργειας. Μόνο 0,2% των επιθεωρούμενων κτιρίων χρησιμοποιούν μονάδα παραγωγής άλλου τύπου. Στα κτίρια στα οποία υπάρχει σύστημα ψύξης, ο δείκτης ενεργειακής επίδοσης (EER) κυμαίνεται μεταξύ 1,0-9,0, με μέση τιμή 2,7, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5. Περίπου το 46% των κτιρίων έχουν εγκατεστημένα συστήματα ψύξης με συντελεστή επίδοσης μεγαλύτερο από 2,8 (τυπική τιμή κτιρίου αναφοράς).



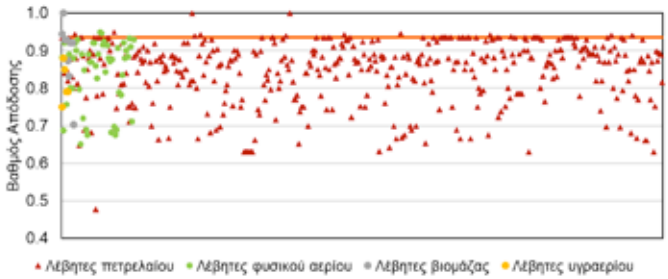
Εικόνα 5. Δείκτης ενεργειακής επίδοσης των ψυκτών και αντλιών θερμότητας για ψύξη χώρων και τυπική τιμή κτιρίου αναφοράς (γραμμή)

Μόνο το 2% των επιθεωρούμενων κτιρίων έχουν υβριδικά συστήματα ψύξης όπως οι ανεμιστήρες οροφής, οι οποίοι επεκτείνουν την ζώνη θερμικής άνεσης από τους 26ºC μέχρι και στους 29ºC, καλύπτοντας το 1-62% της θερμαινόμενης επιφάνειάς τους. Το ποσοστό των κτιρίων με ανεμιστήρες οροφής δεν διαφοροποιείται μεταξύ κτιρίων χωρίς κανένα σύστημα ψύξης και κτιρίων με σύστημα ψύξης.

2.2.3. Σύστημα παραγωγής Ζεστού Νερού Χρήσης (ΖΝΧ)

Από τις 31 χρήσεις κτιρίων σχεδόν στα μισά από αυτά το ΖΝΧ δεν λαμβάνεται υπόψη σύμφωνα με τον εθνικό κανονισμό. Γενικά τα επιθεωρούμενα κτίρια που σύμφωνα με τον ΚΕΝΑΚ έχουν απαίτηση για ΖΝΧ είναι στην πλειοψηφία τους εξοπλισμένα με συστήματα παραγωγής ΖΝΧ κεντρικά ή τοπικά. Μόνο το 3% των κτιρίων δεν είχαν κάποιο σύστημα. Το πιο συνηθισμένο βασικό σύστημα θέρμανσης στα κτίρια του τριτογενούς τομέα είναι οι ηλεκτρικοί θερμοσίφωνες στο 61% των κτιρίων και ακολουθούν οι λέβητες (κεντρικοί ή τοπικοί) με 29%. Τα κτίρια που χρησιμοποιούν ηλεκτρικούς θερμοσίφωνες σε μεγαλύτερα ποσοστά είναι τα κτίρια συνάθροισης κοινού (π.χ. ΧΚ-7, ΧΚ-8, ΧΚ-9 στον Πίνακα 1).

Οι κεντρικοί λέβητες σαν βασικό σύστημα θέρμανσης χρησιμοποιούνται πιο συχνά σε κτίρια υγείας και κοινωνικής πρόνοιας (π.χ. Νοσοκομεία/Κλινικές (ΧΚ-20, ΧΚ-22 στον Πίνακα 1). Τα περισσότερα κτίρια (74%) χρησιμοποιούν πετρέλαιο, 20% υγραέριο, 5% φυσικό αέριο και μόλις 1% βιομάζα. Ο βαθμός απόδοσης της μονάδας λέβητα-καυστήρα κυμαίνεται μεταξύ 60,0% και 100,0%, με μέση τιμή 80,0%. Οι λέβητες φυσικού αερίου παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες τιμές του βαθμού απόδοσης, αφού είναι σχετικά πιο καινούριες μονάδες και για λόγους ασφαλείας υπόκεινται σε συστηματικότερη συντήρηση. Γενικά οι βαθμοί απόδοσης των μονάδων λέβητα-καυστήρα είναι χαμηλοί. Ο μέσος βαθμός απόδοσης είναι μεγαλύτερος από τον βαθμό απόδοσης του κτιρίου αναφοράς (93,5%) στο 13% των κτιρίων με φυσικό αέριο, και στο 3% των κτιρίων με πετρέλαιο και υγραέριο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6. Όλα τα κτίρια με βιομάζα έχουν μέσο βαθμό απόδοσης μικρότερο από 93,5%.

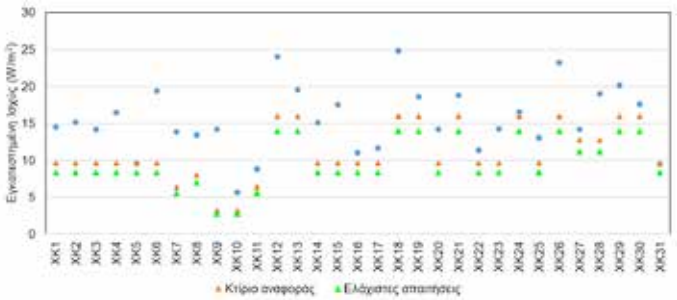


Εικόνα 6. Βαθμός απόδοσης των συστημάτων λέβητα-καυστήρα για παραγωγή ΖΝΧ και βαθμός απόδοσης του κτιρίου αναφοράς

2.2.4. Σύστημα φωτισμού

Η εγκατεστημένη ισχύς για φωτισμό στα επιθεωρούμενα κτίρια κυμαίνεται μεταξύ 0,9 W/m^2 και 158,1 W/m^2, με μέση τιμή 18,0 W/m^2. Οι χρήσεις κτιρίου με τις χαμηλότερες μέσες τιμές εγκατεστημένης ισχύος (<10,0 W/m^2), είναι τα Θέατρα/Κινηματογράφοι (ΧΚ-10), Χώροι εκθέσεων (ΧΚ-11) και (ΧΚ-5) ενώ τα κτίρια Τριτοβάθμια εκπαίδευση (ΧΚ-18), Χώροι συνεδρίων (ΧΚ-12), Καταστήματα (ΧΚ-26) και Γραφεία (ΧΚ-29) με τις μεγαλύτερες (>20,0 W/m^2). Σε όλες τις περιπτώσεις η εγκατεστημένη ισχύς είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του κτιρίου αναφοράς και των ελάχιστων απαιτήσεων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.

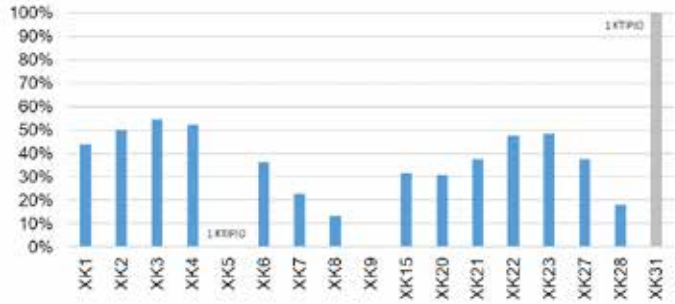
Με την πάροδο του χρόνου, παρατηρείται μείωση στην εγκατεστημένη ισχύ λόγω της χρήσης ενεργειακών λαμπτήρων και νέας τεχνολογίας συστημάτων φωτισμού. Η μέση τιμή της εγκατεστημένης ισχύος είναι 19,2 W/m^2 για παλιά κτίρια (μέχρι το 1980), 17,6 W/m^2 για κτίρια από το 1981 μέχρι το 2010 και 10,6 W/m^2 για τα νέα κτίρια μετά το 2010.



Εικόνα 7. Μέση εγκατεστημένη ισχύς φωτισμού, εγκατεστημένη ισχύς φωτισμού για το κτίριο αναφοράς και ελάχιστες απαιτήσεις εγκατεστημένης ισχύος ανά χρήση κτιρίου

2.2.5. Ηλιακοί συλλέκτες και φωτοβολταϊκά συστήματα

Το 38% των επιθεωρούμενων κτιρίων που έχουν απαίτηση για ΖΝΧ έχουν εγκατεστημένους ηλιακούς συλλέκτες κυρίως για ζεστό νερό χρήσης. Στο 1% των κτιρίων οι ηλιακοί συλλέκτες συνεισφέρουν και στην θέρμανση, ενώ σε δυο κτίρια οι ηλιακοί συλλέκτες συνεισφέρουν μόνο στη θέρμανση. Τα κτίρια στα οποία παρατηρείται μεγαλύτερη διείσδυση των ηλιακών συλλεκτών είναι τα κτίρια προσωρινής διαμονής και υγείας και κοινωνικής πρόνοιας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 8. Η επιφάνεια των εγκατεστημένων ηλιακών συλλεκτών κυμαίνεται μεταξύ 1m^2 – 300 m^2, που για μια μέση εγκατάσταση αντιστοιχεί σε 0,03 m^2 συλλεκτών ανά μονάδα θερμαινόμενης επιφάνειας του κτιρίου. Ο μέσος συντελεστής αξιοποίησης ηλιακής ακτινοβολίας είναι 0,33 για ΖΝΧ και 0,25 για θέρμανση χώρων.



Εικόνα 8. Ποσοστό κτιρίων με ηλιακούς συλλέκτες ανά χρήση κτιρίου που έχει απαίτηση για ΖΝΧ

Η διείσδυση των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι πολύ μικρή στα κτίρια του τριτογενούς τομέα. Μόλις 0,5% των κτιρίων έχουν φωτοβολταϊκά με επιφάνεια που κυμαίνεται από 2 m^2 μέχρι 700 m^2 που για μια μέση εγκατάσταση αντιστοιχεί σε 0,09 m^2 φωτοβολταϊκών ανά μονάδα θερμαινόμενης επιφάνειας του κτιρίου. Ο μέσος συντελεστής αξιοποίησης ηλιακής ακτινοβολίας είναι 0,15 (μεταξύ 0,10 – 0,29).

3. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία εστιάζει στα κτίρια του τριτογενούς τομέα σε μια προσπάθεια καθορισμού αντιπροσωπευτικής τυπολογίας, αναλύοντας πρωτογενή δεδομένα από τις ενεργειακές επιθεωρήσεις κτιρίων που υποβάλλονται στην επίσημη πλατφόρμα buildingcert για την έκδοση Πιστοποιητικών Ενεργειακής Απόδοσης. Μετά τον ποιοτικό έλεγχο των διαθέσιμων στοιχείων ώστε να εξασφαλιστεί η εγκυρότητα των συμπερασμάτων, στην ανάλυση χρησιμοποιούνται δεδομένα από περίπου 2.400 ενεργειακές επιθεωρήσεις ολόκληρων κτιρίων τριτογενούς τομέα.

Τα κτίρια των ενεργειακών επιθεωρήσεων ομαδοποιούνται σε διαφορετικές χρήσεις κτιρίων, περιόδους κατασκευής και κλιματικές ζώνες. Προς το παρόν, τα διαθέσιμα δεδομένα καλύπτουν 239 τύπους από τους συνολικά 372 τύπους της τυπολογίας. Για κάθε τύπο τα δεδομένα των ενεργειακών επιθεωρήσεων αναλύονται για τον καθορισμό τυπικών χαρακτηριστικών του κελύφους και των Η/Μ συστημάτων.

Όπως είναι αναμενόμενο η πλειοψηφία των κτιρίων του δείγματος είναι παλιά, κατασκευασμένα πριν από το 2010 και η θερμική τους προστασία είναι από ελλιπής μέχρι ανύπαρκτη. Το ποσοστό των κτιρίων για τα οποία τα στοιχεία του κελύφους είναι εκτός ελαχίστων ορίων του ΚΘΚ κυμαίνεται από 60% για τα δάπεδα μέχρι και 90% για τα παράθυρα. Οι μέσοι επιμέρους συντελεστές θερμοπερατότητας ανά στοιχείο κελύφους γενικά μειώνονται ανά χρονική περίοδο κατασκευής. Οι συντελεστές θερμοπερατότητας για παράθυρα παρουσιάζουν το μικρότερο ποσοστό μείωσης (10% για την Τ2 και 44% για την Τ3). Το μεγαλύτερο ποσοστό μείωσης για την Τ2 παρουσιάζουν οι συντελεστές θερμοπερατότητας για τις οροφές και τις πυλωτές (49%), ενώ για την Τ3 οι συντελεστές για τις οροφές (79%).

Από την ανάλυση των δεδομένων για τα συστήματα θέρμανσης και ψύξης, προκύπτει ότι μόνο το 51% των κτιρίων θερμαίνουν και ψύχουν πλήρως την ωφέλιμη επιφάνειά τους σύμφωνα με τις απαιτήσεις του ΚΕΝΑΚ. Ένα μεγάλο ποσοστό (30%) δεν έχει κανένα βασικό σύστημα θέρμανσης και ψύξης. Οι αντλίες θερμότητας είναι το βασικό σύστημα θέρμανσης στο 67% των κτιρίων του τριτογενούς τομέα και ακολουθούν οι λέβητες στο 31%. Γενικά τα συστήματα θέρμανσης και ψύξης των κτιρίων έχουν χαμηλή απόδοση. Περίπου το 40% των κτιρίων έχουν εγκατεστημένες αντλίες θερμότητας με συντελεστή επίδοσης μεγαλύτερο από την τυπική τιμή σύμφωνα με την τεχνική οδηγία για συστήματα που έχουν εγκατασταθεί μετά το 2001, ενώ μόνο στο 3% των κτιρίων ο βαθμός απόδοσης του λέβητα-καυστήρα είναι μεγαλύτερος από τον βαθμό απόδοσης του κτιρίου αναφοράς. Αντίστοιχα για τα συστήματα ψύξης, περίπου το 46% των κτιρίων έχουν συντελεστή επίδοσης μεγαλύτερο από την τυπική τιμή κτιρίου αναφοράς. Η διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι σε χαμηλά επίπεδα, καθώς μόλις το 0,5% των κτιρίων έχουν εγκατεστημένα φωτοβολταϊκά, ενώ οι ηλιακοί συλλέκτες είναι πιο συχνοί και βρίσκονται περίπου στο 40% των κτιρίων που έχουν απαίτηση για ΖΝΧ κατά ΚΕΝΑΚ.

Η συγκεκριμένη εργασία αποτελεί μια πρώτη προσπάθεια για την χαρτογράφηση των ενεργειακών χαρακτηριστικών των κτιρίων του τριτογενούς τομέα, για τα οποία υπάρχουν λιγότερες και πιο γενικές πληροφορίες σε σχέση με τα κτίρια κατοικιών. Προς το παρόν τα δεδομένα από τις ενεργειακές επιθεωρήσεις δεν επαρκούν για τον καθορισμό των τυπικών χαρακτηριστικών όλων των τύπων της τυπολογίας. Καθώς θα αυξάνεται ο αριθμός των ενεργειακών επιθεωρήσεων, θα είναι δυνατή η πληρέστερη αποτύπωση του τριτογενούς κτιριακού τομέα και με μεγαλύτερη ακρίβεια καθορισμός των χαρακτηριστικών της αντιπροσωπευτικής τυπολογίας. Η αναλυτική αποτύπωση των χαρακτηριστικών των κτιρίων, τα οποία έχουν σημαντική επίδραση στην ενεργειακή τους συμπεριφορά είναι καθοριστικής σημασίας για τον καλύτερο σχεδιασμό και ιεράρχηση των επεμβάσεων ενεργειακής αναβάθμισης του κτιριακού αποθέματος.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Μέρος της έρευνας έγινε στα πλαίσια του έργου "ΘΕΣΠΙΑ 2" (Θεμελίωση Συνεργιστικών και ολοκληρωμένων μεθοδολογιών και εργαλείων παρακολούθησης, διαχείρισης και πρόγνωσης Περιβαλλοντικών παραμέτρων και πιέσεων»), που εντάσσεται στη «Δράση Στρατηγικής Ανάπτυξης Ερευνητικών και Τεχνολογικών Φορέων» και χρηματοδοτείται από το Επιχειρησιακό Πρόγραμμα «Ανταγωνιστικότητα, Επιχειρηματικότητα και Καινοτομία» στο πλαίσιο του ΕΣΠΑ 2014-2020, με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Ευρωπαϊκό Ταμείο Περιφερειακής Ανάπτυξης).

Η επίσημη βάση δεδομένων για το μητρώο των πιστοποιητικών ενεργειακή απόδοσης (www.buildingcert.gr) αναπτύχθηκε και συντηρείται από το Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας ΥΠΕΝ σε συνεργασία με το Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ). Οι συγγραφείς ευχαριστούν το ΥΠΕΝ για την άδεια πρόσβασης στα ΠΕΑ. Η χρήση των δεδομένων και μέρος της εργασίας αυτής πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής της Κ.Γ. Δρούτσα στο Εργαστήριο Φυσικής της Ατμόσφαιρας του Τμήματος Φυσικής στο Πανεπιστήμιο Πατρών. Η ανάλυση που πραγματοποίησαν οι συγγραφείς και τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην εργασία δεν απηχούν κατ' ανάγκη την επίσημη γνώμη του Υπουργείου. Οι συγγραφείς κατέβαλαν κάθε δυνατή προσπάθεια για την προετοιμασία της εργασίας προς όφελος του κοινού με τις διαθέσιμες πληροφορίες.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] EU Building Stock Observatory, https://ec.europa.eu/energy/eu-buildings-datamapper_en

[2] ΕΛΣΤΑΤ 2015. Απογραφή Κτιρίων 2011. www.statistics.gr/census-buildings-2011

[3] K.G. Droutsa, C.A. Balaras, S. Lykoudis, S. Kontoyiannidis, E,G. Dascalaki, A.A. Argiriou, (2020), Baselines for Energy Use & Carbon Emission Intensities in Hellenic Non-Residential Buildings, Energies, 13(8), 1-29, 10.3390/en13082100

[4] Έκθεση μακροπρόθεσμης στρατηγικής για την κινητοποίηση επενδύσεων για την ανακαίνιση και μετατροπή του εθνικού κτιριακού αποθέματος, αποτελούμενου από κατοικίες και εμπορικά κτίρια, δημόσια και ιδιωτικά, σε υψηλής ενεργειακής απόδοσης, απαλλαγμένο από ανθρακούχες εκπομπές έως το 2050 (Άρθρο 2Α ν. 4122/2013), Δεκέμβριος 2020.

[5] Dascalaki EG, Droutsa KG, Balaras CA, Kontoyiannidis S. Building typologies as a tool for assessing the energy performance of residential buildings.A case study for the Hellenic building stock. Energy and Buildings. 2011; 43: 3400-3409. http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.002.

[6] Υπουργική Απόφαση Αριθμ. ΔΕΠΕΑ/οικ. 182365/2017, Έγκριση και εφαρμογή των Τεχνικών Οδηγιών του Τεχνικού Επιμελητηρίου της Ελλάδας για την Ενεργειακή Απόδοση Κτιρίων, ΦΕΚ 4003/Β/17-11-2017.

ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΠΗΓΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΛΥΨΗ ΑΝΑΓΚΩΝ ΖΕΣΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΧΡΗΣΗΣ ΣΕ ΚΤΗΡΙΑΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ

Βασίλειος Κίλης[1*], Γεώργιος Πανάρας[1], Νικόλαος Πλόσκας[2]

[1] Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, ΠΔΜ,
[2] Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών, Πολυτεχνική Σχολή, ΠΔΜ
e-mail: mpl00012@uowm.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η περιβαλλοντική επιβάρυνση του πλανήτη σε συνδυασμό με τη μείωση των αποθεμάτων ορυκτών καυσίμων έχει οδηγήσει στη λήψη δραστικών αποφάσεων σχετικά με τη μείωση της συμβατικής ενέργειας που καταναλώνεται στα κτήρια, συμπεριλαμβάνοντας στις απαιτούμενες δράσεις την αύξηση διείσδυσης συστημάτων Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ). Η παρούσα εργασία πραγματεύεται τη βελτιστοποίηση σχεδιασμού ενεργειακού συστήματος, όπου περιλαμβάνονται πολλές πηγές ενέργειας, με στόχο την κάλυψη των αναγκών ζεστού νερού οικιακής χρήσης. Ειδικότερα, διατυπώνονται μαθηματικά μοντέλα ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού και διερευνώνται οι βέλτιστες λύσεις σε οικονομικό, ενεργειακό και περιβαλλοντικό επίπεδο, αναφορικά με τον βαθμό συμμετοχής έκαστου ενεργειακού συστήματος. Σχετικά με τα μοντέλα, δομούνται απλές προσεγγίσεις γραμμικών αντικειμενικών συναρτήσεων, πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων με ή χωρίς συντελεστές βαρύτητας και μοντέλα που βασίζονται στον προγραμματισμό στόχων. Η μοντελοποίηση των προβλημάτων πραγματοποιείται με το λογισμικό GAMS και η επίλυση τους με τον λύτη CPLEX.

Η εφαρμογή των μοντέλων γίνεται σε περίπτωση κτηρίου χρήσης κατοικίας, επιφάνειας 200m^2, τοποθετούμενου στην κλιματική ζώνη Α και Δ. Για την κάλυψη των φορτίων επιλέγονται τόσο συμβατικά συστήματα όσο και συστήματα ΑΠΕ (ηλιακό θερμικό σύστημα και λέβητας βιομάζας). Το χρονικό βήμα της ανάλυσης είναι μία ώρα για ετήσια λειτουργία. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, στην περίπτωση του ενεργειακού κριτηρίου κυριαρχεί η βιομάζα (ή η Α/Θ όταν η βιομάζα δε συμπεριλαμβάνεται), με αύξηση συμμετοχής των ηλιακών συλλεκτών όταν εισάγεται και ο παράγοντας του περιβαλλοντικού κριτηρίου. Η συμμετοχή των ΑΠΕ (ηλιακό σύστημα) ενισχύεται και στην περίπτωση του προγραμματισμού στόχων λόγω της δυνατότητας αποκλίσεων από τους προκαθορισμένους στόχους.

Η ανάλυση κατέδειξε ότι τα υφιστάμενα μεθοδολογικά εργαλεία ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού μπορούν να αξιοποιηθούν στην κατεύθυνση διερεύνησης προβλημάτων πολλαπλών ενεργειακών συστημάτων ή σύγκρισης των υποσυστημάτων. Η διερεύνηση μπορεί να επεκταθεί σε διαφορετικούς τύπους ενεργειακών συστημάτων, ή κτηρίων για το σύνολο των κλιματικών ζωνών, αλλά και σε διαφορετικές χρήσεις, όπως η θέρμανση και η ψύξη των χώρων. Τέλος, η μείωση του χρονικού βήματος ανάλυσης, μπορεί να οδηγήσει στην αξιοποίηση της προτεινόμενης μεθοδολογίας και των ευρημάτων σε προβλήματα ανάπτυξης αλγορίθμων βέλτιστου ελέγχου ενεργειακών συστημάτων.

Λέξεις Κλειδιά: *βελτιστοποίηση, διατάξεις πολλαπλών ενεργειακών συστημάτων, ακέραιος γραμμικός προγραμματισμός, ζεστό νερό οικιακής χρήσης, ΑΠΕ*.

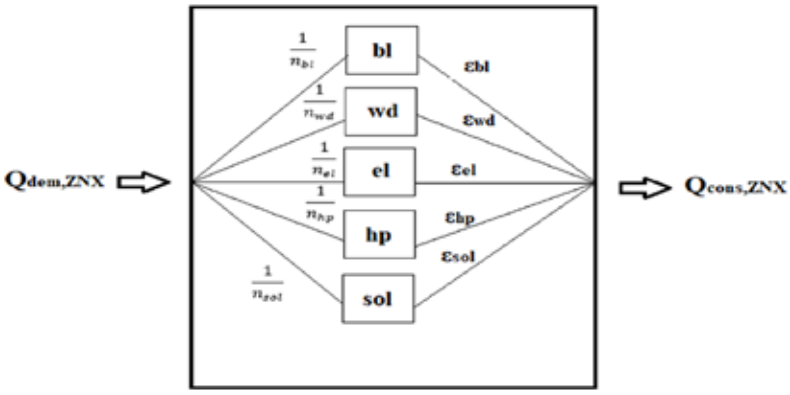
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ένα από τα πιο σημαντικά ζητήματα για την παγκόσμια κοινότητα, ειδικά τα τελευταία 20 χρόνια, είναι η αύξηση της κατανάλωσης της ενέργειας λόγω του μεγάλου πληθυσμού και της οικονομικής ανάπτυξης. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ-28), σύμφωνα με τα ετήσια ενεργειακά στοιχεία του 2018, τα κτήρια αντιπροσωπεύουν περίπου το 41% της συνολικής τελικής ενέργειας κατανάλωσης. Η ΕΕ δείχνει ιδιαίτερη μέριμνα στον περιορισμό της ενεργειακής κατανάλωσης κτηρίων με σημαντικότερη νομοθετική πρωτοβουλία την Οδηγία για την Ενεργειακή Αποδοτικότητα Κτηρίων [1] και την επικαιροποίηση αυτής [2]. Επίσης, η ΕΕ έχει θέσει φιλόδοξους στόχους για τη μείωση της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας που βασίζεται στην ορυκτή καύσιμη ύλη και κατ' επέκταση των συνεπακόλουθων εκπομπών CO_2 στην ατμόσφαιρα. Έτσι, όλα τα νέα κτήρια πρέπει να είναι σχεδόν μηδενικών ενεργειακών προδιαγραφών (near Zero Energy Building, nZEB) έως τις 31 Δεκεμβρίου 2020. Οι στόχοι για το 2030 είναι αρχικά μια μείωση τουλάχιστον κατά 40% των αερίων του θερμοκηπίου συγκριτικά με τα επίπεδα του 1990, η παραχώρηση μεριδίου τουλάχιστον 32% για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και τουλάχιστον 32,5% βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των χρησιμοποιούμενων συστημάτων [6].

Η κάλυψη των αναγκών σε ζεστό νερό χρήσης για τις οικιακές εγκαταστάσεις αποτελεί έναν βασικό παράγοντα στις συνολικές ενεργειακές καταναλώσεις ενός κτηρίου. Αυτό αποδεικνύεται από στατιστικά δεδομένα, όπου διαπιστώνεται πως η κατανάλωση για τη θέρμανση του νερού χρήσης στα ελληνικά νοικοκυριά προσεγγίζει το 15% της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας, το 56% είναι για την θέρμανση των χώρων, το 21% για τον ηλεκτροφωτισμό και τις ηλεκτρικές συσκευές, ενώ μικρά ποσοστά της τάξεως του 5% και 4% είναι για το μαγείρεμα και την ψύξη των χώρων, αντίστοιχα [10]. Παρατηρείται πως ανάλογα με τον αριθμό των κατοίκων και τον τύπο του κτηρίου, η θέρμανση του νερού είναι ένα βασικό οικονομικό και περιβαλλοντικό έξοδο που εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον τύπο του καυσίμου που χρησιμοποιείται. Συνεπώς, κρίνεται σκόπιμη η διερεύνηση του οικονομικότερου και φιλικότερου στο περιβάλλον ενεργειακού συστήματος, εισάγοντας με αυτόν τον τρόπο την έννοια της βελτιστοποίησης. Παράλληλα, εισάγεται και η έννοια των διατάξεων πολλαπλών ενεργειακών συστημάτων (multi energy systems), βάση της οποίας μπορεί να επιλεγεί το ποσοστό συμμετοχής του κάθε ενεργειακού συστήματος ανάλογα με την πηγή ενέργειας που χρησιμοποιεί, μέσω ενός μαθηματικού μοντέλου βελτιστοποίησης [7]. Το μοντέλο αυτό προκύπτει βάσει του σχηματισμού ενός ενεργειακού κόμβου (energy hub), το οποίο αποτελεί ένα σύνολο κατάλληλα διαμορφωμένων εξισώσεων ανάλογα με τα χρησιμοποιούμενα συστήματα, ανεπτυγμένων σε μητρώα που αφορούν τη ροή ενέργειας στην είσοδο και στην έξοδο του κόμβου. Οι εξισώσεις αυτές επιλύονται με στόχο την επίτευξη του βέλτιστου τρόπου χρησιμοποίησης του κάθε συστήματος ανάλογα με το κριτήριο βελτιστοποίησης [8, 9].

Στην παρούσα εργασία διατυπώνονται μαθηματικά μοντέλα βελτιστοποίησης ως προς τον βαθμό συμμετοχής των ενεργειακών συστημάτων, σύμφωνα με τον ενεργειακό κόμβο της Εικόνας 1 για την κάλυψη των αναγκών ζεστού νερού χρήσης σε κτηριακή εγκατάσταση. Ο κόμβος αυτός βασίζεται στη χρήση διατάξεων πολλαπλών ενεργειακών συστημάτων, που στην προκειμένη περίπτωση είναι ο λέβητας βιομάζας (wd), ο λέβητας πετρελαίου (bl), ο ηλεκτρικός (el) και ηλιακός (sol) θερμοσίφωνας και η αντλία θερμότητας αέρα – νερού. Η εφαρμογή των μοντέλων γίνεται σε περίπτωση κτηρίου χρήσης κατοικίας, επιφάνειας 200m^2 τόσο για την κλιματική ζώνη Α όσο και για την Δ. Η διερεύνηση της βέλτιστης λύσης των μοντέλων γίνεται σε οικονομικό, ενεργειακό και περιβαλλοντικό επίπεδο σε ωριαία κλίμακα για ολόκληρο το έτος. Η μοντελοποίηση των προβλημάτων πραγματοποιείται με το λογισμικό GAMS και η επίλυση τους με τον λύτη αξιοποιώντας τις αρχές του γραμμικού ακέραιου προγραμματισμού μέσα από διάφορες προσεγγίσεις κι μεθόδους ανάπτυξής τους.

Στις ενότητες που ακολουθούν παρουσιάζεται η μεθοδολογία ανάπτυξης των κατάλληλων μαθηματικών μοντέλων που θα βελτιστοποιούν τον βαθμό συμμετοχής των ενεργειακών συστημάτων για την κάλυψη αναγκών σε ΖΝΧ. Αρχικά, γίνεται η επιλογή των κατάλληλα χρησιμοποιούμενων συστημάτων και ο καθορισμός των βασικών χαρακτηριστικών τους, όπως το κόστος, οι βαθμοί απόδοσης, κ.α. Στη συνέχεια, διατυπώνονται οι βασικές παράμετροι με τον υπολογισμό των ενεργειακών μεγεθών, αλλά και της ισχύος. Τέλος, παρατίθεται η μεθοδολογία ανάπτυξης του βασικού μοντέλου, καθώς και των υπόλοιπων κατηγοριών και μεθόδων των μοντέλων, καθώς και τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την επίλυσή τους.



Εικόνα 1: Ενεργειακός κόμβος διάταξης πολλαπλών ενεργειακών συστημάτων.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1. Διατύπωση παραμέτρων προβλήματος

2.1.1. Χαρακτηριστικά των διατάξεων πολλαπλών ενεργειακών συστημάτων

Τα ενεργειακά συστήματα που επιλέγονται για την κάλυψη των αναγκών σε ZNX χρησιμοποιούνται σε πολλές κτηριακές εγκαταστάσεις και αξιοποιούν συμβατικές και ανανεώσιμες πηγές για την άντληση της απαιτούμενης ενέργειας.

Οι τιμές του κόστους διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες: τα ενεργειακά κόστη, τα κόστη εγκατάστασης που σχετίζονται με την εγκατεστημένη ισχύ και τα περιβαλλοντικά κόστη που αφορούν στην ποσοτικοποίηση εκλυόμενων ρύπων διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) που αποτελεί αέριο του φαινομένου του θερμοκηπίου. Οι μοναδιαίες τιμές του κόστους βασίζονται σε έρευνα αγοράς για τυπικά συστήματα, καθώς και σε τρέχουσες τιμές των παρόχων ή προμηθευτών και παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Για κάποια μεγέθη (τιμή πετρελαίου & ηλ. ενέργειας), προτιμήθηκε διαφοροποίηση στην τιμή, ώστε να διερευνηθεί η επίπτωση πιθανών οικονομικών μέτρων, με στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας (π.χ. νυχτερινό τιμολόγιο), στην τελική λύση.

Οι βαθμοί απόδοσης των ενεργειακών συστημάτων είναι οι τυπικοί που διατίθενται τόσο στη βιβλιογραφία όσο και στην αγορά. Στις τιμές έχει συμπεριληφθεί και η επίπτωση απωλειών θερμότητας του κυκλώματος (Πίνακας 1). Ειδικά για το ηλιακό σύστημα, ο υποδεικνυόμενος βαθμός απόδοσης εστιάζεται μόνο σε αυτόν τον παράγοντα, καθώς η πραγματική απόδοση υπολογίζεται σύμφωνα με την Σχέση 5, όπου συμπεριλαμβάνεται και ο συντελεστής αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας. Για τα περισσότερα συστήματα οι αποδόσεις είναι σταθερές, όμως, για την αντλία θερμότητας συμπεριλήφθηκε η εξάρτηση της απόδοσής της από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Συνεπώς, υπολογίζονται οι θερμοκρασίες του αέρα του περιβάλλοντος σε ωριαίο επίπεδο σύμφωνα με τη Σχέση 1 [5], ώστε στη συνέχεια να υπολογιστούν και οι ωριαίες τιμές των συντελεστών απόδοσης σύμφωνα με τη Σχέση 2, όπου υπολογίζεται ο μέσος βαθμός απόδοσης της αντλίας θερμότητας [11].

$$T_{o,t} = T_{o,max} - (P\%) \cdot DR \quad (1)$$

όπου:

- $T_{o,t}$: οι ωριαίες θερμοκρασίες.
- $T_{o,max}$: η μέγιστη μηνιαία θερμοκρασία 24ώρου για τον κάθε μήνα.
- $P\%$: το ποσοστό μεταβολής της θερμοκρασίας ανά ώρα.
- DR: η μηνιαία διακύμανση της θερμοκρασίας 24ώρου.

$$COP = 0{,}001 \cdot \Delta T^2 - 0{,}1534 \cdot \Delta T + 7{,}3775 \quad (2)$$

όπου:

- ΔΤ: η διαφορά θερμοκρασίας του αέρα περιβάλλοντος [5] με τη θερμοκρασία εξόδου του εργαζόμενου μέσου (νερού), η οποία θεωρείται στους 50ºC [5]

Πίνακας 1: Βαθμοί απόδοσης, διάρκεια ζωής και κόστη για κάθε ενεργειακό σύστημα.

Συστήματα	Βαθμός απόδοσης (%)	Ενεργειακό κόστος (€/kWh)	Κόστος εγκατάστασης (€/kW)	Περιβαλλοντικό κόστος (€/kWh)	Διάρκεια ζωής (έτη)
bl	80	0,025/0,1	100	0,04	20
wd	90	0,04	250	0	15
el	95	0,05/0,15	100	0,065	15
hp	Μεταβαλλόμενος (εξ. 2)	0,05/0,15	250	0,065	15
sol	95	0	450 (€/m²)	0,004	15

2.1.2. Ενεργειακά μεγέθη

Αρχικά, γίνεται υπολογισμός των ενεργειακών απαιτήσεων σε μηνιαίο επίπεδο για τις δύο κλιματικές ζώνες σύμφωνα με τη Σχέση 3 [3], οι οποίες ανάγονται σε ωριαίο επίπεδο για κάθε μήνα.

$$Q_{ZNX} = V_W \cdot N_{day,i} \cdot \frac{\rho \cdot c}{3600} \cdot \left(\Theta_{ZNX,i} - \theta_{w,i}\right) \quad (3)$$

όπου:

- Q_{ZNX} [kWh]: το μηνιαίο απαιτούμενο ενεργειακό φορτίο για την κάλυψη των αναγκών σε ΖΝΧ.
- V_W $\left[\frac{Lt}{μέρα}\right]$: η ημερήσια ογκομετρική παροχή του νερού.
- $N_{day,i}$: ο αριθμός των ημερών του κάθε μήνα.
- $\rho = 1 \frac{kg}{Lt}$: η πυκνότητα του νερού.
- $c = 4{,}18 \ \frac{kJ}{kg \cdot K}$: η ειδική θερμοχωρητικότητα του νερού.
- $\Theta_{ZNX,i} = 45$ °C : η απαιτούμενη θερμοκρασία του ζεστού νερού χρήσης.
- $\theta_{w,i}$: η θερμοκρασία του νερού δικτύου της περιοχής για τον κάθε μήνα.

Στη συνέχεια, ανάλογα με τους βαθμούς απόδοσης του κάθε συστήματος υπολογίζονται οι ενεργειακές καταναλώσεις σε ωριαίο επίπεδο σύμφωνα με τη Σχέση 4 [3]. Με βάση τις τιμές αυτές υπολογίζονται τόσο τα ενεργειακά, όσο και τα περιβαλλοντικά κόστη.

$$Q_{cons} = \frac{Q_{dem}}{\text{n ή COP}} \quad (4)$$

Τέλος, αναφορικά με τον υπολογισμό της εγκατεστημένης ισχύος του κάθε ενεργειακού συστήματος, αυτή γίνεται λαμβάνοντας υπόψη τις ωριαίες ενεργειακές απαιτήσεις για την κάλυψη του φορτίου σε πέντε ώρες λειτουργίας ημερησίως, όπως ορίζει η τεχνική οδηγία ΤΟΤΕΕ [3]. Ειδικά για τον ηλιακό θερμοσίφωνα, η διαστασιολόγηση γίνεται με την εύρεση της επιφάνειας των θερμικών ηλιακών συλλεκτών αξιοποιώντας τη διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία σε μηνιαίο επίπεδο.

$$A_{sol} = \frac{E_{solHW}}{CF_{sol} \cdot H_{sol}} = \frac{\frac{Q_{dem,sol}}{n_{sol}}}{CF_{sol} \cdot H_{sol}} \quad (5)$$

όπου:

- E_{solHW} [kWh]: ωφέλιμη ενέργεια από τον συλλέκτη, που αντιπροσωπεύει την ενέργεια που καταναλώνει ο συλλέκτης για ΖΝΧ.
- CF_{sol}: ο συντελεστής αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας, δηλαδή ο βαθμός απόδοσης του συλλέκτη σε μηνιαίο επίπεδο (=0.4) [3].

- η_{sol}: η απόδοση του συστήματος μεταφοράς θερμότητας (=0.95).
- $A_{sol}\ [m^2]$: η επιφάνεια του ηλιακού συλλέκτη.
- $H_{sol}\left[\frac{kWh}{m^2}\right]$: η διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία σε μηνιαία βάση [5].

2.2. Μοντελοποίηση

Το αναπτυσσόμενο μοντέλο θα επιλέγει ποιο σύστημα είναι κατάλληλο να χρησιμοποιείται και σε τι βαθμό συμμετοχής ώστε να ελαχιστοποιείται το συνολικό κόστος. Αυτό γίνεται με τον καθορισμό του ενεργειακού κόστους της κάθε πηγής, μέσα από τις καταναλώσεις, με την εισαγωγή του βαθμού συμμετοχής του καθενός. Επιπλέον, στο μοντέλο προστίθεται και το κόστος εγκατάστασης που σχετίζεται με τη διαστασιολόγηση των συστημάτων σε ωριαίο επίπεδο, συμπεριλαμβανομένης της διάρκειας ζωής του κάθε συστήματος. Το κόστος αυτό αποτελεί ένα σταθερό κόστος στη συνολική εξίσωση, το οποίο συνυπολογίζεται μόνο όταν ευνοείται η χρήση του εκάστοτε συστήματος. Για τον λόγο αυτό εισάγονται περαιτέρω δυαδικές μεταβλητές, όπως φαίνεται στη Σχέση 6, που αποτελεί την αντικειμενική συνάρτηση ελαχιστοποίησης του κόστους.

$$E_{encost} = \frac{Q_{dem} \cdot cost_{bl}}{n_{bl}} \cdot \varepsilon_{bl} + \frac{Q_{dem} \cdot cost_{wd}}{n_{wd}} \cdot \varepsilon_{wd} + \frac{Q_{dem} \cdot cost_{el}}{n_{el}} \cdot \varepsilon_{el}$$

$$+ \frac{Q_{dem} \cdot cost_{HP}}{n_{HP}} \cdot \varepsilon_{HP} + \frac{Q_{dem} \cdot cost_{sol}}{n_{sol}} \cdot \varepsilon_{sol} + \frac{P_{bl} \cdot inct_{bl}}{y_{bl}} \cdot \alpha + \frac{P_{wd} \cdot inct_{wd}}{y_{wd}} \cdot \beta +$$

$$+ \frac{P_{el} \cdot inct_{el}}{y_{el}} \cdot \gamma + \frac{P_{HP} \cdot inct_{HP}}{y_{HP}} \cdot \delta + \frac{A_{sol} \cdot inct_{sol}}{y_{sol}} \cdot \varepsilon \quad (6)$$

όπου οι μεταβλητές απόφασης του προβλήματος είναι:

- $\varepsilon_{bl}, \varepsilon_{wd}, \varepsilon_{el}, \varepsilon_{GHP}, \varepsilon_{HP}, \varepsilon_{sol}$: τα ποσοστά συμμετοχής του κάθε συστήματος (ποσοστιαίες μεταβλητές απόφασης).
- $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon$: δυαδικές μεταβλητές απόφασης του κάθε συστήματος που καθορίζουν το κόστος εγκατάστασης.

Βέβαια, είναι απαραίτητο να διατυπωθούν ορισμένοι περιορισμοί, οι τύποι και η ερμηνεία των οποίων περιγράφεται παρακάτω.

i. Περιορισμοί μη αρνητικότητας και ποσοστού συμμετοχής.

$$0 \le \varepsilon_{bl} \le 1,\ 0 \le \varepsilon_{wd} \le 1,\ 0 \le \varepsilon_{el} \le 1,\ 0 \le \varepsilon_{HP} \le 1,\ 0 \le \varepsilon_{sol} \le 1 \quad (7)$$

ii. Περιορισμός πλήρους κάλυψης των απαιτήσεων.

$$\varepsilon_{bl} + \varepsilon_{wd} + \varepsilon_{el} + \varepsilon_{HP} + \varepsilon_{sol} = 1 \quad (8)$$

iii. Περιορισμοί συμμετοχής του κόστους εγκατάστασης.

$$\varepsilon_{bl} \le \alpha,\ \varepsilon_{wd} \le \beta,\ \varepsilon_{el} \le \gamma,\ \varepsilon_{HP} \le \delta,\ \varepsilon_{sol} \le \varepsilon \quad (9)$$

2.3. Κατηγορίες μοντέλων βελτιστοποίησης

2.3.1. Ενεργειακό μοντέλο ελαχιστοποίησης κόστους

Το παρόν μοντέλο διαφοροποιείται από το πρωταρχικό (Σχέση 6) καθώς το ενεργειακό κόστος των ηλιακών συλλεκτών λαμβάνεται μηδενικό αφού θεωρείται ότι είναι ΑΠΕ. Το μοντέλο αυτό μελετάται για τις κλιματικές ζώνες Α και Δ για τα πέντε ενεργειακά συστήματα που προαναφέρθηκαν, αλλά και για την περίπτωση χωρίς τον λέβητα βιομάζας.

2.3.2. Περιβαλλοντικό μοντέλο ελαχιστοποίησης κόστους

Στο μοντέλο αυτό περιλαμβάνονται τα περιβαλλοντικά κόστη και προφανώς δε συνυπολογίζονται τα κόστη εγκατάστασης, με αποτέλεσμα να απαλείφονται οι δυαδικές μεταβλητές. Στο μοντέλο αυτό, η διερεύνηση αφορά στις ίδιες περιπτώσεις με το ενεργειακό μοντέλο.

2.3.3. Πολυκριτηριακό μοντέλο

Πρόκειται για γραμμικό μοντέλο δύο αντικειμενικών συναρτήσεων – κριτηρίων, όπου συνδυάζεται το ενεργειακό με το περιβαλλοντικό μοντέλο. Στην περίπτωση αυτή μελετάται μόνο η περίπτωση της Δ κλιματικής ζώνης χωρίς να συμπεριλαμβάνεται ο λέβητας βιομάζας. Διερευνήθηκαν τρεις τύποι μοντέλων αυτής της κατηγορίας. Αρχικά μελετήθηκε το μοντέλο χωρίς βαρύτητες όπου η αντικειμενική συνάρτηση περιλαμβάνει ισόποσα το ενεργειακό (Eencost) και περιβαλλοντικό κόστος (Eenvcost) (Σχέση 10) και στη συνέχεια μελετήθηκαν δύο μοντέλα με βαρύτητες, το μοντέλο με 70% βαρύτητα στο ενεργειακό και 30% στο περιβαλλοντικό κριτήριο (Σχέση 11), αλλά και το μοντέλο με 30% βαρύτητα στο ενεργειακό και 70% στο περιβαλλοντικό (Σχέση 12).

$$E_{costs} = E_{encost} + E_{envcost} \quad (10)$$

$$E_{costs} = 0{,}7 \cdot E_{encost} + 0{,}3 \cdot E_{envcost} \quad (11)$$

$$E_{costs} = 0{,}3 \cdot E_{encost} + 0{,}7 \cdot E_{envcost} \quad (12)$$

2.3.4. Μοντέλο προγραμματισμού στόχων

Ο προγραμματισμός στόχων (Goal Programming) είναι μια μέθοδος επίλυσης προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων, οι οποίες τίθενται ως περιορισμοί με την εισαγωγή μεταβλητών απόκλισης από τον στόχο του κάθε περιορισμού. Η αντικειμενική συνάρτηση απαιτεί την ελαχιστοποίηση των μεταβλητών απόκλισης από τους στόχους. Οι περιορισμοί στη συγκεκριμένη περίπτωση μελέτης είναι οι αντικειμενικές συναρτήσεις των κλασικών μοντέλων που αναλύθηκαν παραπάνω, δηλαδή οι ενεργειακοί και περιβαλλοντικοί στόχοι, μαζί με τις μεταβλητές απόκλισης. Οι στόχοι εκφράζονται ως ισότητες για τα ωριαία ελάχιστα κόστη που προέκυψαν από την επίλυση των κλασικών μοντέλων. Με τη μέθοδο αυτή αναπτύχθηκαν δύο τύποι προβλημάτων: το κλασικό μοντέλο (Σχέση 13) και το αντίστοιχο με βαρύτητες, όπου το ενεργειακό κριτήριο έχει διπλάσια βαρύτητα από το περιβαλλοντικό (Σχέση 14). Στα μοντέλα αυτά ισχύουν οι βασικοί περιορισμοί που περιεγράφηκαν στα αρχικά μοντέλα και προστίθενται οι παρακάτω περιορισμοί με τις μεταβλητές απόκλισης (Σχέσεις 15 και 16) [12].

$$\min z = n_1^- + p_1^+ + n_2^- + p_2^+ \quad (13)$$

$$\min z = \frac{2}{E_{encost}} \cdot n_1^- + \frac{2}{E_{encost}} \cdot p_1^+ + \frac{1}{E_{envcost}} \cdot n_2^- + \frac{1}{E_{envcost}} \cdot p_2^+ \quad (14)$$

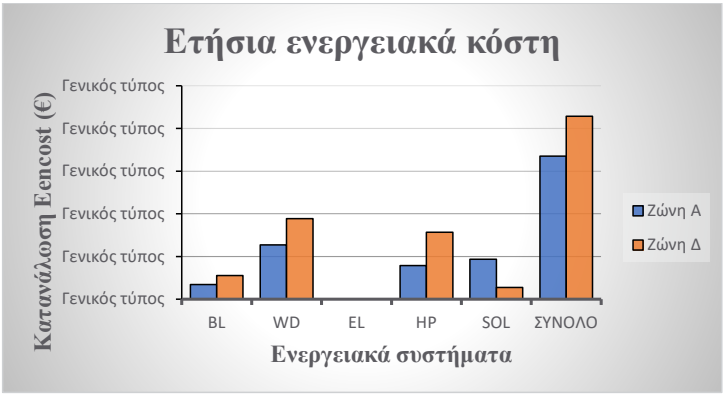
$$\text{s.t. } x_1 \cdot e_{bl} + x_2 \cdot e_{el} + x_3 \cdot e_{hp} + x_4 \cdot e_{sol} + k_1 \cdot \alpha + k_2 \cdot \beta + k_3 \cdot \gamma + n_1^- - p_1^+ = E_{encost} \quad (15)$$

$$y_1 \cdot e_{bl} + y_2 \cdot e_{el} + y_3 \cdot e_{hp} + y_4 \cdot e_{sol} + n_2^- - p_2^+ = E_{envcost} \quad (16)$$

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

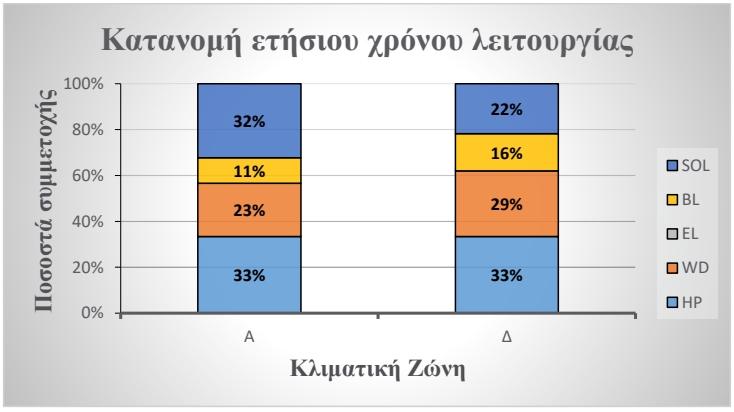
Τα αποτελέσματα δίνονται σε μορφή πινάκων και διαγραμμάτων σε ετήσιο επίπεδο, όπως αυτά προέκυψαν από την ωριαία ανάλυση των μοντέλων που αναπτύχθηκαν παραπάνω. Τα αποτελέσματα μαζί με τα βασικότερα συμπεράσματα παρουσιάζονται για κάθε κατηγορία μοντέλου.

3.1. Αποτελέσματα ενεργειακού μοντέλου ελαχιστοποίησης κόστους



Εικόνα 2: Ελαχιστοποιημένα συνολικά κόστη σε € σε ετήσιο επίπεδο για κάθε ενεργειακό σύστημα για τις δύο κλιματικές ζώνες.

Από την Εικόνα 2, όπου στις στήλες του διαγράμματος αποτυπώνονται τα βέλτιστα ενεργειακά κόστη του κάθε συστήματος, παρατηρείται πως το συνολικό ελάχιστο κόστος είναι μεγαλύτερο στην Δ κλιματική ζώνη, εξαιτίας των δυσμενέστερων κλιματικών συνθηκών. Βέβαια, και στις δύο ζώνες κυριαρχεί ο λέβητας βιομάζας, κυρίως λόγω του χαμηλότερου ενεργειακού κόστους της βιομάζας, που ακολουθείται από την αντλία θερμότητας στην Δ ζώνη και τον ηλιακό συλλέκτη στην Α ζώνη.



Εικόνα 3: Κατανομή ετήσιου χρόνου λειτουργίας για τις δύο κλιματικές ζώνες.

Στην Εικόνα 3 φαίνονται τα αποτελέσματα σε επίπεδο ωρών λειτουργίας, όπου παρατηρείται ότι η αντλία θερμότητας κυριαρχεί και στις δύο κλιματικές ζώνες, ακολουθούμενη από την βιομάζα στη ζώνη Δ και τον ηλιακό συλλέκτη στην Α. Ο χρόνος λειτουργίας της αντλίας θερμότητας είναι σταθερός και μέγιστος και στις δύο κλιματικές ζώνες σε σχέση με τα υπόλοιπα συστήματα, εξαιτίας του χαμηλού ενεργειακού κόστους κατά την παραδοχή του νυχτερινού τιμολογίου. Αυτό ισχύει και για τον ηλεκτρικό θερμοσίφωνα,

όπου όμως η κατανάλωση ενέργειας, και κατά συνέπεια το κόστος λειτουργίας του, είναι υψηλότερα σε σχέση με την περίπτωση της αντλίας θερμότητας.

Για το ίδιο μοντέλο χωρίς να περιλαμβάνεται ο λέβητας βιομάζας στην διερεύνηση, προκύπτει αύξηση του συνολικού ελαχιστοποιημένου κόστους κατά 12% σε ετήσια βάση, εξαιτίας του χαμηλού κόστους της βιομάζας. Το μερίδιο της βιομάζας επιμερίζεται κατά κύριο λόγο στην αντλία θερμότητας και τον ηλιακό συλλέκτη.

3.2. Αποτελέσματα περιβαλλοντικού μοντέλου ελαχιστοποίησης κόστους

Στο μοντέλο αυτό τα ΑΠΕ συστήματα επιλέγονται ως οι βέλτιστες λύσεις, δηλαδή ο λέβητας βιομάζας και ο ηλιακός συλλέκτης και για τις δύο κλιματικές ζώνες. Λαμβάνοντας υπόψη το μοντέλο που δε συμπεριλαμβάνεται η βιομάζα, οι θερμικού ηλιακοί συλλέκτες κυριαρχούν σε ποσοστό 100%.

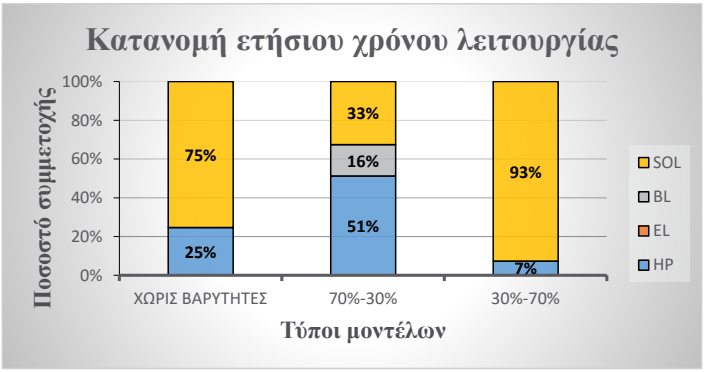
3.3. Αποτελέσματα πολυκριτηριακού μοντέλου ελαχιστοποίησης κόστους

Στα μοντέλα αυτά η μελέτη αφορά σε κτήριο της Δ κλιματικής ζώνης, χωρίς να συνυπολογίζεται ο λέβητας βιομάζας. Έτσι, προκύπτουν τα ακόλουθα αποτελέσματα στον Πίνακα 2, για τους τρεις τύπους μοντέλων που αναπτύχθηκαν.

Πίνακας 2: Ελαχιστοποιημένα κόστη σε € σε ετήσιο επίπεδο για τα μοντέλα πολλαπλών κριτηρίων..

	Ελαχιστοποιημένα κόστη (€)				
Μοντέλα	**bl**	**el**	**hp**	**sol**	**Σύνολο**
Χωρίς βαρύτητες	0	0	111,6	219,1	330,7
70%-30%	0	0	110,8	86,5	197,3
30%-70%	0	0	13,8	103,5	117,3

Για το μοντέλο χωρίς βαρύτητες, υπολογίζεται πως στο τελικό ενεργειακό μίγμα συμμετέχουν μόνο η αντλία θερμότητας και ο ηλιακός συλλέκτης προκειμένου να ελαχιστοποιείται το κόστος. Βέβαια, προκύπτει ότι το συνολικό ετήσιο κόστος είναι αυξημένο κατά 40% περίπου σε σχέση με τα αρχικά μοντέλα, γεγονός που οφείλεται στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της καταναλισκόμενης συμβατικής ενέργειας και κυρίως στην ηλεκτρική ενέργεια των αντλιών θερμότητας.



Εικόνα 4: Κατανομή ετήσιου χρόνου λειτουργίας για τους τρεις τύπους μοντέλων.

Από τον Πίνακα 2 και την Εικόνα 4, όπου απεικονίζονται τα αποτελέσματα αναφορικά με τα κόστη και την κατανομή των χρόνων λειτουργίας αντίστοιχα, φανερώνεται πως για τα μοντέλα με τις βαρύτητες

όταν η βαρύτητα δίνεται στο ενεργειακό κριτήριο, τότε αυξάνεται το συνολικό κόστος και από τους χρόνους λειτουργίας, φανερώνεται μείωση της αξιοποίησης των ΑΠΕ συστημάτων. Σε αυτά τα μοντέλα δεν ευνοείται η λειτουργία ούτε του λέβητα πετρελαίου ούτε του ηλεκτρικού θερμοσίφωνα.

3.4. Αποτελέσματα μοντέλου προγραμματισμού στόχων ελαχιστοποίησης κόστους

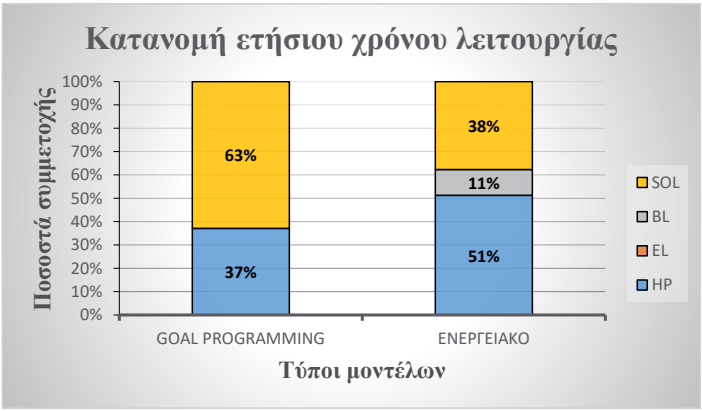
Στον Πίνακα 3 απεικονίζονται τα ελαχιστοποιημένα κόστη σε ετήσιο επίπεδο, όπως αυτά υπολογίστηκαν με ωριαία ανάλυση των δεδομένων, τόσο για το κλασικό πρόβλημα, όπου όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το ενεργειακό και το περιβαλλοντικό κριτήριο έχουν την ίδια βαρύτητα, όσο και για το πρόβλημα όπου το ενεργειακό κριτήριο έχει διπλάσια βαρύτητα σε σχέση με το περιβαλλοντικό. Ο πίνακας δείχνει την κατανομή του κόστους στο ενεργειακό και στο περιβαλλοντικό κριτήριο. Τα μοντέλα αυτά αναλύθηκαν μόνο για την κλιματική ζώνη Δ χωρίς τη συμμετοχή της βιομάζας.

Πίνακας 3: Ελαχιστοποιημένα ενεργειακά και περιβαλλοντικά κόστη σε € σε ετήσιο επίπεδο για τα μοντέλα προγραμματισμού στόχου.

Μοντέλα	Ενεργειακό κόστος (€)	Περιβαλλοντικό κόστος (€)	Σύνολο (€)
Κλασικό	258,3	69,9	328,2
Βαρυτήτων	347,7	23	370,7

Για το κλασικό μοντέλο παρατηρείται πως τα συνολικά κόστη είναι αυξημένα σε σχέση με τα κόστη του γραμμικού ενεργειακού και περιβαλλοντικού μοντέλου, επειδή οι στόχοι είναι πλέον περισσότερο χαλαροί και αυξάνεται η συμμετοχή των ΑΠΕ συστημάτων, δηλαδή των ηλιακών συλλεκτών. Τα μόνα συστήματα που ευνοείται η χρήση τους είναι κυρίως οι ηλιακοί συλλέκτες και σε μικρότερο ποσοστό οι αντλίες θερμότητας. Αυτό αποδεικνύεται από τους χρόνους λειτουργίας των συστημάτων, όπως παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.

Όσον αφορά το μοντέλο βαρυτήτων, αν συγκριθεί με το πολυκριτηριακό με αντίστοιχες βαρύτητες 70-30%, φαίνεται πως ευνοείται η χρήση των περισσότερο αποδοτικών οικονομικά και περιβαλλοντικά τεχνολογιών (ηλιακός συλλέκτης και αντλία θερμότητας).



Εικόνα 5: Κατανομή ετήσιου χρόνου λειτουργίας για το ενεργειακό και το Goal programming μοντέλο..

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η εφαρμογή αλγορίθμων βελτιστοποίησης στο σχεδιασμό ενεργειακών συστημάτων πολλαπλών πηγών, παρέχει αφενός τη δυνατότητα εις βάθους ανάλυσης των παραμέτρων του προβλήματος σε ενεργειακό και περιβαλλοντικό επίπεδο, και αφετέρου την δυνατότητα αξιολόγησης των αποτελεσμάτων για τον περιορισμό των πηγών, σύμφωνα με τις υποδείξεις των υπολογιζόμενων βαθμών συμμετοχής.

Σύμφωνα με την παρούσα διερεύνηση, για εφαρμογή Ζεστού Νερού Χρήσης, στην περίπτωση του ενεργειακού κριτηρίου κυριαρχεί η βιομάζα (ή η Α/Θ όταν αυτή δε συμπεριλαμβάνεται), με αύξηση συμμετοχής των ηλιακών συλλεκτών όταν εισάγεται και ο παράγοντας του περιβαλλοντικού κριτηρίου. Επιπλέον, η συμμετοχή των ΑΠΕ (ηλιακό σύστημα) ενισχύεται και στην περίπτωση του προγραμματισμού στόχων λόγω της δυνατότητας αποκλίσεων από τους πρωταρχικούς στόχους. Τέλος, παρατηρήθηκε πως σε ωριαία κλίμακα, το κλασικό μοντέλο προγραμματισμού στόχων δίνει πλουραλιστικές λύσεις για τον βαθμό συμμετοχής του κάθε ενεργειακού συστήματος.

Περαιτέρω έρευνα μπορεί να εστιάσει στην αξιοποίηση μεγαλύτερου εύρους μοντέλων μαθηματικού προγραμματισμού, αλλά και στην επίλυση του προβλήματος με μικρότερο χρονικό βήμα, σημειώνοντας πως η σημαντική μείωση του χρονικού βήματος μπορεί να μετατρέψει το συγκεκριμένο πρόβλημα σχεδιασμού σε πρόβλημα ελέγχου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] ΕΕ, 2002. Οδηγία 2002/91/ΕΚ του ευρωπαϊκού κοινοβουλίου και του συμβουλίου της 16ης Δεκεμβρίου 2002 για την ενεργειακή απόδοση των κτηρίων 2002/91/ΕΕ. Βρυξέλλες.

[2] ΕΕ, 2010. Οδηγία 2010/31/ΕΚ του ευρωπαϊκού κοινοβουλίου και του συμβουλίου της 19ης Μαΐου 2010 για την ενεργειακή απόδοση κτηρίων. Βρυξέλλες.

[3] ΤΕΕ, 2017α. ΤΟΤΕΕ20701-1: Αναλυτικές εθνικές προδιαγραφές παραμέτρων για τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης κτηρίων και την έκδοση πιστοποιητικού ενεργειακής απόδοσης. Αθήνα.

[4] ΤΕΕ, 2017β. ΤΟΤΕΕ 20701-2. Θερμοφυσικές ιδιότητες δομικών υλικών και έλεγχος της θερμομονωτικής επάρκειας των κτηρίων. Αθήνα.

[5] ΤΕΕ, 2017γ. ΤΟΤΕΕ 20701-3. Κλιματικά δεδομένα ελληνικών περιοχών. Αθήνα.

[6] European Commission. 2014. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the regions. A policy framework for climate and energy in the period from 2020 to 2030. Brussels.

[7] Fabrizio E., Corrado V., Filippi M., 2009. A model to design and optimize multi-energy systems in buildings at the design concept stage. Renewable Energy 35(3), 644-655.

[8] Manwell JF., 2004. Hybrid energy systems. In: Cleveland CJ, editor. Encyclopedia of energy, vol. 3. London: Elsevier, 215–29.

[9] Ooka R, Komamura K., 2009. Optimal design method for building energy systems using genetic algorithms. Build Environ 44,1538–44.

[10] Eurostat, 2020. Energy Balance Sheets 2018. https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/energy-balances. Brussels.

[11] Mouzeviris G., Papakostas K., 2021. Comparative Analysis of Air-to-Water and Ground Source Heat Pumps Performances. International Journal of Sustainable Energy 40, 69-84.

[12] Charnes A., Cooper W.W., 1981. Management models and industrial applications of linear programming. John Wiley & Sons. New York.

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΚΑΙΝΟΤΟΜΩΝ ΠΡΟΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΩΝ ΚΤΙΡΙΩΝ ΕΝΑΝΤΙ ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Στέλλα Τσόκα*, Κατερίνα Τσικαλουδάκη, Θεόδωρος Θεοδοσίου, Παναγιώτης Χαστάς, Απόστολος Καραούλης

Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Α.Π.Θ,
*e-mail: stsoka@civil.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Παρά τα πολλαπλά οφέλη των σύγχρονων μεθόδων προκατασκευής κτιρίων έναντι των συμβατικών τρόπων δόμησης, η εφαρμογή τους στον Ευρωπαικό χώρο και ιδιαίτερα στις χώρες της Μεσογείου παραμένει έως και σήμερα σημαντικά μειωμένη. Ειδικότερα στην Ελλάδα, η προκατασκευή αντιστοιχεί σε ιδιαίτερα μικρό ποσοσοστό του συνολικού κτιριακού αποθέματος, κυρίως εξ αιτίας της ταύτισης αυτής με κατασκευές χαμηλότερης ποιότητας. Ωστόσο, οι σημαντικές τεχνολογικές και βιομηχανικές εξελίξεις των τελευταίων δεκαετιών έχουν οδηγήσει σε υψηλής απόδοσης προκατασκευασμένες λύσεις που συναγωνίζονται τις συμβατικές κατασκευές τόσο στην ενεργειακή, περιβαλλοντική και αντισεισμική τους απόκριση όσο και στην εξοικονόμηση χρόνου και πόρων κατά την κατασκευή.

Σε αυτό το πλαίσιο, η παρούσα εργασία στοχεύει στη συγκριτική ανάλυση της ενεργειακής και περιβαλλοντικής απόδοσης ενός συμβατικά κατασκευασμένου και ενός προκατασκευασμένου κτιρίου, τα φέροντα και τα στοιχεία πλήρωσης του οποίου αποτελούνται από ένα καινοτόμο δομικό στοιχείο με προηγμένες ρεολογικές, φυσικοχημικές και μηχανικές ιδιότητες. Στην παρούσα έρευνα, η κατασκευή που επιλέγεται προς διερεύνηση είναι ένα μονώροφο κτίριο κατοικίας. Και για τους δύο τύπους δόμησης, οι ετήσιες ενεργειακές απαιτήσεις θέρμανσης και ψύξης υπολογίζονται μέσω του εργαλείου δυναμικής προσομοιώσης Energy Plus, για 4 διαφορετικά πάχη θερμομόνωσης και για τις 4 κλιματικές ζώνες της Ελλάδας. Παράλληλα με τις θερμικές και ψυκτικές απαιτήσεις, εκτιμώνται και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των δύο κατασκευών ώστε να αναδειχθεί η συνολική απόδοση κάθε τύπου κτιρίου καθ 'όλη τη διάρκεια ζωής του.

Τα αποτελέσματα της δυναμικής προσομοίωσης ανέδειξαν βελτιωμένη ενεργειακή συμπεριφορά του προκατασκευασμένου κτιρίου έναντι της συμβατικής κατασκευής, ανεξάρτητα από τις κλιματικές συνθήκες και το πάχος της εξωτερικής θερμομόνωσης, η οποία ήταν κοινή και για τις δύο κατασκευές. Πιο συγκεκριμένα, η βελτιωμένη ενεργειακή απόδοση αφορούσε κυρίως στις ετήσιες απαιτήσεις θέρμανσης, ενώ τα φορτία ψύξης παρουσίασαν μικρότερες διαφορές. Αναφορικά με την περιβαλλοντική απόδοση των δύο τύπων κατασκευών, η ανάλυση έδειξε σημαντική εξάρτηση των εξαγόμενων αποτελεσμάτων από τις κλιματικές συνθήκες, με το προκατασκευασμένο κτίριο να παρουσιάζει γενικά καλύτερη απόδοση από το συμβατικό κτίριο. Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας αποδεικνύουν πως μέσω του σωστού σχεδιασμού, η απόδοση των προκατασκευασμένων κτιρίων μπορεί να φτάσει σε πολύ υψηλά επίπεδα - ακόμη και υψηλότερα από αυτά των συμβατικών κτιρίων.

Λέξεις Κλειδιά: προκατασκευασμένα κτίρια, ενεργειακές απαιτήσεις, ανάλυση κύκλου ζωής, περιβαλλοντικές επιπτώσεις

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο κτιριακός τομέας συνεισφέρει σημαντικά στη συνολική κατανάλωση ενέργειας τόσο σε ευρωπαϊκό όσο και σε εθνικό επίπεδο. Το 2019, το μερίδιο του κτιριακού και του τριτογενούς τομέα ήταν περίπου 41% για την Ευρωπαϊκή Ένωση και την Ελλάδα [1]. Αν ληφθούν υπόψη μόνο τα κτίρια κατοικίας, η ενέργεια που καταναλώνεται για τη λειτουργία τους ανέρχεται στο 27,2% για τις χώρες-μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης και αφορά κυρίως στη χρήση φυσικού αερίου (36%) και ηλεκτρισμού (24%). Στην Ελλάδα, τα κτίρια κατοικίας είναι υπεύθυνα για το 27,5% της τελικής κατανάλωσης ενέργειας με τον ηλεκτρισμό (40%) και το πετρέλαιο (30%) να αποτελούν τα κύρια καύσιμα [2]. Γενικά, οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου ανά κάτοικο ανέρχονται σε 9.2 t CO_2 eq/cap για την Ελλάδα, ενώ ο μέσος όρος για την Ευρωπαϊκή Ένωση είναι 8.8 t CO_2 eq/cap [1].

Στην ελληνική επικράτεια η συντριπτική πλειονότητα των κτιρίων είναι κατοικίες (79%) και οι περισσότερες από αυτές έχουν κατασκευαστεί πριν από το 1980, σε περιόδους δηλαδή που δεν υπήρχαν απαιτήσεις και προδιαγραφές για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων. Το κυρίαρχο υλικό για το φέροντα οργανισμό των κτιρίων είναι το οπλισμένο σκυρόδεμα και για τις τοιχοποιίες πλήρωσης η οπτοπλινθοδομή. Τα προκατασκευασμένα κτίρια, η βασική μορφή των οποίων γίνεται από ξύλο, χάλυβα ή σκυρόδεμα, αποτελούν μόνο το 2% του κτιριακού δυναμικού της χώρας, ενώ το αντίστοιχο ποσοστό στην Ευρώπη ισούται με 15% και βαίνει αυξανόμενο.

Η μικρή διείσδυση των προκατασκευασμένων κτιρίων στην αγορά ακινήτων δεν είναι μόνο χαρακτηριστικό της Ελλάδας, αλλά είναι συχνή και σε άλλες χώρες της Μεσογείου [3]. Για πολλά χρόνια, τα προκατασκευασμένα κτίρια θεωρούνταν ως κατώτερης ποιότητας ή ως προοριζόμενα για εφήμερες κατασκευές. Ωστόσο σήμερα έχει πλέον αποδειχθεί πως τα προκατασκευασμένα κτίρια ανταγωνίζονται τις συμβατικές κατασκευές σε κάθε επί μέρους άξονα απόδοσης, δηλαδή στη στατική επάρκεια, στην ενεργειακή και υγροθερμική συμπεριφορά, στην ακουστική, στην πυροπροστασία, στην περιβαλλοντική απόδοση, κ.α. [4].

Υπό αυτό το πρίσμα, το ερευνητικό έργο SU.PR.I.M. (Προκατασκευασμένο δομικό στοιχείο υψηλής απόδοσης) στοχεύει στην ανάπτυξη ενός καινοτόμου δομικού στοιχείου με προηγμένες ιδιότητες, το οποίο θα λειτουργεί ως φέρον στοιχείο και ως στοιχείο πλήρωσης σε προκατασκευασμένες κατοικίες. Το νέο αυτό δομικό στοιχείο θα ικανοποιεί υψηλές απαιτήσεις για τη λειτουργία και την απόδοσή του. Συγκεκριμένα, θα είναι σε θέση να παραλαμβάνει και να μεταβιβάζει τα κινητά και ακίνητα φορτία, θα παρουσιάζει πολύ καλή ενεργειακή και υγροθερμική συμπεριφορά, θα παρέχει ηχομονωτική προστασία και προστασία έναντι της φωτιάς, ενώ το περιβαλλοντικό του αποτύπωμα θα είναι ελάχιστο κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του.

Στην εργασία αυτή, εξετάζεται η ενεργειακή και η περιβαλλοντική απόδοση μιας μικρής μονοκατοικίας που μελετήθηκε και κατασκευάστηκε με την εφαρμογή του νέου δομικού στοιχείου. Η απόδοση του προκατασκευασμένου κτιρίου αναλύεται με τη χρήση προσομοιωτικών εργαλείων και συγκρίνεται με αυτή ενός όμοιου κτιρίου που δομείται με συμβατικό τρόπο (φέρων οργανισμός από οπλισμένο σκυρόδεμα και τοιχοποιίες από οπτοπλινθοδομή).

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Στις παρακάτω ενότητες που ακολουθούν παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική διαμόρφωση του εξεταζόμενου κτιρίου και των παραλλαγών της κατασκευαστικής του διαμόρφωσης, οι μέθοδοι προσέγγισης και οι παράμετροι αξιολόγησης της ενεργειακής και περιβαλλοντικής απόδοσης, καθώς και τα εξεταζόμενα σενάρια.

2.1. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά κτιρίου

Το εξεταζόμενο κτίριο παρουσιάζεται στο Σχήμα 1. Πρόκειται για ένα μονώροφο κτίριο, εμβαδού 47,32 m². Η κάτοψή του είναι ορθογωνική, και αναπτύσσεται στον άξονα Βορρά-Νότου, με παράθυρα μόνο στο νότιο και βόρειο τοίχο.

Το κτίριο επιστεγάζεται με κεραμοσκεπή στέγη, κάτω από την οποία υπάρχει οριζόντια οροφή από οπλισμένο σκυρόδεμα. Η οροφή είναι θερμομονωμένη με πλάκες εξηλασμένης πολυστερίνης, πάχους 10 cm, οι οποίες είναι τοποθετημένες επάνω στην πλάκα σκυροδέματος. Το δάπεδο του κτιρίου βρίσκεται σε επαφή με το έδαφος, είναι κατασκευασμένο από οπλισμένο σκυρόδεμα και είναι θερμομονωμένο με πλάκες εξηλασμένης πολυστερίνης, πάχους 10 cm. Τα κουφώματα έχουν

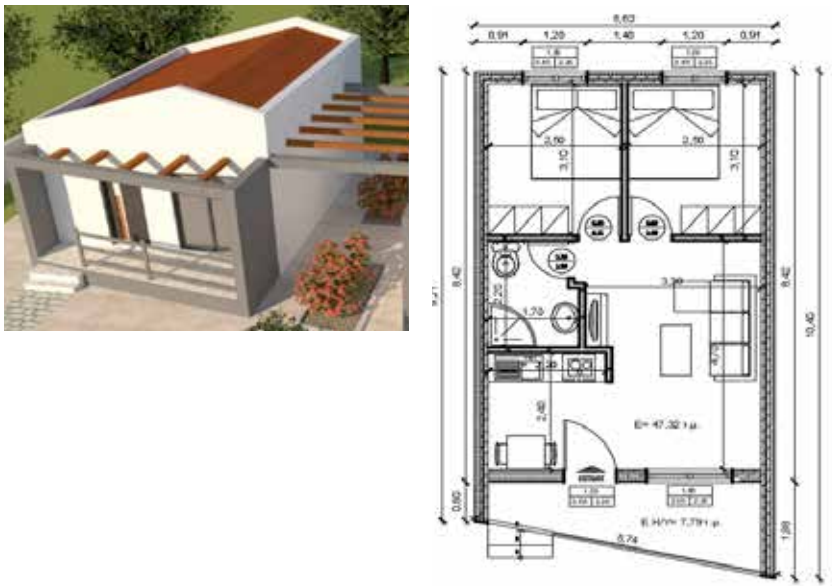
συνθετικό πλαίσιο και φέρουν διπλό υαλοπίνακα χαμηλής εκπεμπτικότητας. Η μέση τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητάς τους είναι ίση με 2 W/(m² K).

Το κτίριο εξετάζεται με δύο διαφορετικές διαμορφώσεις της κατασκευαστικής του δομής, θεωρώντας ότι:

- αφενός πρόκειται για συμβατικό κτίριο, κι επομένως έχει κατακόρυφα φέροντα στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα και στοιχεία πλήρωσης με οπτοπλινθοδομές από διάτρητους οπτόπλινθους και
- αφετέρου γίνεται εφαρμογή του νέου προκατασκευασμένου στοιχείου ως στοιχείο πλήρωσης σε φέροντα οργανισμό (στύλοι και δοκοί) διαμορφούμενο με χαλύβδινα στοιχεία.

Το νέο προκατασκευασμένο δομικό στοιχείο είναι σύνθετο και αποτελείται από δύο πετάσματα ελαφρώς οπλισμένου σκυροδέματος, πάχους 5 cm έκαστο, τα οποία συνδέονται εκατέρωθεν κατακόρυφων (και ενίοτε διαγώνιων) κοιλοδοκών. Οι κοιλοδοκοί απέχουν μεταξύ τους 0,70 m – 1.00 m και τα διάκενα μεταξύ τους πληρώνονται με θερμομονωτικό υλικό, συνήθως διογκωμένη ή εξηλασμένη πολυστερίνη. Τα προκατασκευασμένα στοιχεία συνδέονται μεταξύ τους και με τα χαλύβδινα φέρονται στοιχεία με ειδική συνδεσμολογία, η οποία αναπτύχθηκε για τις ανάγκες της κατασκευής.

Για τον υπολογισμό της καταναλισκόμενης ενέργειας και των παραγόμενων ρύπων έγινε η παραδοχή ότι για τη θέρμανση της κατοικίας και την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης χρησιμοποιείται λέβητας αερίου, ενώ η ψύξη υποστηρίζεται από αντλία θερμότητας αέρα-αέρα.



Σχήμα 1. Τρισδιάστατη απεικόνιση και κάτοψη του εξεταζόμενου κτιρίου [5].

2.2. Μεθοδολογία ενεργειακής αξιολόγησης

Η ενεργειακή απόδοση των δύο κτιρίων και των παραλλαγών τους αξιολογήθηκε με το εργαλείο δυναμικής προσομοίωσης EnergyPlus. Η ανάλυση στηρίχθηκε στις μηνιαίες ετήσιες απαιτήσεις σε θέρμανση και ψύξη, οι οποίες προκύπτουν με τη θεώρηση του ιδεατού συστήματος (ideal load HVAC system), καθώς και στο σύνολο των απαιτήσεων, σε ετήσια βάση.

Το προφίλ λειτουργίας των εξεταζόμενων κτιρίων είναι κοινό και παρουσιάζεται στον Πίνακα 1. Οι επί μέρους θεωρήσεις βασίστηκαν στις προδιαγραφές της Τεχνικής Οδηγίας του Τ.Ε.Ε. 20701-1/2017. Ωστόσο, σε κάποιες περιπτώσεις χρειάστηκε να γίνουν επιπλέον παραδοχές, τόσο για λόγους

προσαρμογής του υπολογιστικού βήματος από μηνιαίο σε ωριαίο, όσο και για την πιο ρεαλιστική προσέγγιση της χρήσης των κτιρίων. Για παράδειγμα, έγινε η παραδοχή πως κατά τη θερινή περίοδο επιτελείται επιπλέον νυχτερινός φυσικός αερισμός, όταν η εξωτερική θερμοκρασία αέρα είναι χαμηλότερη της εσωτερικής κατά τουλάχιστον 1°C.

Πίνακας 1: Το προφίλ λειτουργίας των εξεταζόμενων κτιρίων που λήφθηκε υπόψη στην προσομοίωση της ενεργειακής συμπεριφοράς τους [6-7].

Παράμετρος	Μονάδα	Τιμή	Περίοδος λειτουργίας
Κατοίκηση	Άτομα/100 m^2	5	7/7, 12/12 Συντελεστής παρουσίας 100%: 00:00-07:00, 17:00-00:00 Συντελεστής παρουσίας 50%: 07:00-17:00
Φυσικός αερισμός	m^3/s/άτομο	0,042	Σύμφωνα με το ωράριο λειτουργίας
Νυχτερινός αερισμός	Εναλλαγές αέρα ανά ώρα	15	Κατά τη θερινή περίοδο, από 00:00 έως 08:00, όταν η εξωτερική θερμοκρασία είναι χαμηλότερη από την εσωτερική κατά τουλάχιστον 1°C.
Αερισμός διείσδυσης	Εναλλαγές αέρα ανά ώρα	0,5	24/24
Φωτισμός	W/m^2	6,4	12/12 Συντελεστής παρουσίας 0: 00:00-07:00 Συντελεστής παρουσίας 0,75: 07:00-00:00
Θερμοστάτης περίοδος θέρμανσης	°C	20	Περίοδος θέρμανσης (ανάλογα με την κλιματική ζώνη)
Θερμοστάτης περίοδος ψύξης	°C	26	Περίοδος ψύξης (ανάλογα με την κλιματική ζώνη)
Θερμικά κέρδη από χρήστες	W/άτομο	80	Σύμφωνα με το ωράριο λειτουργίας
Θερμικά κέρδη από συσκευές	W/m^2	4	Σύμφωνα το ωράριο λειτουργίας

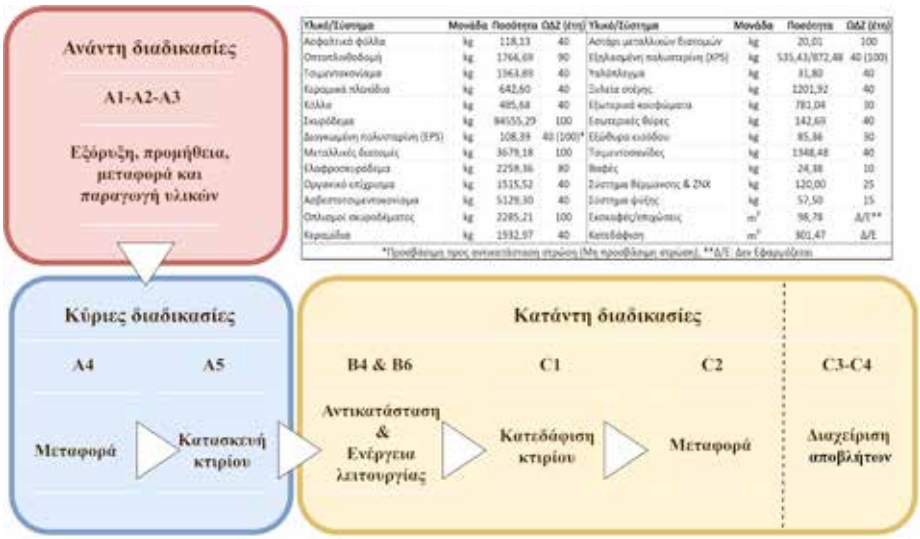
2.3. Μεθοδολογία περιβαλλοντικής αξιολόγησης

Η περιβαλλοντική αξιολόγηση αφορά στην Ανάλυση Κύκλου Ζωής των εξεταζόμενων κτιρίων σύμφωνα με τις αρχές των προτύπων ISO 14040, ISO 14044, EN 15804 και EN 15978. Υπολογίζονται δηλαδή οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις κατά τη διάρκεια ζωής των κτιρίων, για όλες τις διαδικασίες εντός των ορίων του υπό μελέτη συστήματος.

Τα δεδομένα-απογραφές του κύκλου ζωής προέρχονται από τη βάση περιβαλλοντικών δεδομένων Ecoinvent. Κάθε άλλη απαιτούμενη πληροφορία ή δεδομένο εισαγωγής (π.χ. ποσότητες και ιδιότητες υλικών/στοιχείων, αποστάσεις μεταφοράς, κ.α.) προέρχονται από την αρχιτεκτονική και στατική μελέτη, την εταιρεία κατασκευής του κτιρίου και την ελληνική αγορά.

Με τη χρήση αυτών των δεδομένων προκύπτει ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος όλων των ανάντη (A1-A3) και κύριων (A4-A5) διαδικασιών (Σχήμα 2). Για την κατάντη διαδικασία B4, η Ωφέλιμη Διάρκεια Ζωής (ΩΔΖ) των υλικών και των συστημάτων (και κατ΄ επέκταση η ενδεχόμενη αναγκαιότητα αντικατάστασής τους κατά τη διάρκεια ζωής του κτιρίου) εκτιμήθηκε με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία και τα πρότυπα ISO 15686-8 και EN 15459. Οι επιπτώσεις κατά τη διάρκεια λειτουργίας του κτιρίου (κατάντη διαδικασία B6) προέκυψαν από τον υπολογισμό των ενεργειακών καταναλώσεων του κτιρίου και το είδος των Η/Μ συστημάτων. Για το τέλος του κύκλου της ζωής των εξεταζόμενων κτιρίων έγινε ο υπολογισμός των κατάντη διαδικασιών C1 και C2, κάνοντας τις παραδοχές της χρήσης υδραυλικού εκσκαφέα για την κατεδάφιση και της μεταφοράς των οικοδομικών αποβλήτων σε απόσταση 50km για την απόθεσή τους. Δεν έγινε θεώρηση της περαιτέρω διαχείρισης των οικοδομικών αποβλήτων, λόγω έλλειψης διαθέσιμων αξιόπιστων πληροφοριών στον Ελλαδικό χώρο.

Ο υπολογισμός των περιβαλλοντικών επιπτώσεων κατά τη διάρκεια ζωής του κτιρίου αφορά σε πεντηκονταετή διάρκεια ζωής κτιρίου και βασίζεται στους δείκτες περιβαλλοντικών επιπτώσεων που αναφέρονται στις μεθόδους CML-IA Baseline και Cumulative Energy Demand (CED), σύμφωνα με την οδηγία PCR-Product Category Rule 2014:02 για τα κτίρια υπό το πρίσμα του Συστήματος Περιβαλλοντικής Δήλωσης Προϊόντων (Environmental Product Declaration system - EPD).



Υλικό/Σύστημα	Μονάδα	Ποσότητα	ΩΔΖ (έτη)	Υλικό/Σύστημα	Μονάδα	Ποσότητα	ΩΔΖ (έτη)
Ασφαλτικά φύλλα	kg	118,13	40	Άοπλο μεταλλικών διατομών	kg	20,01	100
Οπτοπλινθοδομή	kg	1764,69	90	Εξηλασμένη πολυστερίνη (XPS)	kg	535,43/872,48	40 (100)
Τσιμεντοκονίαμα	kg	1363,89	40	Υαλοπίνακας	kg	81,80	40
Κεραμικά πλακίδια	kg	642,60	40	Σιλικόνη στέγης	kg	1201,92	40
Κόλλα	kg	405,68	40	Εξωτερικά κουφώματα	kg	781,04	30
Σκυρόδεμα	kg	84555,29	100	Εσωτερικές θύρες	kg	142,69	40
Διογκωμένη πολυστερίνη (EPS)	kg	108,39	40 (100)*	Εξώθυρα εισόδου	kg	85,86	30
Μεταλλικές διατομές	kg	3679,18	100	Τσιμεντοσανίδες	kg	1348,48	40
Ελαφροσκυρόδεμα	kg	2259,36	80	Βαφές	kg	24,38	10
Οργανικό επίχρισμα	kg	1515,52	40	Σύστημα θέρμανσης & ΖΝΧ	kg	120,00	25
Ασβεστοτσιμεντοκονίαμα	kg	5128,30	40	Σύστημα ψύξης	kg	57,50	15
Όλμοροί σκυροδέματος	kg	2285,21	100	Εκσκαφές/επιχώσεις	m^3	98,78	Δ/Τ**
Κεραμίδια	kg	1932,97	40	Κατεδάφιση	m^3	801,47	Δ/Ε

*Προσθήκη προς αντικατάσταση στρώσης (Μη προσθήκη στρώσης). **Δ/Τ: Δεν Εφαρμόζεται

Σχήμα 2. Τα όρια του συστήματος, και οι διαδικασίες για την ανάλυση του κύκλου ζωής για τα εξεταζόμενα κτίρια. Πίνακας υλικών/παραδοχών/ποσοτήτων του προκατασκευασμένου κτιρίου.

2.4. Σενάρια παραμετρικής ανάλυσης

Όπως ήδη αναφέρθηκε, οι δύο βασικές μονάδες που εξετάζονται στο πλαίσιο της εργασίας διαφοροποιούνται ως προς τα υλικά κατασκευής τους: το ένα ακολουθεί τη λογική της συμβατικής δόμησης και το άλλο δομείται με το νέο προκατασκευασμένο στοιχείο SUPRIM.

Για αυτές τις δύο βασικές μορφές κτιρίων διενεργείται παραμετρική ανάλυση, η οποία στοχεύει στη διερεύνηση των αλλαγών στην ενεργειακή και περιβαλλοντική συμπεριφορά των κτιρίων με άξονες το βαθμό θερμομονωτικής προστασίας των συμπαγών κατακόρυφων στοιχείων και τις κλιματικές συνθήκες.

Προς αυτή την κατεύθυνση εξετάζονται τα σενάρια θερμομονωτικής προστασίας των τοιχοποιιών των εξεταζόμενων κτιρίων με τοποθέτηση εξηλασμένης πολυστερίνης στην εξωτερική τους πλευρά με πάχος 5 cm, 10 cm, 15 cm και 20 cm. Σε όλες τις περιπτώσεις η επικάλυψη γίνεται με οργανικό επίχρισμα πάχους 0,7cm.

Τα σενάρια αυτά εξετάζονται σε διαφορετικές κλιματικές συνθήκες, θεωρώντας ότι τα εξεταζόμενα κτίρια βρίσκονται στις τέσσερεις κλιματικές ζώνες της χώρας, και συγκεκριμένα στο Ηράκλειο (Ζώνη Α, Γ.Π. 35º19'Ν; Γ.Μ. 25º08'Ε), στην Αθήνα (Ζώνη Β, Γ.Π. 37º58'Ν; Γ.Μ.. 23º42'Ε), στη Θεσσαλονίκη (Ζώνη Γ, Γ.Π. 3740º38'Ν; Γ.Μ.. 22º56'Ε) και στα Γρεβενά (Ζώνη Δ, Γ.Π. 40º05'Ν; Γ.Μ. 21º25'Ε).

Στον πίνακα 2 παρουσιάζονται όλα τα εξεταζόμενα σενάρια.

Πίνακας 2: Τα εξεταζόμενα σενάρια.

Ονομασία σεναρίου	Τύπος δόμησης τοιχοποιιών	Πάχος θερμομόνωσης	Συντελεστής θερμοπερατότητας	Κλιματική ζώνη
A-CONV5	Συμβατικός	0,05 m	0,472 W/(m² K)	A
A-CONV10	Συμβατικός	0,10 m	0,278 W/(m² K)	A
A-CONV15	Συμβατικός	0,15 m	0,197 W/(m² K)	A
A-CONV20	Συμβατικός	0,20 m	0,472 W/(m² K)	A
A-SUPRIM5	Προκατ. στοιχ. SUPRIM	0,05 m	0,153 W/(m² K)	A
A-SUPRIM10	Προκατ. στοιχ. SUPRIM	0,10 m	0,222 W/(m² K)	A
A-SUPRIM15	Προκατ. στοιχ. SUPRIM	0,15 m	0,167 W/(m² K)	A
A-SUPRIM20	Προκατ. στοιχ. SUPRIM	0,20 m	0,134 W/(m² K)	A
B-CONV5	Συμβατικός	0,05 m	0,472 W/(m² K)	B
B-CONV10	Συμβατικός	0,10 m	0,278 W/(m² K)	B
B-CONV15	Συμβατικός	0,15 m	0,197 W/(m² K)	B
B-CONV20	Συμβατικός	0,20 m	0,472 W/(m² K)	B
B-SUPRIM5	Προκατ. στοιχ. SUPRIM	0,05 m	0,153 W/(m² K)	B
B-SUPRIM10	Προκατ. στοιχ. SUPRIM	0,10 m	0,222 W/(m² K)	B
B-SUPRIM15	Προκατ. στοιχ. SUPRIM	0,15 m	0,167 W/(m² K)	B
B-SUPRIM20	Προκατ. στοιχ. SUPRIM	0,20 m	0,134 W/(m² K)	B
C-CONV5	Συμβατικός	0,05 m	0,472 W/(m² K)	Γ
C-CONV10	Συμβατικός	0,10 m	0,278 W/(m² K)	Γ
C-CONV15	Συμβατικός	0,15 m	0,197 W/(m² K)	Γ
C-CONV20	Συμβατικός	0,20 m	0,472 W/(m² K)	Γ
C-SUPRIM5	Προκατ. στοιχ. SUPRIM	0,05 m	0,153 W/(m² K)	Γ
C-SUPRIM10	Προκατ. στοιχ. SUPRIM	0,10 m	0,222 W/(m² K)	Γ
C-SUPRIM15	Προκατ. στοιχ. SUPRIM	0,15 m	0,167 W/(m² K)	Γ
C-SUPRIM20	Προκατ. στοιχ. SUPRIM	0,20 m	0,134 W/(m² K)	Γ
D-CONV5	Συμβατικός	0,05 m	0,472 W/(m² K)	Δ
D-CONV10	Συμβατικός	0,10 m	0,278 W/(m² K)	Δ
D-CONV15	Συμβατικός	0,15 m	0,197 W/(m² K)	Δ
D-CONV20	Συμβατικός	0,20 m	0,472 W/(m² K)	Δ
D-SUPRIM5	Προκατ. στοιχ. SUPRIM	0,05 m	0,153 W/(m² K)	Δ
D-SUPRIM10	Προκατ. στοιχ. SUPRIM	0,10 m	0,222 W/(m² K)	Δ
D-SUPRIM15	Προκατ. στοιχ. SUPRIM	0,15 m	0,167 W/(m² K)	Δ
D-SUPRIM20	Προκατ. στοιχ. SUPRIM	0,20 m	0,134 W/(m² K)	Δ

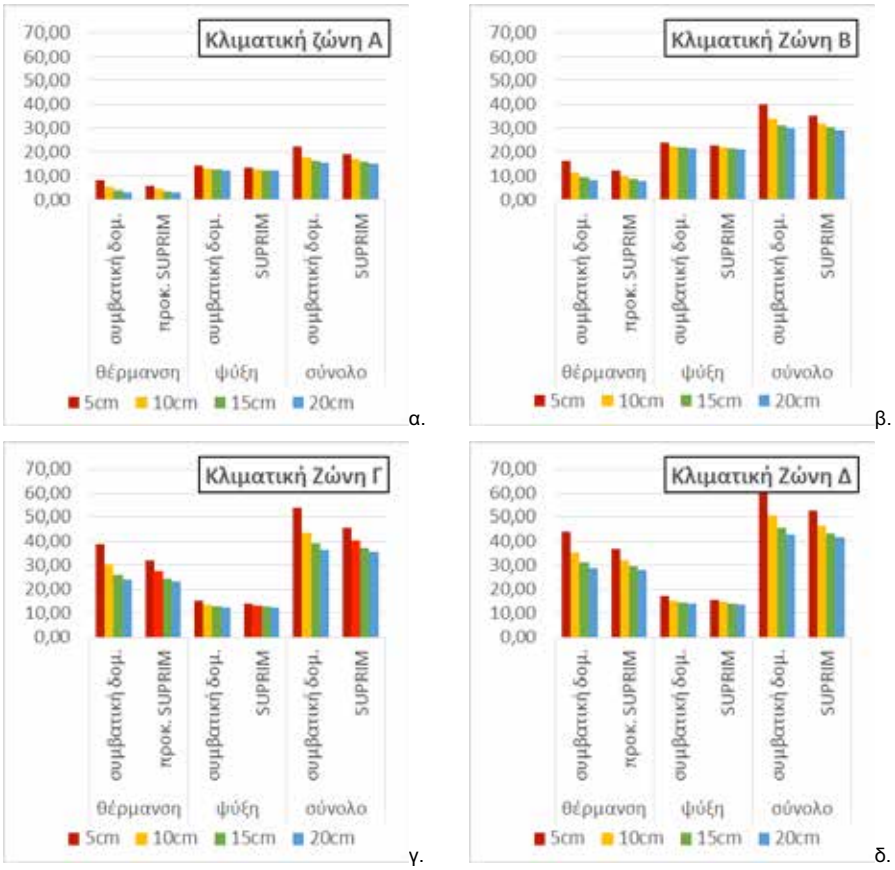
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στις ενότητες που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ενεργειακής και περιβαλλοντικής αξιολόγησης των εξεταζόμενων περιπτώσεων κτιρίων.

3.1. Εκτίμηση της ενεργειακής απόδοσης των εξεταζόμενων κτιρίων

Στο Σχήμα 3 παρουσιάζονται απαιτήσεις σε θέρμανση και ψύξη, καθώς και οι συνολικές απαιτήσεις, σε ετήσια βάση, για κάθε κλιματική ζώνη χωριστά, τόσο για το συμβατικό, όσο και για το προκατασκευασμένο κτίριο. Οι συνολικές απαιτήσεις ενέργειας (για θέρμανση και ψύξη) κυμαίνονται από 20 kWh/m^2 έως 60 kWh/m^2 και σε γενικές γραμμές παρατηρείται χαμηλότερη ενεργειακή απαίτηση στις παραλλαγές του προκατασκευασμένου κτιρίου. Όπως είναι λογικό εμφανίζονται χαμηλότερα επίπεδα ενεργειακής απαίτησης στη ζώνη Α και υψηλότερα στη ζώνη Δ..

Στη θερμότερη κλιματική ζώνη της χώρας, τη ζώνη Α, η απαίτηση σε ενέργεια είναι πάντα υψηλότερη στις περιπτώσεις της συμβατικής δόμησης κατά περίπου 2% και 15%. Είναι αξιοσημείωτο ότι η διαφορά στην απαίτηση ενέργειας μεταξύ της συμβατικής και της προκατασκευασμένης κατοικίας μειώνεται, καθώς το πάχος της θερμομονωτικής προστασίας αυξάνεται. Επίσης, στη ζώνη Α οι απαιτήσεις σε ψύξη είναι μέχρι και 4 φορές υψηλότερες σε σχέση με τις απαιτήσεις σε θέρμανση. Μάλιστα, η διαφορά αυτή αυξάνεται όσο ισχυροποιείται η θερμομονωτική προστασία. Αυτό αποδίδεται στο ότι με τη θερμική θωράκιση του κελύφους μειώνονται οι ροές θερμότητας, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια του χειμώνα, χωρίς να προκαλείται όμως αντίστοιχη μείωση και στους θερινούς μήνες, κατά τους οποίους καθοριστικό ρόλο διαμόρφωσης του ενεργειακού ισοζυγίου έχουν τα ηλιακά θερμικά κέρδη. Ομοίως, η μέγιστη διαφορά στις απαιτήσεις ψύξης μεταξύ των δύο τύπων κατασκευής δεν ξεπερνούν το 6%, ενώ η μέγιστη διαφορά στις απαιτήσεις θέρμανσης πλησιάζει το 29%.



Σχήμα 3. Οι απαιτήσεις ενέργειας για θέρμανση και ψύξη, καθώς και η συνολική ενεργειακή απαίτηση τους για τις εξεταζόμενες περιπτώσεις κτιρίων σε σχέση με το πάχος της θερμομόνωσης για κάθε μία κλιματική ζώνη χωριστά.

Παρόμοιες τάσεις παρατηρούνται και στην περίπτωση που τα κτίρια εξετάζονται στην κλιματική ζώνη Β. Και πάλι, οι ενεργειακές απαιτήσεις είναι χαμηλότερες για το κτίριο που ενσωματώνει το νέο προκατασκευασμένο δομικό στοιχείο SUPRIM, αλλά οι διαφορές κυμαίνονται σε χαμηλότερα επίπεδα, μεταξύ 2% και 12%. Υψηλές διαφορές παρατηρούνται στις απαιτήσεις θέρμανσης (4,5% έως 24% ανάλογα με το πάχος θερμομόνωσης), ενώ οι διαφορές στην απαίτηση ψύξης είναι πολύ χαμηλότερες (1,3% έως 4,7%), παρόλο που το μέγεθος διπλασιάζεται στη ζώνη Β σε σχέση με τη ζώνη Α.

Το ενεργειακό προφίλ των εξεταζόμενων κτιρίων αλλάζει σημαντικά όταν αυτά τοποθετούνται στις ψυχρότερες κλιματικές ζώνες. Συγκεκριμένα, όταν το κτίριο τοποθετείται στη Θεσσαλονίκη, η απαίτηση σε θέρμανση αυξάνεται σημαντικά και υπερισχύει της ψύξης. Φαίνεται όμως ότι και στο ψυχρότερο κλίμα το προκατασκευασμένο δομικό στοιχείο παρέχει καλύτερη ενεργειακή συμπεριφορά, καθώς σε όλες τις περιπτώσεις η ενεργειακή του απαίτηση είναι χαμηλότερη. Η διαφορά κυμαίνεται από 3% έως 15% στη συνολική ενεργειακή απαίτηση, και από 3% έως 17,5% στην απαίτηση για θέρμανση, ανάλογα με το πάχος της μόνωσης.

Στην κλιματική ζώνη Δ, η απαίτηση σε ψύξη αντιστοιχεί μόνο στο 1/3 της απαίτησης σε θέρμανση. Στην ψυχρότερη κλιματική ζώνη το νέο προκατασκευασμένο δομικό στοιχείο εξακολουθεί να έχει καλύτερη απόδοση σε σχέση με τις συμβατικές τοιχοποιίες, καθώς η διαφορά στην ενεργειακή απαίτηση κυμαίνεται από 3% έως 14%. Οι απαιτήσεις σε θέρμανση εμφανίζουν ακόμη χαμηλότερες τιμές, με τη διαφορά να πλησιάζει στο 16%.

Για την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης, η απαίτηση ενέργειας είναι προφανώς κοινή για τα εξεταζόμενα κτίρια και διαφοροποιείται μόνο σε σχέση με την κλιματική ζώνη. Συγκεκριμένα, η ετήσια απαίτηση ενέργειας ανέρχεται σε 34,67 kWh/m^2, 36,98 kWh/m^2, 39,85 kWh/m^2 και 42,52 kWh/m^2 για τις κλιματικές ζώνες Α, Β, Γ και Δ αντίστοιχα.

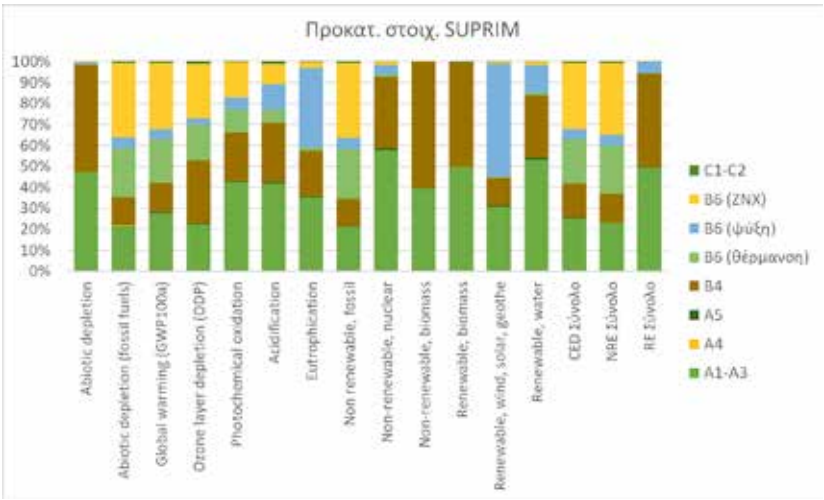
3.2. Εκτίμηση της περιβαλλοντικής απόδοσης των εξεταζόμενων κτιρίων

Τα αποτελέσματα της εκτίμησης της περιβαλλοντικής απόδοσης των κτιρίων που ενσωματώνουν το νέο δομικό στοιχείο παρουσιάζονται στα Σχήματα 4 και 5. Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 4 απεικονίζεται η ποσοστιαία συμμετοχή του αντικτύπου κάθε φάσης του κύκλου ζωής σε κάθε δείκτη που λήφθηκε υπόψη στην ανάλυση, ενώ στο Σχήμα 5 παρουσιάζεται η ποσοστιαία επίδραση κάθε υλικού/συστήματος και διεργασίας στη διαμόρφωση των δεικτών. Και τα δύο σχήματα αναφέρονται στα αποτελέσματα του εξεταζόμενου προκατασκευασμένου κτιρίου όταν αυτό ανήκει στην κλιματική ζώνη Γ και φέρει εξωτερική θερμομονωτική προστασία από εξηλασμένη πολυστερίνη πάχους 10 cm, καθώς η συγκεκριμένη διαμόρφωση είναι η πιο συνήθης για την κατασκευάστρια εταιρεία.

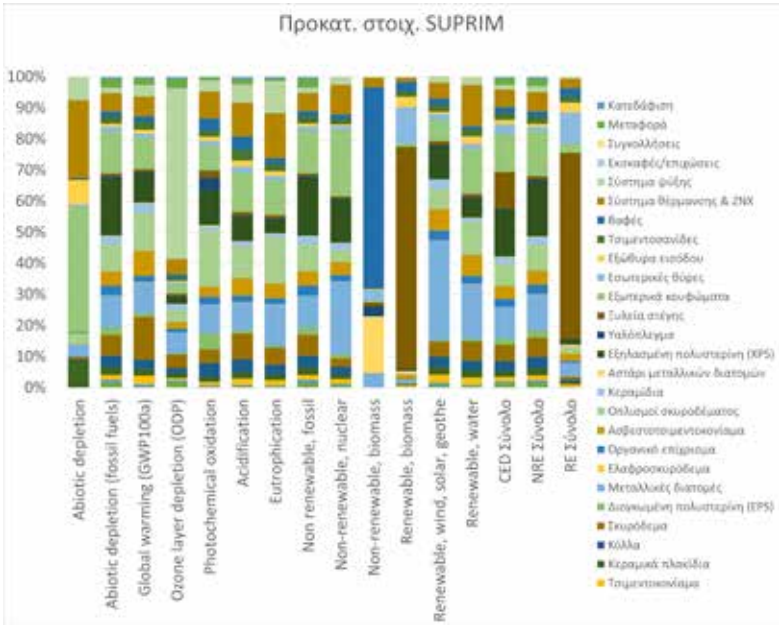
Αντίστοιχοι υπολογισμοί έγιναν και για το συμβατικό κτίριο, για όλα τα πάχη θερμομονωτικής προστασίας και όλες τις κλιματικές ζώνες. Για λόγους οικονομίας χώρου, στην εργασία παρουσιάζεται η συγκριτική ανάλυση των σεναρίων του συμβατικού κτιρίου και του κτιρίου που δομείται με το νέο προκατασκευασμένο δομικό στοιχείο, όταν η θερμομονωτική προστασία των κατακόρυφων δομικών στοιχείων υλοποιείται σε όλες τις ζώνες με 10 cm εξηλασμένης πολυστερίνης.

Όπως γίνεται αντιληπτό από το Σχήμα 4, υπάρχουν σημαντικές διαφορές στη συνεισφορά της κάθε διαδικασίας στο σύνολο των επιπτώσεων του κύκλου ζωής των προκατασκευασμένων εξεταζόμενων κτιρίων. Κατά μέσο όρο, οι ανάντη διαδικασίες (Α1-Α3) αντιστοιχούν περίπου στο 36,6%, ενώ οι κύριες διαδικασίες (Α4-Α5) έχουν πολύ χαμηλότερη επίδραση, μόλις 0,5%, στο συνολικό αντίκτυπο σε όλο τον κύκλο ζωής. Η διαδικασία της αντικατάστασης υλικών ή στοιχείων (Β4) ανέρχεται στο σημαντικό ποσοστό του 28,5%, ενώ η φάση λειτουργίας του κτιρίου (Β6) έχει σημαντικό μερίδιο, ύψους 33,9% (για θέρμανση 9,5%, ψύξη 10,1%, Ζεστό Νερό Χρήσης-ZNX 14,3%). Τέλος, οι κατάντη διαδικασίες (τέλος κύκλου ζωής, C1 και C2) αντιστοιχούν μόλις στο 0,5%, ποσοστό όμως που σχετίζεται με την εξαίρεση των διαδικασιών διαχείρισης των προϊόντων κατεδάφισης από τα όρια του συστήματος λόγω της έλλειψης σχετικών δεδομένων για την ελληνική αγορά.

Αντιστοίχως, για το συμβατικό κτίριο οι ανάντη διαδικασίες (Α1-Α3) αντιστοιχούν στο 34,8% του συνολικού περιβαλλοντικού αντικτύπου, και περίπου το ίδιο συναντάται στη φάση λειτουργίας (Β6: για θέρμανση 10,2%, για ψύξη 10,7%, για ZNX 13,8%). Η φάση της αντικατάστασης υλικών και στοιχείων (Β4) και οι κατάντη διαδικασίες (τέλους κύκλου ζωής, C1 και C2) έχουν το ίδιο μερίδιο με το αντίστοιχο προκατασκευασμένο κτίριο, δηλαδή 28,5% και 0,5% αντίστοιχα. Οι κύριες διαδικασίες (Α4-Α5) είναι αυξημένες στο συμβατικό κτίριο έναντι του προκατασκευασμένου κατά 0,5%-1%, υποδεικνύοντας τη μεγαλύτερη περιβαλλοντική επιβάρυνση της δόμησης επί τόπου του έργου.



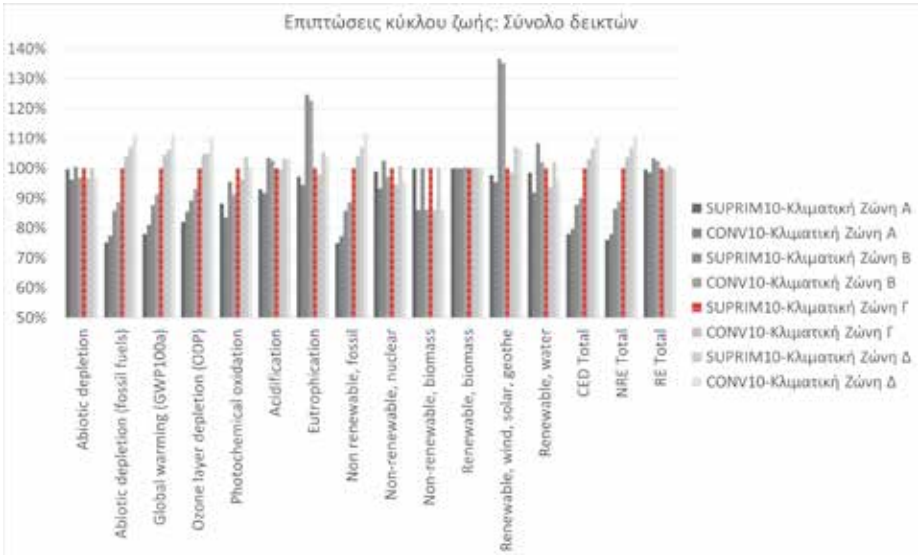
Σχήμα 4. Οι επιπτώσεις κατά τη διάρκεια ζωής του προκατασκευασμένου κτιρίου ανά κατηγορία περιβαλλοντικών επιπτώσεων και διαδικασία, όταν το κτίριο εντάσσεται στην κλιματική ζώνη Γ και φέρει εξωτερική θερμομονωτική προστασία από εξηλασμένη πολυστερίνη πάχους 10 cm.



Σχήμα 5. Η συνεισφορά κάθε υλικού/συστήματος και διεργασίας στη διαμόρφωση των δεικτών εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του προκατασκευασμένου κτιρίου, όταν το κτίριο εντάσσεται στην κλιματική ζώνη Γ και φέρει εξωτερική θερμομονωτική προστασία από εξηλασμένη πολυστερίνη πάχους 10 cm.

Αν εξεταστούν μόνο οι εμπεριεχόμενες περιβαλλοντικές επιπτώσεις (Σχήμα 5) τα αποτελέσματα τόσο για το προκατασκευασμένο όσο και για το συμβατικό κτίριο δείχνουν μια μεγαλύτερη συμμετοχή των κουφωμάτων από συνθετικό υλικό (12,04% και 12,43% αντίστοιχα), του συστήματος θέρμανσης και παραγωγής ΖΝΧ (8,81% και 9,18% αντίστοιχα), της θερμομονωτικής προστασίας (7,78% και 7,93% αντίστοιχα) και του συστήματος ψύξης (7,29% και 7,21% αντίστοιχα). Επιπροσθέτως, στη διαμόρφωση του προφίλ των εμπεριεχόμενων επιπτώσεων συμμετέχουν σημαντικά τα χαλύβδινα στοιχεία στα προκατασκευασμένα κτίρια (11,63%) και οι οπτόπλινθοι (10,5%) στα συμβατικά κτίρια.

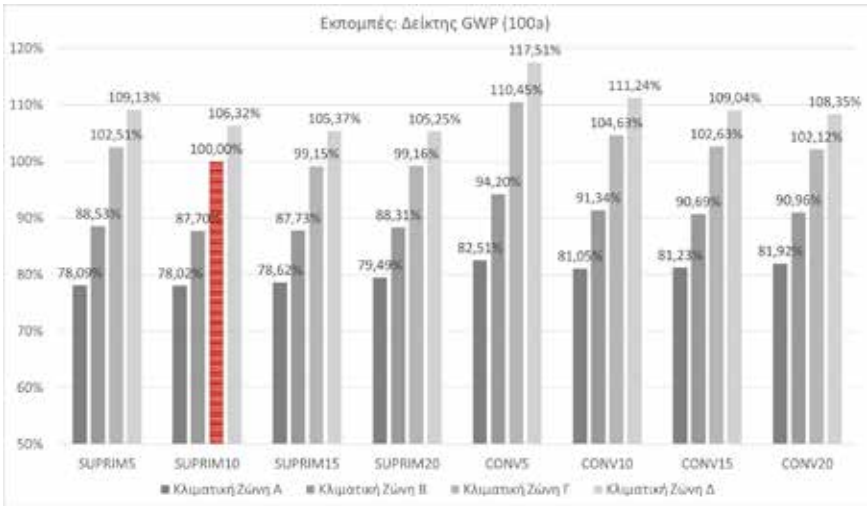
Οι δείκτες περιβαλλοντικών επιπτώσεων δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη, αβιοτική εξάλειψη (των ορυκτών καυσίμων), μείωση του στρώματος του όζοντος, μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας-ορυκτά καύσιμα, ανανεώσιμες πηγές-βιομάζα, μη ανανεώσιμες πηγές-συνολικά και η συνολική-αθροιστική επίπτωση στην ενέργεια (CED Σύνολο) υποδεικνύουν χαμηλότερες επιπτώσεις για το προκατασκευασμένο κτίριο σε σχέση με το συμβατικό (Σχήμα 6). Οι υπόλοιποι δείκτες όμως είναι υψηλότεροι για το προκατασκευασμένο κτίριο. Αυτό οφείλεται γιατί οι συγκεκριμένοι δείκτες σχετίζονται με τη χρήση των χαλύβδινων στοιχείων και των επαλείψεών τους για την προστασία τους από τη διάβρωση κατά τη διάρκεια ζωής τους, καθώς και με τη χρήση του πρόσθετου στρώματος διογκωμένης πολυστερίνης στο διάκενο του προκατασκευασμένου στοιχείου.



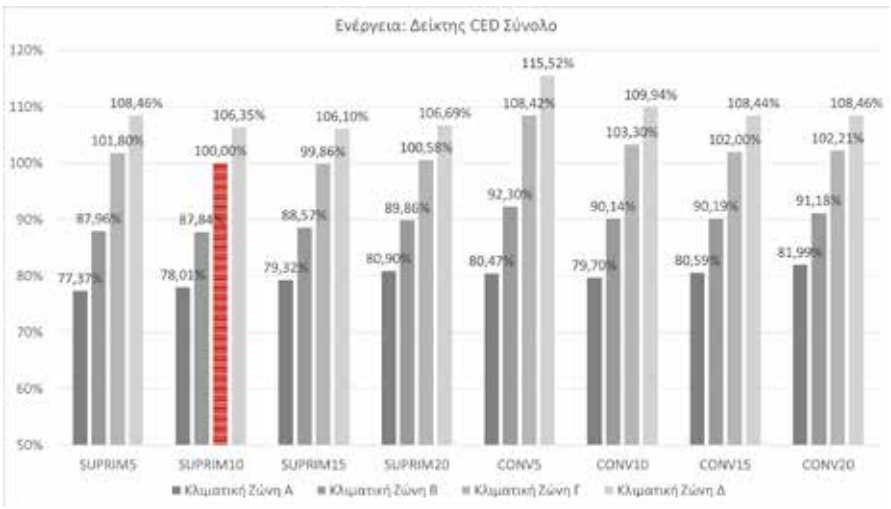
Σχήμα 6. Συγκριτική αξιολόγηση των δεικτών εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων για το προκατασκευασμένο και το συμβατικό κτίριο, στην περίπτωση της εξωτερικής μόνωσης πάχους 10 cm για όλες τις κλιματικές ζώνες (με κόκκινο χρώμα το σενάριο που παρουσιάστηκε εκτενώς στα σχήματα 4 και 5).

Αν η ανάλυση επικεντρωθεί στους δύο βασικούς δείκτες που χαρακτηρίζουν πλέον τις αειφόρες κατασκευές, δηλαδή τις εκπομπές (GWP) και την ενέργεια (CED Σύνολο) καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του κτιρίου, τότε γίνεται εμφανές πως ο συνολικός αντίκτυπος των σεναρίων του συμβατικού κτιρίου είναι υψηλότερος σε σχέση με τα αντίστοιχα του προκατασκευασμένου. Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 7.α. παρουσιάζεται η ποσοστιαία διαφοροποίηση των τιμών του δείκτη για το δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη (GWP) που συσχετίζεται με τις εκπομπές αερίου του θερμοκηπίου για όλα τα σενάρια που εξετάστηκαν, έχοντας ως βάση την αντίστοιχη τιμή του δείκτη για την περίπτωση του προκατασκευασμένου κτιρίου που βρίσκεται στη ζώνη Γ και φέρει εξωτερική θερμομόνωση από εξηλασμένη πολυστερίνη πάχους 10 cm. Από τις υπολογισθείσες τιμές προκύπτει ότι οι συνολικές εκπομπές για το αντίστοιχο σενάριο του συμβατικού κτιρίου είναι κατά 5% υψηλότερες σε σχέση με το προκατασκευασμένο. Επίσης, παρατηρείται ότι στην ίδια κλιματική ζώνη (Γ) οι συνολικές εκπομπές είναι πάντα υψηλότερες για το συμβατικό κτίριο, ανεξαρτήτως του πάχους της εξωτερικής θερμομόνωσης. Το ίδιο ισχύει και στις υπόλοιπες κλιματικές ζώνες.

Αντίστοιχες τάσεις παρατηρούνται και στην περίπτωση του δείκτη που σχετίζεται με τις συνολικές-αθροιστικές επιπτώσεις στην ενέργεια (CED Σύνολο). Στο Σχήμα 7.β. παρουσιάζεται η ποσοστιαία διαφοροποίηση των τιμών του δείκτη για όλα τα σενάρια που εξετάστηκαν σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή που προκύπτει για την περίπτωση του προκατασκευασμένου κτιρίου που βρίσκεται στη ζώνη Γ και φέρει εξωτερική θερμομόνωση από εξηλασμένη πολυστερίνη πάχους 10 cm. Για το αντίστοιχο σενάριο της συμβατικής δόμησης, οι συνολικές επιπτώσεις στην ενέργεια είναι κατά 3% υψηλότερες, ενώ οι διαφορές εντός της ίδιας κλιματικής ζώνης κυμαίνονται από 2% έως 8%. Από τη σύγκριση των σεναρίων μεταξύ τους, προκύπτει ότι το συμβατικό κτίριο παρουσιάζει μεγαλύτερες επιπτώσεις στο δείκτη της ενέργειας σε όλη τη διάρκεια της ζωής του σε σχέση με το προκατασκευασμένο.



α.



β.

Σχήμα 7. Συγκριτική ανάλυση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των δύο τύπων δόμησης αναφορικά με τις εκπομπές (α) και την ενέργεια (β) καθ' όλη τη διάρκεια ζωής τους για όλα τα σενάρια. Με κόκκινο εμφανίζεται η βάση σύγκρισης, που αντιστοιχεί στη βασική μορφή του προκατασκευασμένου στοιχείου (10 cm εξηλασμένης πολυστερίνης, κλιματική ζώνη Γ)

Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί ότι το μέγεθος των επιπτώσεων συσχετίζεται με τις κλιματικές συνθήκες, όπως άλλωστε ήταν αναμενόμενο, λόγω της αλληλεπίδρασης που υπάρχει μεταξύ κλίματος και ενεργειακής απόδοσης κτιρίων. Συγκεκριμένα, κατά τη μετάβαση από την κλιματική ζώνη Α στις ψυχρότερες κλιματικές ζώνες, οι εκπομπές του προκατασκευασμένου κτιρίου αυξάνονται κατά 12,1% στη ζώνη Β, 27,6% στη ζώνη Γ και 33,6% στη Ζώνη Δ. Ανάλογες είναι και οι αυξήσεις στις συνολικές επιπτώσεις σε ενέργεια κατά τη διάρκεια ζωής του κτιρίου (ποσοστιαία αύξηση ίση με 12,3% για τη Ζώνη Β, 27,5% για τη ζώνη Γ και 31,9% για τη ζώνη Δ σε σχέση με τη ζώνη Α).

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ενεργειακή και περιβαλλοντική αξιολόγηση των δύο τύπων κτιρίων έδωσε ενδιαφέροντα αποτελέσματα. Η ενεργειακή απόδοση του προκατασκευασμένου κτιρίου ήταν κατά μέσο όρο βελτιωμένη κατά 15%, με σημαντική τη μείωση στις απαιτήσεις θέρμανσης, που σε κάποιες περιπτώσεις έφτασε το 25%.

Σε συνέχεια της ενεργειακής συμπεριφοράς, η περιβαλλοντική απόδοση εμφανίζεται καλύτερη για το προκατασκευασμένο κτίριο, κυρίως στους δείκτες που αφορούν το δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη και τη συνολική ενέργεια. Και στους δύο τύπους κτιρίων, οι ανάντη διαδικασίες, η φάση λειτουργίας και η διαδικασία της αντικατάστασης διαμορφώνουν σχεδόν ισότιμα τις εμπεριεχόμενες περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε ενέργεια και εκπομπές των εξεταζόμενων κτιρίων. Σημαντικές πηγές αύξησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων είναι τα συνθετικά κουφώματα, το σύστημα θέρμανσης και ψύξης, καθώς και η εξηλασμένη πολυστερίνη που χρησιμοποιείται ως θερμομονωτικό υλικό. Επίσης, σε κάποιες κατηγορίες επιβαρυντική είναι η χρήση των χαλύβδινων στοιχείων για το προκατασκευασμένο κτίριο και των οπτοπλίνθων για το συμβατικό κτίριο.

Με βάση τα παραπάνω, υπάρχει περιθώριο για περαιτέρω βελτίωση της περιβαλλοντικής απόδοσης και των δύο τύπων κτιρίων, προτιμώντας υλικά περισσότερο φιλικά προς το περιβάλλον για τη διαμόρφωση του κελύφους.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία στηρίχθηκε στα αποτελέσματα του ερευνητικού έργου SU.PR.I.M. που συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Ταμείο Περιφερειακής Ανάπτυξης- ΕΤΠΑ) και από εθνικούς πόρους, στο πλαίσιο της δράσης «ΕΡΕΥΝΩ-ΔΗΜΙΟΥΡΓΩ-ΚΑΙΝΟΤΟΜΩ» του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Ανταγωνιστικότητα-Επιχειρηματικότητα και Καινοτομία» (κωδικός έργου Τ1-ΕΔΚ-03042).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] European Commission, 2019, “EU energy in figures-Statistical pocketbook”.

[2] CRES-Centre for Renewable Energy Sources, 2018, “Energy efficiency trends and policies in Greece”.

[3] Apaydin, F., 2011, “Effectiveness of prefabricated house industry's marketing activities and Turkish consumers' buying intentions towards prefabricated house”, Asian Social Science (7), pp. 267-276.

[4] Tsikaloudaki, K., Theodosiou, T., Giarma, C., Kontoleon, K., Aravantinos, D., Tsoka, S., Tsirigoti, D., Karaoulis, A. and Chastas, P. 2019, “Building a new sustainable preconstructed building element”, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 410.

[5] Tsikaloudaki, K., Theodosiou, T., Giarma, C., Kontoleon, K., Aravantinos, D., Tsoka, S., Tsirigoti, D., Chastas, P. and Karaoulis, A., 2020, “Advancing sustainability in prefabricated buildings”, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 588.

[7] Tsoka, S., Theodosiou, T., Papadopoulou K. and Tsikaloudaki K., 2020, “Assessing the energy performance of prefabricated buildings considering different wall configurations and the use of PCMs in Greece”, Energies, 13 (19).

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΟΙΝΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΦΟΙΤΗΤΙΚΩΝ ΕΣΤΙΩΝ ΤΗΣ ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗΣ ΣΧΟΛΗΣ ΤΟΥ ΔΗΜΟΚΡΙΤΕΙΟΥ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΘΡΑΚΗΣ

Α. Γ. Παπατσούνης[1]*, Π. Ν. Μπότσαρης[1]*, Κ. Λυμπερόπουλος[1], Ρ. Ρώτας[2,3]*, Ζ. Κανελλιά[2*], Π. Ηλιάδης[2,4]*, Ν. Νικολόπουλος[2]

[1] Δημοκρίτειο Παν. Θράκης, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Τομέας Υλικών, Διεργασιών και Μηχανολογίας, Εργαστήριο Μηχανολογικού Σχεδιασμού, Ξάνθη,
[2] Ινστιτούτο Χημικών Διεργασιών και Ενεργειακών Πόρων, Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης (ΙΔΕΠ/ΕΚΕΤΑ), Θέρμη,
[3]Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
[4]Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Ξάνθη
*e-mail: adpapat@gmail.com, panmpots@gmail.com, rotas@certh.gr, z.kanellia@certh.gr, iliadis@certh.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Με την ψήφιση του νόμου 4513/2018 και το ΦΕΚ 3154/Β/31-7-20, για τις ενεργειακές κοινότητες στην Ελλάδα, επιταχύνονται οι διαδικασίες ένταξης των αυτοπαραγωγών κοινοτήτων στην ενεργειακή αγορά. Στη παρούσα μελέτη, παρουσιάζεται μια πρώτη εκτίμηση της λειτουργίας του συστήματος παραγωγής θερμότητας της ενεργειακής κοινότητας των φοιτητικών εστιών της Πολυτεχνικής Σχολής του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης. Η ενεργειακή κοινότητα διαθέτει ηλιακούς θερμικούς συλλέκτες, εναλλάκτες θερμότητας, δοχεία αποθήκευσης θερμικής ενέργειας, λέβητα βιομάζας και ψύκτη απορρόφησης, συστήματα ικανά να καλύψουν τις ενεργειακές ανάγκες της κοινότητας των φοιτητών της Πολυτεχνικής Σχολής της Ξάνθης. Η κοινότητα αποτελείται από οκτώ (8) κτήρια φιλοξενίας των φοιτητών, ένα (1) εστιατόριο και ένα (1) αμφιθέατρο. Η εκτίμηση της λειτουργίας του συστήματος παραγωγής θερμικής ενέργειας πραγματοποιείται με την συγκριτική ανάλυση πραγματικών μετρήσεων πεδίου και προσομοιώσεων που πραγματοποιούνται με την χρήση κατάλληλων λογισμικών.

Λέξεις Κλειδιά: *ενεργειακή κοινότητα, αποθήκευση θερμότητας, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, προσομοίωση, TRNSYS, Dymola*

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Με τη θεσμοθέτηση των αυτοπαραγωγών κοινοτήτων, τα επερχόμενα ζητήματα στον ενεργειακό τομέα είναι η κάλυψη των αναγκών, ηλεκτρικών και θερμικών/ψυκτικών από 100% ανανεώσιμες πηγές. Μεγάλο πλεονέκτημα αποτελεί η πληθώρα πρωτογενών πηγών ενέργειας, όπως η ηλιακή, η αιολική, η γεωθερμική κ.α. Η ηλιακή αποτελεί μια από τις πιο διαδεδομένες, τόσο για παραγωγή ηλεκτρισμού όσο και για παραγωγή θέρμανσης/ψύξης, αφού η μέση μηνιαία ολική οριζόντια ακτινοβολία στον ελλαδικό χώρο ξεπερνά τις 1.800 kWh/m^2 [1]. Προκειμένου να ενισχυθεί η αξιοπιστία της, σε βάθος ημερήσιας αλλά και ετήσιας παραγωγής, απαντάται συνήθως σε μεγάλες εφαρμογές σε συνεργασία με λέβητες βιομάζας, είτε σε συμπαραγωγή ηλεκτρισμού θέρμανσης είτε μεμονωμένα για παραγωγή θέρμανσης [2][3].

Πλήθος βιβλιογραφίας, εξετάζει τη βιωσιμότητα, τη λειτουργία και την απόδοση υβριδικών συστημάτων ηλιακών-βιομάζας. Οι Luigi C. et al., ασχολήθηκαν με την κατασκευή ενός καινοτόμου λέβητα βιομάζας, τροφοδοτούμενο από θερμό ρευστό που προέρχεται από ηλιοθερμικά κάτοπτρα, ο οποίος μπορεί να εξυπηρετήσει τόσο τα ηλεκτρικά, όσο και τα θερμικά και μερικά από τα ψυκτικά φορτία του κτιρίου υπό εξέταση. Το μοντέλο τους δεν έχει ακόμα εξεταστεί εμπορικά καθώς λείπουν σημαντικά οικονομοτεχνικά στοιχεία καθώς και αναλύσεις κύκλου ζωής [2]. Οι Soutullo S. et al., διερεύνησαν σε επίπεδο προσομοίωσης, τη λειτουργία ενός συστήματος συμπαραγωγής τηλεθέρμανσης-ηλεκτρισμού για ενδεχόμενη εγκατάσταση σε 3 πιθανές πόλεις της Ισπανίας. Αν και η προσομοίωση έδειξε υψηλή διείσδυση ανανεώσιμων πηγών, δεν έχει υλοποιηθεί για εξακρίβωση των στοιχείων [4].

Οι Francesco C. et al., εκπόνησαν θερμο-οικονομική μελέτη ανάμεσα σε δύο διαφορετικές τεχνολογίες εκμετάλλευσης της ηλιακής ακτινοβολίας, φωτοβολταϊκά πλαίσια και επίπεδου συλλέκτη κενού σε εγκατάσταση συμπαραγωγής ηλεκτρισμού-θέρμανσης/ψύξης. Τα αποτελέσματα κατέδειξαν την αποτελεσματικότητα του συστήματος και την ευαισθησία του συντελεστή απόσβεσης στο μέγεθος του συστήματος αποθήκευσης [5]. Οι Tibor T. S. et al., διερεύνησαν τη δημιουργία μικρογραφίας αγοράς ενέργειας που προέρχεται από σύστημα τηλεθέρμανσης, τροφοδοτούμενο από υβριδικό σύστημα ηλιακό-βιομάζα. Η μελέτη αφορά ένα σύστημα στο οποίο και οι καταναλωτές συνεισφέρουν σε ένα κεντρικό σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Αν και η κοινωνικό-τεχνική μελέτη είναι πολλά υποσχόμενη, ούτε εδώ έχει γίνει ακόμα οικονομοτεχνική για επιβεβαίωση της υλοποιησιμότητας [6].

Επίσης, οι Mohamed K. et al., εξέτασαν τέτοιο υβριδικό σύστημα τροφοδοτώντας σύστημα υψηλής ζήτησης σε ζεστό νερό χρήσης (ZNX), στο Μαρόκο. Τα αποτελέσματα κατέδειξαν την αποτελεσματικότητα και την υλοποιησιμότητα τέτοιου συνδυασμού, για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας, σε περιοχές με υψηλό ηλιακό δυναμικό [7]. Οι Meisam S. et al., αξιολόγησαν διαφορετικά μοντέλα ηλιακών συλλεκτών, σε λειτουργία υβριδικού συστήματος με συμβατικό σύστημα θέρμανσης, για αποθήκευση ψυκτικής ενέργειας. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν την βιωσιμότητα του συστήματος για την υπό εξέταση χρήση, παρόλα αυτά ο συντελεστής απόσβεσης για ηλιακά συστήματα ψύξης είναι ακόμα υψηλότερος των συμβατικών [8]. Η εργασία των Eduardo A. P. et al., πάνω σε σύστημα παραβολικών κατόπτρων-λέβητα βιομάζας-μηχανής οργανικού κύκλου Rankine (Organic Rankine Cycle – ORC) καταλήγει επίσης, σε μη βιωσιμότητα ενός τέτοιου συστήματος που προχωράει σε πώληση της παραγόμενης ενέργειας στο δίκτυο καθώς, προς στιγμήν, τόσο τα κίνητρα όσο και η τεχνολογία που χρησιμοποιείται δεν είναι ενθαρρυντικά [9].

Από την άλλη, οι Heng C. et al., σε εργασία τους για σύστημα συμπαραγωγής ηλεκτρισμού-θέρμανσης, με υβριδικό ηλιακό-βιομάζα, καταδεικνύουν την υψηλή βιωσιμότητα τέτοιων συστημάτων ειδικά τις περιόδους με ανάγκη θέρμανσης, όπου ο συντελεστής απόδοσης του συστήματος αυξάνεται [10]. Τη βιωσιμότητα, με κατάλληλο σχεδιασμό και διαστασιολόγηση, υβριδικού συστήματος ηλιακού-βιομάζας, κατέδειξε και η δουλειά των Fitsum B. et al, που προσομοίωσαν τέτοιο σύστημα τροφοδοτώντας κοντινή βιομηχανία. Η εφαρμογή αφορούσε περιοχή της Αιθιοπίας, περιοχή με υψηλό ηλιακό δυναμικό, όπου η υφιστάμενη κατάσταση παραγωγής ενέργειας είναι χαμηλής αξιοπιστίας και κυρίως παραγόμενη από μη ανανεώσιμες πηγές [11].

Η διαθέσιμη βιβλιογραφία, υποδεικνύει τη βιωσιμότητα τέτοιων υβριδικών συστημάτων σε μεγάλες και μικρές κλίμακες. Η βασική προϋπόθεση φαίνεται να είναι το υψηλό ηλιακό δυναμικό, η ορθή διαστασιολόγηση και το μέγεθος του συστήματος υπό εξέταση. Σημαντικό εργαλείο αποτελούν οι προσομοιώσεις με λογισμικά μεταβατικών συστημάτων τόσο κατά τη φάση σχεδιασμού όσο και κατά την αξιολόγηση λειτουργίας [4][5][7][11]. Παρόλα αυτά, λίγες είναι οι αναφορές στις οποίες έχει διεξαχθεί πειραματική επιβεβαίωση σε εγκατεστημένα συστήματα. Η παρούσα εργασία, σκοπεύει να

παρουσιάσει τη λειτουργία ενός τέτοιου υβριδικού σταθμού, που λειτουργεί στα Κιμμέρια Ξάνθης, στην Βόρειο-ανατολική Ελλάδα [12]. Θα παρουσιαστούν τόσο αποτελέσματα προσομοιώσεων με δύο διαφορετικά λογισμικά σε αντιπαραβολή, όσο και αποτελέσματα πραγματικών μετρήσεων κατά τη λειτουργία του συστήματος.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Το σύστημα βρίσκεται στα Κιμμέρια Ξάνθης, όπου τροφοδοτεί με θερμική ενέργεια τις φοιτητικές εστίες του Δημοκριτείου Πανεπιστημίου Θράκης (ΔΠΘ). Το παλαιό σύστημα θέρμανσης, αποτελούνταν από 2 λέβητες πετρελαίου ισχύος 1,16 MW_{th} και έναν τρίτο σε εφεδρεία της ίδιας ισχύος. Το κεντρικό αυτό σύστημα θέρμανσης, που βρίσκεται σε παρακείμενο κτίριο που ονομάζεται «Ενεργειακό Κέντρο», διαμοίραζε την ενέργεια στο σύμπλεγμα κτιρίων του ΔΠΘ που αποτελούνταν από 8 κτίρια εστιών, 1 αμφιθέατρο και 1 εστιατόριο, υπεύθυνο για την σίτιση των φοιτητών. Τα κτίρια, περιλαμβάνουν, επίσης, δοχεία 2.500 λίτρων το καθένα (εκτός από δύο κτίρια που η χωρητικότητα είναι 4.500 λίτρα) που παρέχουν το απαραίτητο ZNX στο εκάστοτε κτίριο. Χρησιμοποιούν ηλεκτρικές αντιστάσεις των 36 kW_e για θέρμανση του νερού τις ώρες ή τις ημέρες που η κεντρική θέρμανση δε λειτουργεί.

Η υφιστάμενη κατάσταση διαφέρει με την προαναφερθείσα σε επίπεδο παραγωγής ενέργειας, καθώς εκμεταλλεύεται ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για την κάλυψη των αναγκών. Το 2016, στο πλαίσιο του προγράμματος «REUNI», έγινε εγκατάσταση ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού που είχε ως στόχο την 100% αυτονομία του συστήματος θέρμανσης των εστιών των Κιμμερίων και ο προϋπολογισμός του ξεπέρασε το 1 εκατ. € [12]. Το σύστημα πλέον εκμεταλλεύεται την ηλιακή ακτινοβολία για τη θέρμανση νερού, είτε εξυπηρετεί στην απόδοση νερού υψηλότερης θερμοκρασίας από αυτής του δικτύου, προς έναν λέβητα βιομάζας. Ακολουθεί η περιγραφή του υβριδικού αυτού συστήματος, με τη σειρά σύνδεσης να είναι από το ηλιοθερμικό πεδίο προς τα δοχεία TES (Thermal Energy Storage) και τελικά στον λέβητα βιομάζας (άποψη της ενεργειακής κοινότητας του ΔΠΘ στην Εικ.1).

Εικόνα 1: Αέρια φωτογραφία του κτιριακού συμπλέγματος των εστιών των Κιμμερίων Ξάνθης. Φαίνονται, από πάνω αριστερά, το ηλιοθερμικό πεδίο και το ενεργειακό κέντρο που περιέχει τα TES και τον λέβητα βιομάζας [12].

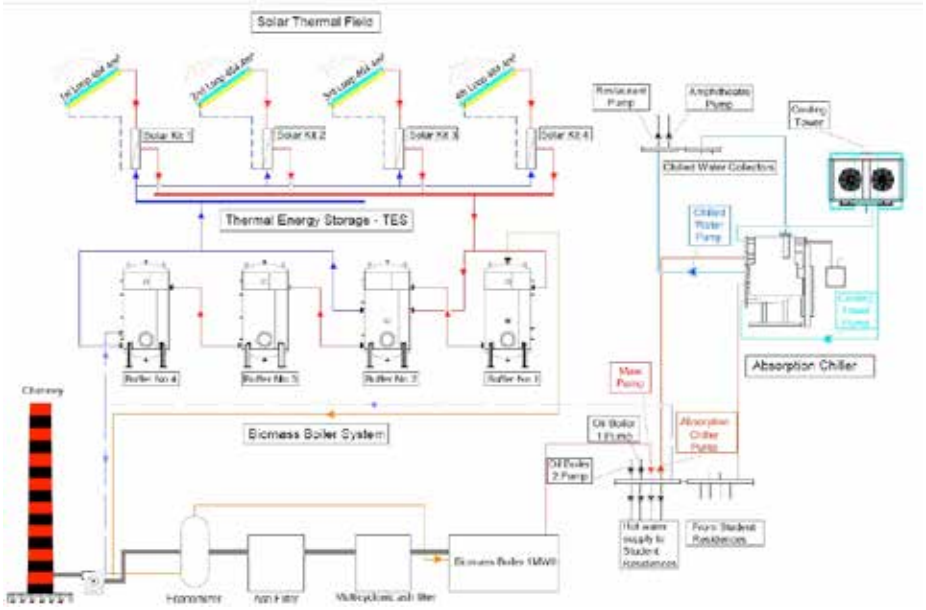
2.1. Ηλιοθερμικοί συλλέκτες

Στο βόρειο-δυτικό σημείο του οικοπέδου των εστιών του ΔΠΘ, εγκαταστάθηκαν 720 ηλιακοί συλλέκτες επιφάνειας 2,58 m^2 ο καθένας, που χρησιμοποιούν ως εργαζόμενο μέσο, μείγμα νερού-γλυκόλης αναλογίας 60/40. Οι συλλέκτες είναι χωρισμένοι σε 4 κλάδους των 180 συλλεκτών. Κάθε κλάδος, ισχύος 295 kW_{th}, εναλλάσσει θερμότητά με έναν ηλιακό σταθμό, ο οποίος περιέχει 1) έναν πλακοειδή εναλλάκτη U-σωλήνα (συντελεστής εναλλαγής 56.640 W/K) στον οποίο γίνεται η εναλλαγή με το νερό που είναι αποθηκευμένο στα 4 δοχεία αποθήκευσης ζεστού νερού TES το καθένα με χωρητικότητα 10 m^3, και 2) τους κυκλοφορητές πρωτεύοντος (μείγμα νερού-γλυκόλης) και δευτερεύοντος (νερό στα TES) δικτύου. Η σειρά φόρτισης των δοχείων καθώς και η συνδεσμολογία πρωτεύοντος και δευτερεύοντος δικτύου απεικονίζονται στην Εικ. 2.

2.2. Λέβητας Βιομάζας

Το νερό που αποθηκεύεται στα TES, δεν καλύπτει απευθείας την κατανάλωση, καθώς αυτά είναι συνδεδεμένα σε σειρά με λέβητα βιομάζας. Ο λέβητας, είναι ισχύος 1,15 MW_{th} και συνοδεύεται από έναν οικονομητήρα 50 kW, ένα πολυκυκλωνικό φίλτρο, ένα σακόφιλτρο σωματιδίων μικρότερων των 10 mg/Nm^3 και μία καπνοδόχο ύψους 12 m και διαμέτρου 640 mm.

Το νέο αυτό σύστημα θέρμανσης είναι συνδεδεμένο παράλληλα με το παλιό σύστημα των λεβήτων πετρελαίου, το οποίο λειτουργεί πλέον ως εφεδρεία [12]. Η λειτουργία του λέβητα βιομάζας έχει ως εξής: είτε παραλαμβάνει το προθερμασμένο νερό από τα TES και ανάλογα με τη ζήτηση ενεργοποιείται και ανεβάζει τη θερμοκρασία του, είτε λειτουργεί ως δοχείο αδρανείας μεταξύ των TES και του συλλέκτη ζεστού νερού της θέρμανσης που τροφοδοτεί τα κτίρια.



Εικόνα 2: Μονογραμμικό σχέδιο της συνδεσμολογίας του υβριδικού συστήματος παραγωγής θερμικής ενέργειας του Ενεργειακού Κέντρου του ΔΠΘ [12].

2.3. Λοιπά Συστήματα

Την καλοκαιρινή περίοδο, λειτουργεί και ένας ψύκτης απορρόφησης θερμότητας $LiBr/H_2O$, ισχύος 316,52 kW_c που συνδυάζεται με έναν πύργο ψύξης 720,5 kW [12]. Ο ψύκτης είναι σε σειρά συνδεδεμένος με τον λέβητα βιομάζας και ενεργοποιείται μετά από εντολή σε τρίοδη ηλεκτροβάνα η οποία κατευθύνει το θερμό νερό αντί προς τον συλλέκτη ζεστού νερού των κτιρίων, προς τον ψύκτη. Η ψυκτική ενέργεια διοχετεύεται μόνο στο αμφιθέατρο του συμπλέγματος των κτιρίων και λόγω του χαμηλού φορτίου είναι εκτός της σκοπιάς της συγκεκριμένης εργασίας.

2.4. Ηλεκτρονικός Έλεγχος

Προκειμένου να διατηρηθεί το σύστημα σε ομαλή λειτουργία και υδραυλική ισορροπία, παρακολουθείται από αισθητήρες που ελέγχουν τις τιμές εισόδου – εξόδου (θερμοκρασίες, πιέσεις, αποδόσεις ισχύος) στο σύστημα. Ο έλεγχος αυτός, περιλαμβάνει συναρτήσεις ελέγχου άλγεβρας Boole που ενεργοποιούν/απενεργοποιούν αντλίες και εναλλάκτες στο πρωτεύον κύκλωμα (πίεση στο πρωτεύον κύκλωμα μεγαλύτερη από 1,5 bar, θερμοκρασία εξόδου από τον πρώτο βρόγχο ηλιακών συλλεκτών μεγαλύτερη από 25°C), προκειμένου να φορτίσουν τα δοχεία. Τα δοχεία με τη σειρά τους, ελέγχονται ως προς το επίπεδο φόρτισής τους και ανάλογα (θερμοκρασία δοχείου 1 υψηλότερη από

τη θερμοκρασία επιστροφής από το σύμπλεγμα κτιρίων), ενεργοποιούνται οι αντίστοιχες τρίοδες βάνες που οδηγούν το αποθηκευμένο ζεστό νερό προς τον λέβητα. Βάσει της λειτουργίας του πραγματικού συστήματος ακολουθεί η παρουσίαση των διατάξεων του συστήματος με τη χρήση δύο διαφορετικών λογισμικών, του TRNSYS 17 και του Dymola 2021.

2.5. Πραγματική λειτουργία - ζητήματα

Αξίζει να αναφερθεί ότι η λειτουργία του συστήματος της ενεργειακής κοινότητας του ΔΠΘ δεν έχει φτάσει ακόμα στο 100% των δυνατοτήτων της. Τεχνικά προβλήματα παρουσιάζονται σε διαφορετικά σημεία του συστήματος, περιορίζοντας έτσι την απόδοση των επιμέρους εξοπλισμών. Συγκεκριμένα, το σύστημα τροφοδοσίας του λέβητα βιομάζας τέλεσε σε περίοδο εκτός λειτουργίας (downtime) για πάνω από έναν χρόνο, θέτοντας την επιλογή της υβριδικής λειτουργίας ανέφικτη [12]. Επιπροσθέτως, κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, όπου οι θερμοκρασίες του ηλιοθερμικού πεδίου είναι υψηλές και αποδίδουν το μέγιστο της ισχύος τους, τα φορτία από τα κτίρια είναι σε χαμηλά επίπεδα, καθώς η πλειοψηφία των φοιτητών απουσιάζει και τα καλοκαιρινά φορτία είναι μόνο φορτία ΖΝΧ. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αυξημένη θερμοκρασία επιστροφής στο πρωτεύον κύκλωμα και την υπερβολική αύξηση της πίεσής του. Η κατάσταση αυτή, οδηγεί συχνά σε άνοιγμα των ασφαλιστικών βανών αδειάζοντας έτσι, μείγμα νερού-γλυκόλης.

Μία ακόμα παράμετρος είναι το ωράριο λειτουργίας του συστήματος θέρμανσης των φοιτητικών εστιών. Ο λέβητας λειτουργεί με χρονοπρόγραμμα, 6 ώρες κάθε μέρα κατά την χειμερινή περίοδο (15 Οκτώβρη με 1 Απριλίου), 3 ώρες το πρωί 6:00-9:00 και 3 το απόγευμα 20:00-23:00. Η λειτουργία αυτή έχει ως αποτέλεσμα να μην υπάρχουν δεδομένα ζήτησης θερμικής ενέργειας καθώς ό,τι παράγεται, καταναλώνεται (συμψηφισμός με απώλειες μεταφοράς, καύσης και μόνωσης κτιρίου).

3. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΩΝ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ TRNSYS 17 / DYMOLA 2021

Η ενεργειακή κοινότητα του ΔΠΘ, όπως περιγράφηκε παραπάνω, απαρτίζεται από ένα πολυσύνθετο σύστημα παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας και από ένα συγκροτημα κτιρίων που διαμένουν οι φοιτητές της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου. Προκειμένου να αξιολογηθεί η λειτουργία και απόδοσή του, κατασκευάστηκαν 2 μοντέλα του συστήματος σε 2 διαφορετικά λογισμικά, το TRNSYS 17 και το Dymola 2021. Τα δύο αυτά λογισμικά, δέχονται σαν είσοδο τις επιμέρους μηχανολογικές διατάξεις ένος συστήματος και προσομοιώνουν τη λειτουργία τους σε βάθος ενός έτους. Προκύπτουν έτσι, γραφικές παραστάσεις των αποδόσεων του εξοπλισμού που αποτελούν βασικό γνώμονα αξιολόγησης είτε υφιστάμενων συστημάτων, είτε δυνητικών.

Τα δύο μοντέλα που σχεδιάστηκαν, έκαναν χρήση μετεωρολογικών δεδομένων για την πόλη της Ξάνθης για το έτος 2018, με πρωτόκολλο ΤΜΥ (Typical Meteorological Year). Τα δεδομένα του πρότυπου ΤΜΥ χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές προσομοιώσεων διαφόρων λογισμικών. Ένα τυπικό μετεωρολογικό έτος (ΤΜΥ) είναι ένα σύνολο μετεωρολογικών δεδομένων με τιμές δεδομένων για κάθε ώρα σε ένα ημερολογιακό έτος για μια δεδομένη γεωγραφική θέση. Τα δεδομένα επιλέγονται από ωριαίες τιμές σε μεγαλύτερο χρονικό διάστημα (συνήθως 10 έτη ή περισσότερο).Η επιλογή των μηνών για το ΤΜΥ γίνεται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο που περιγράφεται στο πρότυπο ISO 15927-4 [13].

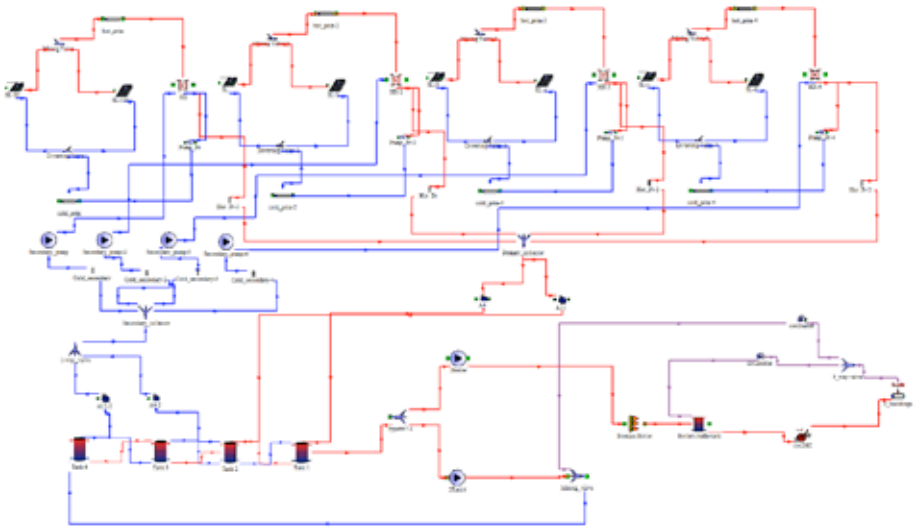
3.1. Μοντελοποίηση του συστήματος με το λογισμικό TRNSYS 17

Το TRNSYS είναι ένα λογισμικό προσομοίωσης δυναμικών μεταβατικών συστημάτων, που χρησιμοποιείται ευρέως από ερευνητές και μηχανικούς για σχεδιασμό, ανάλυση και αξιολόγηση. Είναι λογισμικό ανοικτού κώδικα (χρήση C, C++, Fortran κ.α.), προσφέροντας έτσι την δυνατότητα τροποποίησης παραμέτρων εξοπλισμού αλλά και δημιουργία νέου. Η κύρια λειτουργία του είναι η προσομοίωση συστημάτων παραγωγής και αποθήκευσης ζεστού νερού και ρεύματος, καθώς και η αξιολόγηση της λειτουργίας τέτοιων συστημάτων που τροφοδοτούν πολυζωνικά κτίρια, σε ένα ειδικό περιβάλλον που ονομάζεται Simulation Studio [14].

Ο σχεδιασμός του συστήματος του ΔΠΘ έγινε στο TRSNYS και η Εικ. 3 παρουσιάζει τη συνδεσμολογία του συστήματος στο Simulation Studio. Πρέπει να σημειωθεί, ότι το λογισμικό δεν έχει δυνατότητα προσομοίωσης υδραυλικών παραμέτρων, όπως η μανομετρική διαφορά μεταξύ του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος δικτύου. Επίσης, η μεγάλη απόσταση μεταξύ των βρόγχων ηλιακών συλλεκτών και των εναλλακτών, στην πραγματικότητα αντιμετωπίζεται με σύστημα «ανάστροφης επιστροφής», μεταβάλλοντας δηλαδή σε συγκεκριμένα σημεία του κυκλώματος τις διατομές των

σωληνώσεων προκειμένου να αντιμετωπισθεί η πτώση πίεσης χωρίς τη χρήση ρυθμιστικών βανών. Στην προσομοίωση, η πτώση πίεσης των σωληνώσεων είναι αμελητέα. Εξαιτίας της αδυναμίας του λογισμικού να συμπεριλάβει φαινόμενα πίεσης, έχουν παραλειφθεί και τα δοχεία διαστολής που υπάρχουν στο πραγματικό σύστημα (4 δοχεία διαστολής, ένα για κάθε βρόγχο, το καθένα χωρητικότητας 600 λίτρων).

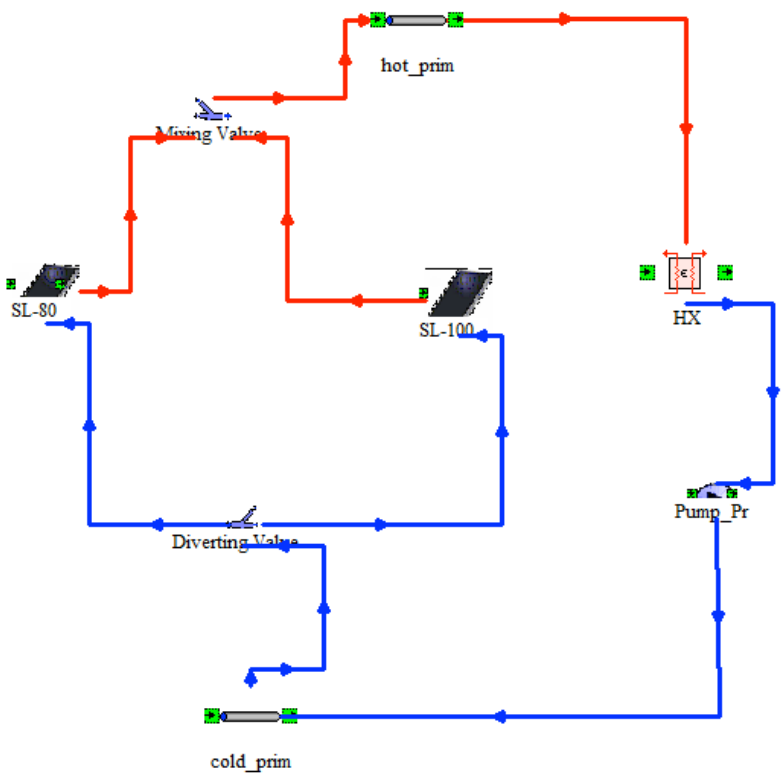
.



Εικόνα 3: Το σύστημα παραγωγής ενέργειας του υβριδικού συστήματος του ΔΠΘ στο Simulation Studio του TRNSYS 17.

Μία ακόμα διαφοροποίηση του συστήματος στην προσομοίωση από το πραγματικό, είναι η λειτουργία των αντλιών. Οι πραγματικές αντλίες είναι μεταβλητής ισχύος (inverter) και λειτουργούν σε ένα εύρος τιμών παροχής (συναρτήσει του μανομετρικού) μεταξύ του 0 και της ονομαστικής παροχής τους. Οι αντλίες στην προσομοίωση ακολουθούν λογική 0 ή 1, λειτουργούν δηλαδή είτε πλήρως, είτε καθόλου, βάσει των συνθηκών ελέγχου που τις ρυθμίζουν.

Η ευαισθησία του συστήματος έγκειται στο μέγεθος του φορτίου, της απαιτούμενης θερμικής ισχύος από τα κτίρια και ταυτίζεται έτσι με την πραγματική κατάσταση λειτουργίας.



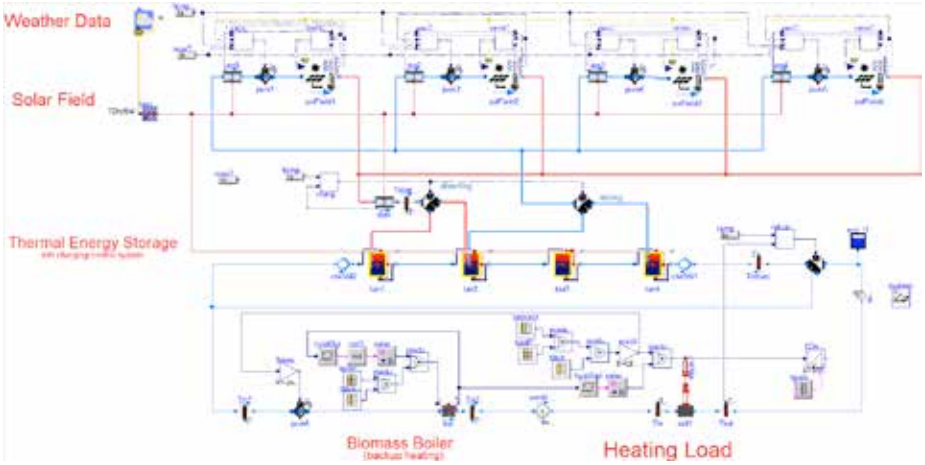
Εικόνα 4: Άποψη του πρωτεύοντος κυκλώματος νερού-γλυκόλης, όπως παραστάθηκε στο Simulation Studio του TRNSYS 17

3.2. Μοντελοποίηση του συστήματος με το λογισμικό Dymola

Το λογισμικό Dymola υποστηρίζει, μεταξύ άλλων, την ανάλυση ηλεκτρομηχανολογικών εγκαταστάσεων μέσω της γλώσσας Modelica. Η Modelica είναι μια αντικειμενοστραφής γλώσσα μοντελοποίησης σύνθετων φυσικών συστημάτων που βασίζεται σε εξισώσεις. Όπως κάθε αντικειμενοστραφής γλώσσα, αποτελείται από κλάσεις και τα στιγμιότυπα αυτών, τα οποία καλούνται αντικείμενα. Διαθέτει τη δυνατότητα επίλυσης διαφορικών-αλγεβρικών συνεχών εξισώσεων, καθώς και συστημάτων που περιλαμβάνουν διακριτές εξισώσεις. Η γλώσσα αυτή έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν εξειδικευμένοι αλγόριθμοι για την αποτελεσματική διαχείριση πολύπλοκων μοντέλων με περισσότερες από εκατό χιλιάδες εξισώσεις. Το βασικό της πλεονέκτημα είναι η μη-αιτιακή (acausal) ανάλυση δυναμικών συστημάτων, η οποία τη διαφοροποιεί από τις παραδοσιακά δομημένες διαδικασίες όπου η ροή των σημάτων εισόδου και εξόδου είναι αποκλειστικά προς μια κατεύθυνση. Με αυτό τον τρόπο διευκολύνεται η επαναχρησιμοποίηση ανεπτυγμένων δομών.

Η ανάπτυξη του μοντέλου πραγματοποιήθηκε στο γραφικό περιβάλλον του Dymola. Το μοντέλο αποτελείται από στοιχεία μηχανικών διατάξεων και στοιχεία λογικού ελέγχου. Στη γλώσσα Modelica διατίθεται ένας σημαντικός αριθμός βιβλιοθηκών ανοικτού κώδικα με μεγάλο εύρος δυνατοτήτων μοντελοποίησης. Για την ανάλυση του εγκατεστημένου υβριδικού συστήματος στο ΔΠΘ αξιοποιήθηκε η βιβλιοθήκη ανοικτού κώδικα Buildings, η οποία δίνει τη δυνατότητα προσομοίωσης συστημάτων θέρμανσης-ψύξης-κλιματισμού κτηριακών εγκαταστάσεων [15]. Ταυτόχρονα, η σχεδίαση των

διαδικασιών ελέγχου ακολούθησε τις κατευθύνσεις λειτουργίας του Κέντρου Ελέγχου του Ενεργειακού Συστήματος του ΔΠΘ, όπως έχουν περιγραφεί στο υποκεφάλαιο 2.4. Η διαγραμματική απεικόνιση του μοντέλου που αναπτύχθηκε παρουσιάζεται στην Εικόνα 5. Τα συστήματα ελέγχου βασίζονται στη δυνατότητα της γλώσσας Modelica να αναθέτει διακριτές τιμές στις μεταβλητές εξόδου, κατά την πραγματοποίηση ορισμένων συμβάντων. Αυτή η δυνατότητα συνδυαστικής επίλυσης διακριτών και συνεχών συστημάτων εξισώσεων που παρέχεται από τη Modelica, οδηγεί στην αύξηση της υπολογιστικής πολυπλοκότητας του συστήματος. Ως αποτέλεσμα των παραπάνω, η προσομοίωση του συστήματος απαιτεί την επίλυση περισσότερων από 10.000 εξισώσεις.



Εικόνα 5: Μοντέλο υβριδικού συστήματος θέρμανσης ΔΠΘ στο γραφικό περιβάλλον του Dymola.

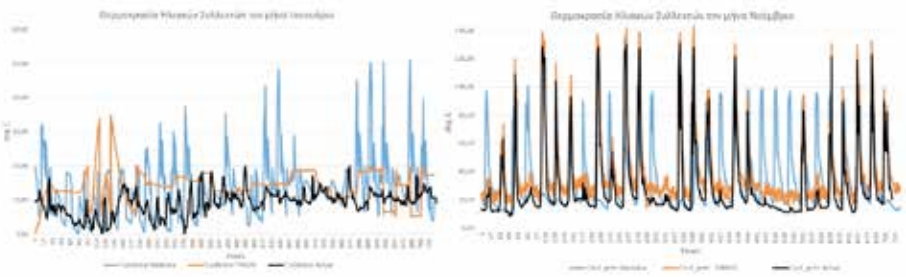
Η ανάλυση του συστήματος ηλιακής θέρμανσης λαμβάνει υπόψη τη διαθέσιμη ακτινοβολία, το ενεργειακό ισοζύγιο του συλλέκτη και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας της εγκατεστημένης διάταξης [12]. Σε ότι αφορά το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας πραγματοποιήθηκε κατακόρυφη διακριτοποίηση των δεξαμενών, ούτως ώστε να λαμβάνεται υπόψη η θερμοκρασιακή κατανομή στο εσωτερικό της.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

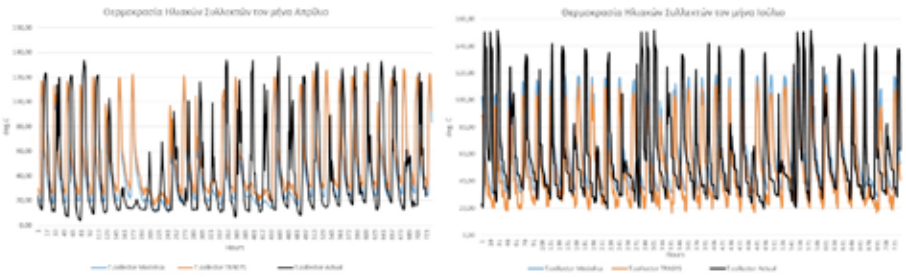
Στην παρούσα ενότητα, παρατίθενται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο λογισμικό TRNSYS και Dymola (γλώσσα Modelica) σε αντιπαραβολή με τα πραγματικά. Πρέπει να αναφερθεί, ότι οι τιμές που αντιστοιχούν στην πραγματική λειτουργία, περιορίζονται στις θερμοκρασίες των συλλεκτών και στην παραγόμενη από το ηλιοθερμικό πεδίο ενέργεια, καθώς η λειτουργία του δευτερεύοντος δεν έχει αξιοποιηθεί όπως έχει σχεδιαστεί (φόρτιση δοχείων είτε από το ηλιοθερμικό πεδίο, είτε από τον λέβητα βιομάζας) εξαιτίας του χρόνου εκτός λειτουργίας του λέβητα. Παρατίθενται, κατά σειρά, διαγράμματα θερμοκρασιών εξόδου των ηλιακών συλλεκτών (προσομοίωση και πραγματικά), η παραγόμενη θερμική ενέργεια από το πρωτεύον δίκτυο (προσομοίωση και πραγματική) και η θερμοκρασία της δεξαμενής 1 (Tank 1) (προσομοίωση και πραγματική, για να αναπαρασταθεί η δυνατότητα λειτουργίας των TES και το θερμοκρασιακό εύρος στο οποίο δυνητικά μπορούν να κυμανθούν όταν το υβριδικό σύστημα λειτουργεί κανονικά). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για 4 ενδεικτικούς μήνες, τον Ιανουάριο, τον Απρίλιο, τον Ιούλιο και τον Νοέμβριο.

4.1. Διαγράμματα λειτουργίας Ηλιοθερμικού Πεδίου

Η λειτουργία του ηλιοθερμικού πεδίου κατά τους χειμερινούς και φθινοπωρινούς μήνες χαρακτηρίζεται γενικά από χαμηλές θερμοκρασίες εξόδου (< 30 ^{o}C) (Εικ. 5), καθώς η οριζόντια προσπίπτουσα ακτινοβολία είναι κατά μέσο όρο χαμηλότερη από 600 W/m^2. Αντίθετα, κατά τους ανοιξιάτικους και καλοκαιρινούς μήνες ή μέση θερμοκρασία συλλεκτών είναι άνω των 50 ^{o}C (Εικ. 6), καθώς η μέση οριζόντια προσπίπτουσα ακτινοβολία είναι πάνω από 1.200 W/m^2.



Εικόνα 5: Θερμοκρασία συλλεκτών τους μήνες Ιανουάριο και Νοέμβριο.

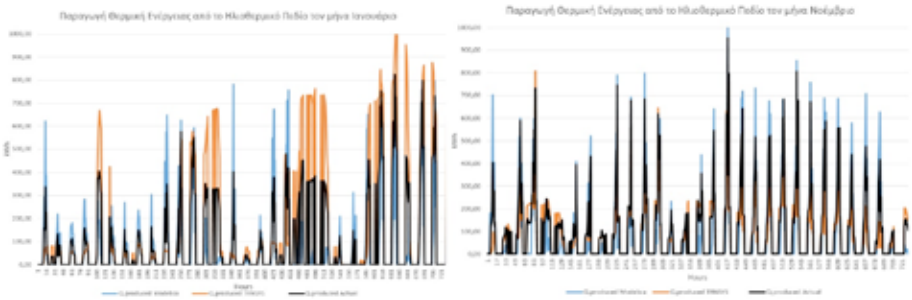


Εικόνα 6: Θερμοκρασία συλλεκτών τους μήνες Απρίλιο και Ιούλιο.

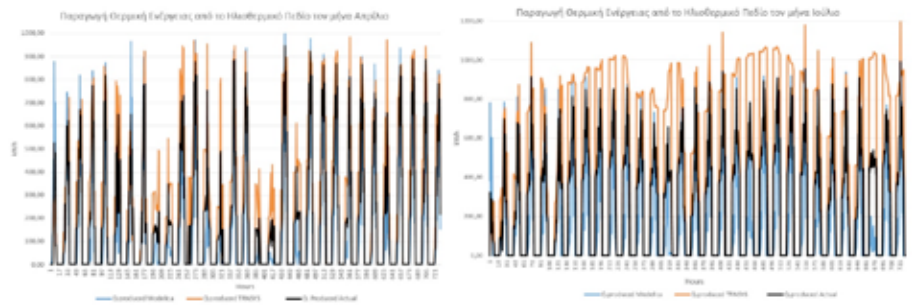
Τους χειμερινούς και φθινοπωρινούς μήνες, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και με τα δύο λογισμικά, δεν αποκλίνουν σημαντικά σε σχέση με το πραγματικό θερμοκρασιακό. Τον Ιανουάριο, παρατηρείται σημαντική απόκλιση των αποτελεσμάτων του λογισμικού Dymola και των πραγματικών λόγω υποεκτίμησης των θερμικών απωλειών των σωληνώσεων του πρωτεύοντος δικτύου. Επίσης, οι τιμές θερμοκρασίας του λογισμικού TRNSYS για τον Ιανουάριο είναι αρκετά σταθερότερες, λόγω της λειτουργίας του πρωτεύοντος δικτύου, τακτικότερα από ότι στην πραγματικότητα, εξαιτίας της απώλειας της συνθήκης της επαρκούς πίεσης στο κύκλωμα ($P_{κυκ}$ > 1,5 bar).

4.2. Διαγράμματα παραγωγής θερμικής ενέργειας από το Ηλιοθερμικό Πεδίο

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων της παραγόμενης θερμικής ενέργειας διαφέρουν σε σύγκριση με τα πραγματικά από χειμερινούς/φθινοπωρινούς σε ανοιξιάτικους/καλοκαιρινούς μήνες. Τον Ιανουάριο, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με το λογισμικό TRNSYS, αποδίδουν υψηλότερα ποσά ενέργειας, κάποιες ημέρες σε σύγκριση με το πραγματικό. Αυτό έχει τις εξής πιθανές εξηγήσεις: το μοντέλο δεν λαμβάνει υπόψιν του τη παράμετρο της πίεσης μέσα στο κύκλωμα. Επομένως, το μοντέλο της προσομοίωσης που εξετάζει μόνο την παράμετρο της θερμοκρασίας ($T_{πρωτ.δικτ.}$ >25 ^{o}C), ενεργοποιεί τους κυκλοφορητές τακτικότερα του πραγματικού με αποτέλεσμα να παρουσιάζει ορισμένες μέρες διαφορά με την πραγματικά παραγόμενη ενέργεια.



Εικόνα 7: Παραγωγή θερμικής ενέργειας από το ηλιοθερμικό πεδίο του μήνες Ιανουάριο και Νοέμβριο.



Εικόνα 8: Παραγωγή θερμικής ενέργειας από το ηλιοθερμικό πεδίο του μήνες Απρίλιο και Ιούλιο.

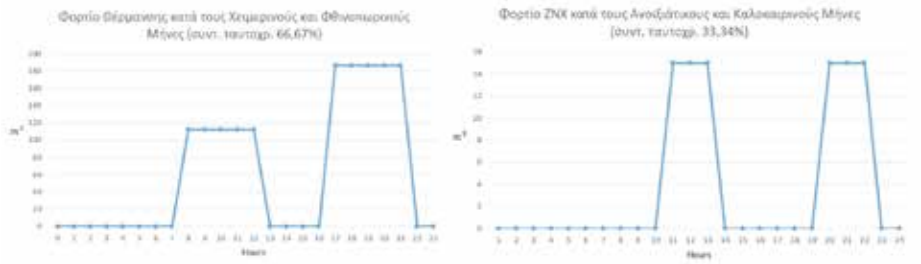
Τους μήνες Απρίλιο και Νοέμβριο, οι διαφορές μεταξύ τιμών μετρήσεων και προσομοίωσης δε διαφέρουν σημαντικά για το μεγαλύτερο ποσοστό των ημερών του μήνα, ενώ τον μήνα Ιούλιο υπάρχει σημαντική απόκλιση. Η απόκλιση αυτή οφείλεται κυρίως στην έλλειψη φορτίου στο πραγματικό σύστημα, γεγονός που προκαλεί χαμηλή διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ προσαγωγής και επιστροφής στο πρωτεύον και επομένως χαμηλότερης παραγόμενης ενέργειας. Οι προσομοιώσεις, αντίθετα, λειτουργούν υπό θερμικό φορτίο και κατά τους καλοκαιρινούς μήνες (γεγονός που αιτιολογείται είτε ως φορτίο ZNX είτε ως φορτίο ψύξης δυνητικά-μέσω της λειτουργίας του ψύκτη απορρόφησης). Μία ακόμα διαφορά μεταξύ των αποτελεσμάτων των δύο μοντέλων και των πραγματικών τον μήνα αυτό, είναι ότι τα μοντέλα του TRNSYS και του Dymola αποδίδουν θερμική ισχύ κοντά στην ονομαστική του συστήματος (1,18 MW_{th}) – αξιοποιώντας το ηλιακό δυναμικό σε υψηλό ποσοστό.

Γίνεται αντιληπτό, ότι όσο μεγαλύτερο το φορτίο και ο κύκλος λειτουργίας του συστήματος, τόσο μεγαλύτερη η παραγωγή θερμικής ενέργειας και τόσο μεγαλύτερη η συνολική απόδοση του συστήματος. Η μεταβλητή η οποία αξίζει να εξεταστεί, είναι ο θερμοκρασιακός κύκλος των δεξαμενών αποθήκευσης κατά τους μήνες αυτούς. Καθώς δεν υπάρχουν δεδομένα για τη λειτουργία του συστήματος 1) υπό φορτίο, τους ανοιξιάτικους και καλοκαιρινούς μήνες και 2) της υβριδικής λειτουργίας του συστήματος λόγω βλάβης της τρίοδης ηλεκτροβάνας που αλλάζει τη ροή της επιστροφής των κτιρίων προς τις δεξαμενές (αν η θερμοκρασία των δεξαμενών είναι χαμηλότερη από αυτή που επιστρέφει, κατευθύνεται προς τις δεξαμενές και τις φορτίζει· αλλιώς κατευθύνεται προς τον λέβητα βιομάζας), τα δεδομένα των προσομοιώσεων αντιπαραβάλλονται με τα πραγματικά με σκοπό την προβολή της δυνητικής υβριδικής λειτουργίας του συστήματος. Ακολουθούν τα διαγράμματα θερμοκρασίας μόνο της δεξαμενής 1 (Tank 1).

4.3. Διαγράμματα θερμοκρασίας της Δεξαμενής 1

Σύμφωνα με τις Εικ. 9 και 10, παρατηρούνται σημαντικές διαφορές του θερμοκρασιακού εύρους μεταξύ της πραγματικής θερμοκρασίας των δεξαμενών και της προσομοιωμένης με λειτουργία του υβριδικού συστήματος. Κατά τους χειμερινούς και φθινοπωρινούς μήνες, οι θερμοκρασίες των δεξαμενών στην πραγματικότητα, χωρίς την φόρτιση από τον λέβητα (όταν η θερμοκρασία αυτών είναι χαμηλότερη από αυτή που επιστρέφει από τα κτίρια), φορτίζονται μόνο από το ηλιοθερμικό πεδίο, που

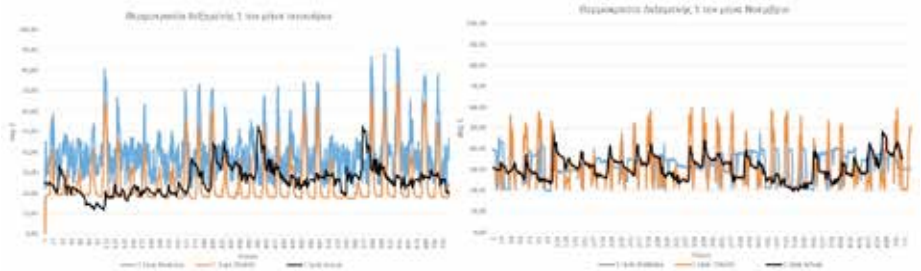
προσφέρει χαμηλά ποσά ενέργειας (Εικ. 7, 8). Σε αυτό το σημείο, είναι σκόπιμο να παρουσιαστεί το φορτίο που λαμβάνεται υπόψιν για τη διεκπεραίωση του σεναρίου λειτουργίας.



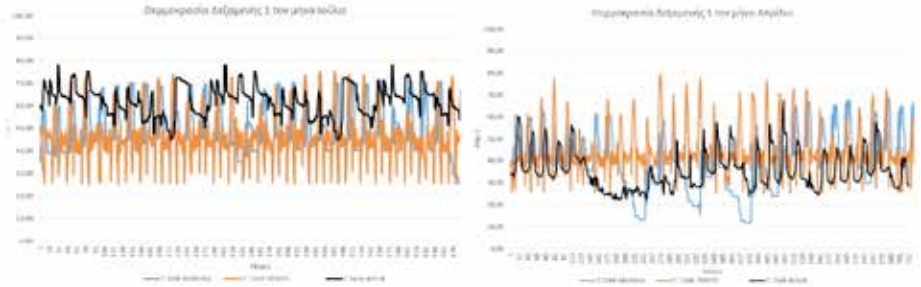
Εικόνα 9: Φορτία θέρμανσης κατά τους χειμερινούς/φθινοπωρινούς μήνες (αριστερά) και φορτία ZNX τους ανοιξιάτικους/καλοκαιρινούς μήνες (δεξιά), σε κυβικά ζεστού νερού.

Ο συνολικός αριθμός των φοιτητών που διαμένουν στο κτιριακό συγκρότημα των Κιμμερίων, είναι 600. Για τις ανάγκες τις προσομοίωσης του φορτίου, χρησιμοποιήθηκε το πραγματικό φορτίο θέρμανσης με συντελεστή ταυτοχρονισμού 66,67%, που ανταποκρίνεται προσεγγιστικά σε 186,7 m^3 ζεστού νερού ενώ για το φορτίο ZNX, κατασκευάστηκε ένα προσεγγιστικό μοντέλο καταναλώσεων όπως φαίνεται στην Εικ. 9 χρησιμοποιώντας συντελεστή ταυτοχρονισμού 33,34%. Αυτό ανταποκρίνεται σε ωριαία ζήτηση σε 15 m^3 ZNX, φορτίο το οποίο καλύπτεται από τα TES σε ποσοστό >90% ημερησίως.

Οι Εικ. 10 και 11, παρουσιάζουν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τη θερμοκρασία της δεξαμενής 1, σύμφωνα με τα φορτία της Εικ. 9.



Εικόνα 10: Θερμοκρασία δεξαμενής 1, αντιπαραβολή πραγματικής θερμοκρασίας με προσομοίωση της πλήρους λειτουργίας του υβριδικού συστήματος, για τους μήνες Ιανουάριο και Νοέμβριο.



Εικόνα 11: Θερμοκρασία δεξαμενής 1, αντιπαραβολή πραγματικής θερμοκρασίας με προσομοίωση της πλήρους λειτουργίας του υβριδικού συστήματος, για τους μήνες Απρίλιο και Ιούλιο.

Οι τιμές θερμοκρασίας των προσομοιώσεων, είναι υψηλότερες σε ποσοστό έως και 71%, καθώς ο λέβητας προσφέρει θερμότητα στις δεξαμενές τις ώρες που λειτουργεί. Κατά τους ανοιξιάτικους και καλοκαιρινούς μήνες, που η προσφερόμενη από το ηλιοθερμικό πεδίο θερμότητα, είναι υψηλή, αλλά το φορτίο χαμηλό, οι πραγματικές τιμές θερμοκρασίας των δεξαμενών είναι σαφώς υψηλότερες (έως 78,5%) από αυτές των προσομοιώσεων. Η διαφορά αυτή παρατηρείται κυρίως λόγω της εκφόρτισης των δεξαμενών, στην προσομοίωση, καθώς αποδίδουν την αποθηκευμένη ενέργειά τους στην εξυπηρέτηση των φορτίων (είτε ΖΝΧ είτε ψυκτικών – με χρήση του ψύκτη απορρόφησης).

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΕΠΟΜΕΝΑ ΒΗΜΑΤΑ

Στην ενότητα 4 παρουσιάστηκαν σε αντιπαραβολή, οι μετρήσεις πεδίου του συστήματος παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας της ενεργειακής κοινότητας του ΔΠΘ με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του συστήματος. Έγινε χρήση δύο διαφορετικών λογισμικών, του TRNSYS και του Dymola, προκειμένου να προσεγγιστεί κατά το δυνατόν με υψηλότερη ακρίβεια η λειτουργία του υβριδικού συστήματος, ηλιοθερμικού πεδίου-λέβητα βιομάζας. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων υπέδειξαν ομοιότητα σε ποσοστό >70% σε ότι αφορά τις πραγματικές μετρήσεις των θερμοκρασιών εξόδου και της παραγόμενης θερμικής ενέργειας, για το σύνολο των ημερών, κρίνοντας τη λεπτομέρεια των μοντέλων αξιόπιστη.

Εφόσον τα μοντέλα ήταν επαρκώς αξιόπιστα, προσεγγίστηκε το σενάριο πλήρους λειτουργίας του υβριδικού συστήματος, δηλαδή η φόρτιση των δεξαμενών και από τον λέβητα, σενάριο το οποίο λόγω αστοχιών σε μείζονα εξαρτήματα του συστήματος, δεν ήταν εφικτή στην πραγματικότητα. Τα αποτελέσματα κατέδειξαν την εύρυθμη λειτουργία του συστήματος στην κατάσταση αυτή, καθώς οι θερμοκρασίες των δεξαμενών βελτιώνονται ανάλογα με την εποχή. Ο κύκλος φόρτισης των δεξαμενών κατά τους χειμερινούς μήνες αυξάνεται σε ποσοστό 63% ενώ τους καλοκαιρινούς μήνες, αντιμετωπίζεται το πρόβλημα της εκφόρτισης των δεξαμενών σε ποσοστό 23,4%. Επίσης, κατά τους χειμερινούς μήνες, παρατηρείται εκφόρτιση των δοχείων σε μέσο διάστημα 13 ωρών (κατάσταση φόρτισης T_{tank1}>50 ^{o}C, ενώ εκφόρτισης T_{tank1} <25 ^{o}C) ενώ τους καλοκαιρινούς σε μέσο διάστημα 32 ωρών. Η κύρια παράμετρος για την υλοποίηση ενός τέτοιου σεναρίου είναι η ύπαρξη φορτίου και το καλοκαίρι, προκειμένου το εγκατεστημένο σύστημα να λειτουργεί σε σημαντικό ποσοστό της ισχύος του. Το φορτίο προς εξυπηρέτηση θα μπορούσε να είναι ΖΝΧ, με την προϋπόθεση ότι υπάρχει ποσοστό πληρότητας στις φοιτητικές εστίες. Άλλο φορτίο, θα μπορούσε να είναι η χρήση της παραγόμενης θερμικής ενέργειας για την παραγωγή ψυκτικής μέσω του ψύκτη απορρόφησης. Οι προσομοιώσεις κατέδειξαν πως η λειτουργία του είναι δυνατή με την απόδοση θερμικής ενέργειας που έχει το υβριδικό σύστημα, για σχεδόν 6 ώρες ημερησίως, όλη την καλοκαιρινή περίοδο.

Επόμενα βήματα της παρούσας δουλειάς θα ήταν σίγουρα η περαιτέρω προσομοίωση του συστήματος και για άλλα κομβικά σημεία, όπως λέβητας βιομάζας – ο κύκλος λειτουργίας του και η τροφοδοσία του με προθερμασμένο νερό από τις δεξαμενές καθώς και η μεταβολή των οικονομοτεχνικών του χαρακτηριστικών, ο ψύκτης απορρόφησης – με σενάρια κύκλων λειτουργίας/φορτίου, η ενδεχόμενη απόθεση της απορριπτόμενης θερμότητας του συστήματος κατά τους καλοκαιρινούς μήνες στο κοντινό γεωθερμικό πεδίο – αύξηση της απόδοσης του γεωεναλλάκτη. Επιπροσθέτως, θα ήταν άξια διερεύνησης η χρήση της απορριπτόμενης θερμότητας για τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, με χρήση της νέας εγκατάστασης συστήματος ORC.

Σύμφωνα με τη [12], η ενεργειακή κοινότητα του ΔΠΘ, εξαιτίας των προαναφερθέντων ζητημάτων, απορρίπτει ετησίως 100 MWh_{th}. Οι παραπάνω προτάσεις έχουν ως στόχο την εξάλειψη του μεγαλύτερου ποσοστού αυτού, και της εκμετάλλευσης του 100% της ισχύος του εγκατεστημένου υβριδικού συστήματος.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς θα ήθελαν να ευχαριστήσουν το ερευνητικό πρόγραμμα “Renaissance” (Renewable Integration & Sustainability in Energy Communities, HORIZON 2020, GA 824342), για τη χρηματοδότηση αυτής της προσπάθειας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Katopodis, T., Markantonis, I., Politi, N., Vlachogiannis, D., & Sfetsos, A. (2020). High-Resolution Solar Climate Atlas for Greece under Climate Change Using the Weather Research and Forecasting (WRF) Model. *Atmosphere*, *11*(7), 761.

[2] Crema, L., Bozzoli, A., Alberti, F., Bertaso, A., Casalegno, F., & Scagnetti, G. (2012). Novel Energy Provision System for the Sustainable Connected Home. In *World Renewable Energy Forum* (pp. 13-17).

[3] Palomba, V., Borri, E., Charalampidis, A., Frazzica, A., Cabeza, L. F., & Karellas, S. (2020). Implementation of a solar-biomass system for multi-family houses: Towards 100% renewable energy utilization. *Renewable Energy*, *166*, 190-209.

[4] Soutullo, S., Bujedo, L. A., Samaniego, J., Borge, D., Ferrer, J. A., Carazo, R., & Heras, M. R. (2016). Energy performance assessment of a polygeneration plant in different weather conditions through simulation tools. *Energy and Buildings*, *124*, 7-18.

[5] Calise, F., Cappiello, F. L., Dentice d'Accadia, M., & Vicidomini, M. (2020). Thermo-economic analysis of hybrid solar-geothermal polygeneration plants in different configurations. *Energies*, *13*(9), 2391.

[6] Sebestyén, T. T., Pavičević, M., Dorotić, H., & Krajačić, G. (2020). The establishment of a micro-scale heat market using a biomass-fired district heating system. *Energy, Sustainability and Society*, *10*(1), 1-13.

[7] Krarouch, M., Ruesch, F., Hamdi, H., Outzourhit, A., & Haller, M. (2020). Dynamic simulation and economic analysis of a combined solar thermal and pellet heating system for domestic hot water production in a traditional Hammam. *Applied Thermal Engineering*, *180*, 115839.

[8] Sadi, M., & Arabkoohsar, A. (2020). Techno-economic analysis of off-grid solar-driven cold storage systems for preventing the waste of agricultural products in hot and humid climates. *Journal of Cleaner Production*, *275*, 124143.

[9] Pina, E. A., Lozano, M. A., Serra, L. M., Hernández, A., & Lázaro, A. Design and thermoeconomic analysis of a solar parabolic trough–ORC–Biomass cooling plant for a commercial center. *Solar Energy*, *215*, 92-107.

[10] Chen, H., Xue, K., Wu, Y., Xu, G., Jin, X., & Liu, W. (2020). Thermodynamic and economic analyses of a solar-aided biomass-fired combined heat and power system. *Energy*, *214*, 119023.

[11] Tilahun, F. B., Bhandari, R., & Mamo, M. (2020). Design optimization of a hybrid solar-biomass plant to sustainably supply energy to industry: Methodology and case study. *Energy*, 119736.

[12] Botsaris, P. N., Lymperopoulos, K., & Pechtelidis, A. (2020, January). Preliminary evaluation of operational results of RES systems integrated in students' residences in Xanthi, Greece. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 410, No. 1, p. 012048). IOP Publishing.

[13] Pernigotto, G., Prada, A., Gasparella, A., & Hensen, J. L. (2014). Analysis and improvement of the representativeness of EN ISO 15927-4 reference years for building energy simulation. *Journal of Building Performance Simulation*, 7(6), 391-410.

[14] McDowell, T. P., Bradley, D. E., Thornton, J. W., & Kummert, M. (2016). Simulation synergy: expanding TRNSYS capabilities and usability. Proceedings of SIMBUILD, 1(1).

[15] Wetter, M., Zuo, W., Nouidui, T. S., & Pang, X. (2014). Modelica buildings library. *Journal of Building Performance Simulation*, 7(4), 253-270.

ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΑΕΙΦΟΡΙΑ: ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΕΩΝ ΣΕ ΣΧΟΛΙΚΑ ΚΤΙΡΙΑ

Ελένη Μήτσιου[1], Ελευθερία Αλεξανδρή[1]

[1] Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Πάροδος Αριστοτέλους 18, 26335 Πάτρα
e-mail: mitsiouele@gmail.com, el_alexandri@yahoo.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ενεργειακή αναβάθμιση του κτιριακού αποθέματος είναι μια από τις ευρύτερα αποδεκτές πολιτικές για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, η οποία θεωρείται αναπόσπαστο μέρος της αειφόρου ανάπτυξης. Η σύνδεση όμως της αειφορικότητας με την ενεργειακή αποδοτικότητα σε διάφορες τυπολογίες κτιρίων δεν είναι πάντα αυτονόητη και δεν έχει διερευνηθεί διεξοδικά μέχρι τώρα. Στη συγκεκριμένη έρευνα εξετάζεται η ενεργειακή αναβάθμιση ενός σχολικού κτιρίου, με στόχο τη μετατροπή του σε σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας, ποσοτικοποιώντας τα αποτελέσματα της ενεργειακής αναβάθμισής του σε διάφορα εξεταζόμενα κριτήρια αειφορίας. Επιλέγονται δέκα κριτήρια για την περιγραφή των στόχων αειφορίας των Ηνωμένων Εθνών, των οποίων οι δείκτες ποσοτικοποιούνται μέσω του λογισμικού ενεργειακής προσομοίωσης ΤΕΕ ΚΕΝΑΚ και σχετικών υπολογισμών, ενώ μέσω ερωτηματολογίων σε ειδικούς ποσοτικοποιούνται ποιοτικοί δείκτες και προσδιορίζονται οι συντελεστές βαρύτητας του κάθε κριτηρίου. Εξετάζονται έντεκα σενάρια, σχετικά με τα οικοδομικά υλικά (συμβατικά και φιλικά στο περιβάλλον υλικά, καθώς και φυτεμένα δώματα), την αναβάθμιση των Η/Μ συστημάτων σε “οικολογικού σήματος” καθώς και την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών στοιχείων στο δώμα του σχολείου. Έξι από τα σενάρια αυτά μετατρέπουν το κτίριο σε nZEB. Μέσω πολυκριτηριακής ανάλυσης τα σενάρια ιεραρχούνται και αναδεικνύονται τα πιο αειφορικά από αυτά μέσω ανάλυσης ευαισθησίας.

Μέσω αυτής της προσέγγισης διαπιστώνεται ότι το πιο αειφορικό σενάριο δεν είναι κατ’ανάγκη και το πιο ενεργειακά αποδοτικό. Η χρήση οικολογικών υλικών και η φύτευση των δωμάτων, σε συνδυασμό με την τοπική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά στοιχεία ιεραρχείται ως το πιο αειφορικό σενάριο για την ενεργειακή αναβάθμιση των σχολικών κτιρίων. Τα συνεργατικά σενάρια είναι γενικά πιο αποτελεσματικές και πιο αειφορικές επιλογές από την παρέμβαση σε ένα μόνο στοιχείο του κτιρίου. Η ενεργειακή αναβάθμιση του κτιρίου με οικολογικά υλικά είναι μακράν μια πιο αειφορική επιλογή από την αναβάθμισή του με τα συμβατικά υλικά που έχουν μεγαλύτερη ενσωματωμένη ενέργεια και σε κάποιες περιπτώσεις, σοβαρές επιβλαβείς επιπτώσεις στο περιβάλλον καθόλη τη διάρκεια της ζωής τους.

Λέξεις Κλειδιά: nZEB, ενσωματωμένη ενέργεια, αειφορικό κτίριο, σχολικά κτίρια, δείκτες βιωσιμότητας, πολυκριτηριακή ανάλυση MAUT

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα Ηνωμένα Έθνη συνδέουν το πρόσφατο ξέσπασμα της πανδημίας COVID-19 με τις ανθρωπογενείς αλλαγές που συμβαίνουν στον πλανήτη [1]. Εξειδικεύοντας στο θέμα της ευθύνης του κτιριακού τομέα για το πρόβλημα της κλιματικής αλλαγής, διαπιστώνουμε τις μεγάλες ανάγκες εξοικονόμησης ενέργειας στα κτίρια: ειδικά για την Ελλάδα εκτιμάται ότι η συνολική κατανάλωση ενέργειας των κτιρίων αντιπροσωπεύει το 39% της εγχώριας κατανάλωσης [2]. Σήμερα το θέμα της ενεργειακής αποδοτικότητας επικεντρώνεται στις ριζικές ανακαινίσεις σε υφιστάμενα κτίρια και μάλιστα, με στόχο «…την απαλλαγή έως το 2050 του κτιριακού δυναμικού από ανθρακούχες εκπομπές…» [3], δηλαδή με προδιαγραφές κτιρίων σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας (nZEB). Σύμφωνα με την ελληνική νομοθεσία [4] ο χαρακτηρισμός nZEB συνδέεται με την ενεργειακή κατηγορία των κτιρίων, επιτρέποντας τελικά πολύ υψηλότερες των «σχεδόν μηδενικών» καταναλώσεις ενέργειας στα nZEB κτίρια.

Εξάλλου, ο χαρακτηρισμός nZEB αγνοεί την ενσωματωμένη ενέργεια των υλικών που συμβάλλουν στην υψηλή ενεργειακή απόδοση, η οποία είναι, σύμφωνα με πολλούς ερευνητές, ιδιαίτερα αυξημένη [5], [6], [7], [8]. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε πιθανή χρονική «αντιστάθμιση» της ενέργειας που καταναλώνεται σε ένα nZEB κτίριο, από την φάση της χρήσης του σε άλλη χρονική φάση του κύκλου ζωής του.

Είναι λοιπόν η υψηλή ενεργειακή αποδοτικότητα μέσω ενεργειακών αναβαθμίσεων αρκετή για να μετατραπεί ένα κτίριο σε αειφορικό; Η αειφορία είναι μια έννοια πολυπαραγοντική, που συντίθεται από πολλές - συχνά αντικρουόμενες συνιστώσες [9]. Στην παρούσα μελέτη επιχειρείται η απεικόνιση της αειφορίας μέσα από κριτήρια που έχουν σχέση και με τους τρεις πυλώνες της, την προστασία του περιβάλλοντος , την κοινωνική ισότητα και την οικονομική ανάπτυξη [10].

Η έρευνα επικεντρώνεται στην ενεργειακή αναβάθμιση των υφιστάμενων σχολικών κτιρίων, καθώς αυτά αποτελούν ένα σημαντικό κομμάτι της δημόσιας αρχιτεκτονικής στην Ελλάδα και ταυτόχρονα είναι οι δομημένοι χώροι όπου σήμερα οι νεότερες γενιές μορφώνονται και διαπαιδαγωγούνται. Ακόμη, το κτιριακό απόθεμα των σχολικών κτιρίων είναι μια ομάδα με μεγάλες ενεργειακές ανάγκες: είναι διαπιστωμένο πως το 57% των σχολικών κτιρίων είναι χτισμένα στην πριν του Κανονισμού Θερμομόνωσης εποχή [11] και κατά συνέπεια το κέλυφός τους είναι απροστάτευτο όσον αφορά τις χειμερινές θερμικές απώλειες και την θερινή υπερθέρμανση. Τέλος, ανήκουν κατά κανόνα σε δημοσίους φορείς [12], γεγονός που ευνοεί τις πιθανότητες ενεργειακής αναβάθμισής τους.

Στόχος της παρούσας έρευνας είναι να εξάγει συμπεράσματα για την αειφορικότητα - με την ολιστική έννοια- των ενεργειακών αναβαθμίσεων σε υφιστάμενα σχολικά κτίρια.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Προκειμένου να απαντηθεί το προαναφερθέν ερευνητικό ερώτημα, η έρευνα στηρίζεται στην πολυκριτηριακή ανάλυση των επεμβάσεων εξοικονόμησης ενέργειας στον κτιριακό τομέα. Η πολυκριτηριακή αυτή ανάλυση προσδοκά να καλύψει ερευνητικό και πρακτικό κενό: Βάσει της υφιστάμενης βιβλιογραφίας, η επιλογή των μέτρων ενεργειακής αναβάθμισης γίνεται συνήθως μόνο σε σχέση με την ενέργεια που εξοικονομείται κάθε φορά στο υπό μελέτη κτίριο [13], [14], [15]. Επιπλέον κριτήρια επιλογής συστημάτων εξοικονόμησης ενέργειας στον κτιριακό τομέα δεν έχουν ερευνηθεί τόσο ενδελεχώς και κατ' αυτό τον τρόπο, σημαντικά περιβαλλοντικά κριτήρια έχουν παραμεριστεί. Ακόμη, δεν έχει επιχειρηθεί η συστηματοποίηση των πολλαπλών αυτών κριτηρίων [16], [17]. Εξάλλου, στην πρακτική της ενεργειακής αναβάθμισης, παρατηρείται συχνά η μονοκριτηριακή επιλογή των οικονομικών κριτηρίων [16]. Στην παρούσα έρευνα, εκτός από την πολυκριτηριακή ανάλυση επιχειρείται και συστηματοποίηση των κριτηρίων αξιολόγησης των σεναρίων ενεργειακής αναβάθμισης ενός σχολικού κτιρίου, βάσει των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης των Ηνωμένων Εθνών [18].

Η μεθοδολογία που ακολουθείται στην παρούσα μελέτη απεικονίζεται στην Εικόνα 1. Μετά την θεωρητική τεκμηρίωση των ερωτημάτων, ορίζονται δέκα κριτήρια και δείκτες βιωσιμότητας για να περιγράψουν την αειφορικότητα του συγκεκριμένου χωροχρονικού συστήματος που ερευνάται. Κατόπιν, γίνεται η ανάλυση του πεδίου εφαρμογής της μελέτης περίπτωσης και διαμορφώνονται έντεκα σενάρια ενεργειακής αναβάθμισής του. Γίνεται η ποσοτικοποίηση των επιπτώσεων των ενεργειακών αναβαθμίσεων όσον αφορά τους ορισμένους δείκτες. Τέλος, τα σενάρια ιεραρχούνται μέσω πολυκριτηριακής ανάλυσης και ανάλυσης ευαισθησίας.

Εικόνα 1: Μεθοδολογία της έρευνας

2.1. Επιλογή κριτηρίων – μέθοδοι υπολογισμού των δεικτών βιωσιμότητας

Οι επιπτώσεις των ενεργειακών αναβαθμίσεων για ένα υφιστάμενο σχολικό κτίριο και για το άμεσο περιβάλλον του, διερευνώνται για μια χρονική περίοδο 40 ετών. Στόχος, η εύρεση αειφορικών - με την ολιστική έννοια του όρου- λύσεων. Επιχειρείται μια ευρεία περιγραφή της αειφορικότητας του συστήματος του κτιρίου, η οποία έχει ως οδηγό τους 17 ΣΒΑ των Ηνωμένων Εθνών [18]. Η επιλογή της συγκεκριμένης ομάδας στόχων γίνεται αναγνωρίζοντας την αμφίδρομη σχέση ανάμεσα στην επιστημονική έρευνα και τις στρατηγικές και πρακτικές που αναδεικνύονται από διεθνείς πολιτικές δομές, καθώς και της αναγκαιότητας της έκφρασης της "οικολογικότητας" των κτιρίων βάσει των ΣΒΑ [19]. Όσον αφορά τον πυλώνα της Κοινωνίας, επιλέχθηκαν κριτήρια που καλύπτουν τον ΣΒΑ4 (Ποιοτική Εκπαίδευση), καθώς εξετάζεται σχολικό κτίριο. Όσον αφορά τον πυλώνα του περιβάλλοντος, επιλέχθηκαν κριτήρια που καλύπτουν τον ΣΒΑ12 (Υπεύθυνη Κατανάλωση και Παραγωγή), ΣΒΑ13 (Δράση για το Κλίμα), καθώς και τον ΣΒΑ11 (Βιώσιμες Πόλεις και Κοινότητες), που αφορούν κριτήρια τόσο για τη σχέση του κτιρίου με το δομημένο περιβάλλον, όσο και για το κτίριο ως μονάδα, που καταναλώνει φυσικούς πόρους και ενέργεια. Για τον πυλώνα της οικονομίας επιλέχθηκαν τα συνήθη κριτήρια, του αρχικού κόστους επένδυσης, της περιόδου αποπληρωμής καθώς και της μείωσης του λειτουργικού κόστους, που καλύπτουν τον ΣΒΑ 8 «Αξιοπρεπής δουλειά και οικονομική ανάπτυξη». Για κάθε ΣΒΑ επιλέγεται ένα ή περισσότερα κριτήρια, όπως φαίνεται στον Πίνακα 1. Κάθε κριτήριο εκφράζεται με ένα δείκτη, ο οποίος ποσοτικοποιείται (Πίνακας 1).

Η μεθοδολογία για την ποσοτικοποίηση των δεικτών, εξαρτάται από τον κάθε δείκτη. Οι δείκτες που σχετίζονται με κατανάλωση και εξοικονόμηση ενέργειας από παρεμβάσεις (Π.1, Π.2, Ο.1, Ο.2 και Ο.3) ποσοτικοποιούνται με το λογισμικό ενεργειακής προσομοίωσης ΤΕΕ ΚΕΝΑΚ v.1.31.1.9. Όσον αφορά τον δείκτη της απορροφητικότητας ομβρίων του δώματος (Π.3), υπολογίζεται ως ο ζυγισμένος μέσος συντελεστής απορροφητικότητας της επιφάνειας του δώματος, βάσει της κάθε τελικής επιφάνειας του δώματος. Σχετικά με την ύπαρξη φύτευσης στο κτίριο ή την τοποθέτηση θερμομόνωσης εξωτερικά στο κέλυφος (Π.4 και Π.5), επιλέγεται η έκφραση (Υπάρχει / Δεν υπάρχει), η οποία ποσοτικοποιείται ως '0 / 1' στην πολυκριτηριακή ανάλυση. Για τον ποιοτικό δείκτη 'απόκτηση γνώσεων και δεξιοτήτων για την

αειφορία' (Κ.1), η ποσοτικοποίηση γίνεται μέσω ηλεκτρονικού ερωτηματολογίου, προς ειδικούς/ές στο θέμα (μηχανικούς και εκπαιδευτικούς), το οποίο συμπληρώθηκε από 65 συμμετέχοντες/ουσες, από τους/τις οποίους/ες ζητήθηκε να ποσοτικοποιήσουν (βαθμολογήσουν) τις διάφορες τεχνολογίες ενεργειακής αναβάθμισης ενός κτιρίου ως προς την εκπαιδευτική τους διάσταση. Για το συγκεκριμένο ερωτηματολόγιο χρησιμοποιήθηκε η πλατφόρμα Google Forms, ενώ για την επιλογή του δείγματος χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της χιονοστιβάδας. Τέλος, η ενσωματωμένη ενέργεια των χρησιμοποιούμενων υλικών (Π.6) υπολογίζεται με βάση τις τιμές ενσωματωμένης ενέργειας των διάφορων υλικών που βρίσκονται διαθέσιμες σε έγκυρες πηγές [20], [21], [22].Τα κριτήρια, οι δείκτες, οι μονάδες μέτρησής τους και ο τρόπος υπολογισμού τους φαίνονται στον Πίνακα 1.

Τέλος, για την πολυκριτηριακή ανάλυση με τη μέθοδο MAUT, χρησιμοποιείται το εργαλείο της [23]. Οι συντελεστές βαρύτητας των κριτηρίων (Πίνακας 2) υπολογίζονται ως ο μέσος όρος των απαντήσεων στο προαναφερθέν ερωτηματολόγιο. Η ανάλυση ολοκληρώνεται με ανάλυση ευαισθησίας, δηλαδή την διερεύνηση του πώς αλλάζει η ιεράρχηση των σεναρίων, σε περίπτωση διαφορετικών σταθμίσεων των κριτηρίων [24].

Πίνακας 1: Περιβαλλοντικά, κοινωνικά και οικονομικά κριτήρια, συσχέτισή τους με τους ΣΒΑ των Ηνωμένων Εθνών, επιλογή δεικτών και μεθοδολογία εκτίμησης / ποσοτικοποίησής τους

Πυλώνας	Κωδική ονομασία και ΣΒΑ	Κριτήριο	Δείκτης / Μονάδες	Μεθοδολογικό εργαλείο
Κοινωνική ισότητα	Κ.1 (ΣΒΑ4)	Απόκτηση γνώσεων και δεξιοτήτων για την Αειφορία	Απόκτηση γνώσεων και δεξιοτήτων για την Αειφορία	Ερωτηματολόγιο σε ειδήμονες
Προστασία περιβάλλοντος	Π.1 (ΣΒΑ12)	Μείωση κατανάλωσης συμβατικής ενέργειας	Εξοικονόμηση ενέργειας (%)	ΤΕΕ ΚΕΝΑΚ
	Π.2 (ΣΒΑ13)	Κλιματική αλλαγή	Μείωση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (%)	ΤΕΕ ΚΕΝΑΚ
	Π.3 (ΣΒΑ11-ΣΒΑ15)	Μείωση πλημμυρικών φαινομένων	Απορροφητικότητα ομβρίων από το κέλυφος του κτιρίου (αδιάστατο μέγεθος) (-)	Συντελεστής απορροφητικότητας επιφάνειας δώματος – ζυγισμένος μέσος απορροφητικότητας τελικών επιφανειών
	Π.4 (ΣΒΑ11-ΣΒΑ15)	Ενίσχυση βιοποικιλότητας	Ύπαρξη φύτευσης στο κέλυφος [Ναι / Όχι]	Ύπαρξη φυτεμένου δώματος στο κτίριο
	Π.5 (ΣΒΑ11)	Μείωση έντασης θερμικής νήσου τη νυχτερινή περίοδο	Μείωση θερμοχωρητικότητας στην πόλη [Ναι / Όχι]	Ύπαρξη εξωτερικής θερμομόνωσης
	Π.6 (ΣΒΑ12)	Ενσωματωμένη ενέργεια	Απόσβαση ενσωματωμένης ενέργειας (έτη)	Απλή περίοδος αποπληρωμής, σύμφωνα με τους [8]
Οικονομική ανάπτυξη	Ο.1 (ΣΒΑ8)	Λειτουργικά κόστη	Μείωση λειτουργικού κόστους (%)	ΤΕΕ ΚΕΝΑΚ
	Ο.2 (ΣΒΑ8)	Κόστος επένδυσης	Αρχικό κόστος (€)	ΤΕΕ ΚΕΝΑΚ
	Ο.3 (ΣΒΑ8)	Κόστος / όφελος	Απόσβαση επένδυσης (έτη)	ΤΕΕ ΚΕΝΑΚ

Πίνακας 2: Συντελεστής βαρύτητας κάθε κριτηρίου, όπως προέκυψε από το ερωτηματολόγιο σε ειδικούς

Κωδικός κριτηρίου	Κ.1	Π.1	Π.2	Π.3	Π.4	Π.5	Π.6	Ο.1	Ο.2	Ο.3
Συντελεστής βαρύτητας	4.12	4.54	4.58	3.60	3.94	4.35	3.82	4.18	4.09	4.00

2.2. Ενεργειακή ανάλυση κτιρίου

Πεδίο εφαρμογής για την μελέτη περίπτωσης αποτελεί ένα υφιστάμενο σχολικό κτίριο, κατασκευής 1977-78, το οποίο βρίσκεται στην κλιματική ζώνη Β [25], στο κέντρο της Αθήνας, στη βόρεια πλευρά του λόφου του Στρέφη (Εικόνα 2α). Έχει εμβαδόν 1975.34m^2 και αναπτύσσεται σε πέντε κλιμακωτούς ορόφους, ακολουθώντας τη φυσική κατωφέρεια του εδάφους από Νότο προς Βορρά. Ο σχεδιασμός του κτιρίου λαμβάνει υπόψη τους προσανατολισμούς για την αξιοποίηση του φυσικού φωτισμού στους κύριους χώρους.

Το κέλυφος του κτιρίου είναι πλήρως αμόνωτο. Κατασκευαστικά, το κτίριο αποτελεί συμβατική κατασκευή, με φέροντα οργανισμό από οπλισμένο σκυρόδεμα και πλήρωση από οπτόπλινθους, με κοινό επίχρισμα. Οι στεγάσεις του είναι βατά δώματα με τελείωμα χυτό μωσαϊκό. Τα εξωτερικά του ανοίγματα φέρουν μεταλλικές θύρες και συρόμενα κουφώματα αλουμινίου πρώτης γενεάς, με μονό υαλοπίνακα. Η μορφολόγηση των ανοιγμάτων γίνεται με οριζόντιο διαχωρισμό σε κυρίως άνοιγμα και φεγγίτη στο ύψος του πρεκιού των θυρών. Οι φεγγίτες έχουν σταθερά υαλοστάσια (Εικόνα 2β).

α *β*

Εικόνα 2 (α) Το εξεταζόμενο κτίριο και ο περιβάλλων χώρος του και (β) στοιχεία κελύφους στην ανατολική όψη του κτιρίου

Για τις ανάγκες θέρμανσης του κτιρίου λειτουργεί σήμερα εγκατάσταση συμβατικού λέβητα φυσικού αερίου, με αμόνωτο δίκτυο σωληνώσεων, με μέσο όρο καταγεγραμμένων καταναλώσεων θέρμανσης για τα έτη 2014-2018, 41.18kWh/m^2/έτος, κατανάλωση σχετικά χαμηλότερη από τη μέση κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση στα σχολικά κτίρια για το σύνολο της Ελλάδας (66kWh/m^2 [26]). Τέλος, ο τεχνητός φωτισμός του κτιρίου γίνεται με σειρές ράβδων φθορισμού, τύπου Τ8, με συμβατικά φωτιστικά σώματα.

Συνολικά, το κτίριο καταναλώνει μεγάλα ποσά ενέργειας και οικονομικών πόρων, χωρίς να επιτυγχάνει ικανοποιητική θερμική και οπτική άνεση. Ακόμη, συμβάλλει στην αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος χώρου, λόγω της μεγάλης θερμοχωρητικότητας του κελύφους, καθώς δεν υπάρχει εξωτερική θερμομόνωση [27], ενώ, λόγω της έλλειψης δυνατότητας συγκράτησης των όμβριων υδάτων, δεν έχει δυνατότητα αποτροπής των πλημμυρικών φαινομένων [28].

2.3. Σενάρια ενεργειακής αναβάθμισης

Για την εξέταση της αειφορικής αναβάθμισης του κτιρίου, εξετάζονται 11 σενάρια. Το Σ0 είναι το σενάριο βάσης, όπου το κτίριο παραμένει ως έχει. Τα σενάρια Σ1 και Σ2 αφορούν την στρατηγική βελτίωσης του κελύφους του κτιρίου. Στόχος του διαχωρισμού των δύο σεναρίων είναι η σύγκριση δύο ομάδων υλικών: στο Σ1 πρόκειται για συμβατικά, ευρείας διάδοσης, υλικά, που προέρχονται από ορυκτές πρώτες ύλες (π.χ. η πολυστερίνη) ή/και καταναλώνουν μεγάλα ποσά ενέργειας για να παραχθούν (π.χ. κουφώματα αλουμινίου). Στο Σ2 πρόκειται για ήπια περιβαλλοντικά υλικά, όπως η

θερμομόνωση κυτταρίνης και τα ξύλινα κουφώματα. Ακόμη, συγκρίνεται το εκτατικό φυτεμένο δώμα (Σ2) σε σχέση με το συμβατικό ανεστραμμένο δώμα με τελική επίστρωση από τσιμεντόπλακες (Σ1). Στα σενάρια Σ1 και Σ2, τα πάχη της θερμομόνωσης διαφοροποιούνται, ώστε να καλύπτουν τις εθνικές προδιαγραφές [29], σε σχέση με τις θερμοφυσικές ιδιότητες των υλικών. Στο Σ3 εξετάζεται η στρατηγική βελτίωσης των Η/Μ εγκαταστάσεων: αλλαγή λαμπτήρων φωτισμού με λαμπτήρες LED υψηλής απόδοσης, εγκατάσταση ανεμιστήρων οροφής, εγκατάσταση λέβητα φυσικού αερίου συμπύκνωσης, οικολογικού σήματος. Στο Σ4 εξετάζεται η στρατηγική εγκατάστασης ΑΠΕ: εγκατάσταση 16kW μονοκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών στοιχείων στα δώματα του κτιρίου. Καλύπτονται 96.00m^2 επιφάνειας από τα 1091.70 m^2 δώματος, τοποθετημένα με τέτοιο τρόπο ώστε να αποφεύγεται η σκίαση μεταξύ των στοιχείων ή από τον περιβάλλοντα χώρο. Τα υπόλοιπα σενάρια, Σ5, Σ6, Σ7 είναι συνδυασμοί του «συμβατικού» κελύφους με τις άλλες στρατηγικές ενώ τα Σ8, Σ9 και Σ10 είναι συνδυασμοί του «εναλλακτικού» κελύφους, και των υπολοίπων στρατηγικών (Πίνακας 3).

Πίνακας 3: Σύντομη περιγραφή εξεταζόμενων σεναρίων ενεργειακής αναβάθμισης κτιρίου

Σενάριο	Περιγραφή
Σενάριο 0	Το κτίριο παραμένει ως έχει
Σενάριο 1	Αναβαθμίζεται το κτιριακό κέλυφος με συμβατικά υλικά (εξωτερική θερμομόνωση εξηλασμένης πολυστερίνης, αντικατάσταση ανοιγμάτων με διπλούς υαλοπίνακες χαμηλής εκπομπής και πλαίσιο αλουμινίου με θερμοδιακοπή)
Σενάριο 2	Το κτιριακό κέλυφος αναβαθμίζεται με φιλικά στο περιβάλλον υλικά (εξωτερική θερμομόνωση κυτταρίνης, αντικατάσταση ανοιγμάτων με διπλούς υαλοπίνακες χαμηλής εκπομπής και ξύλινο πλαίσιο)
Σενάριο 3	Βελτίωση Η/Μ συστημάτων με Η/Μ συστήματα οικολογικού σήματος (θέρμανση, φωτισμός και ανεμιστήρες οροφής)
Σενάριο 4	Εγκατάσταση φωτοβολταϊκών στην οροφή του κτιρίου
Σενάριο 5	Σενάριο 1 + Σενάριο 3
Σενάριο 6	Σενάριο 1 + Σενάριο 4
Σενάριο 7	Σενάριο 1 + Σενάριο 3 + Σενάριο 4
Σενάριο 8	Σενάριο 2 + Σενάριο 3
Σενάριο 9	Σενάριο 2 + Σενάριο 4
Σενάριο 10	Σενάριο 2 + Σενάριο 3 + Σενάριο 4

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

Στον Πίνακα 4 φαίνονται τα αριθμητικά αποτελέσματα για κάθε ένα από τα δέκα κριτήρια για κάθε σενάριο ενεργειακής αναβάθμισης του κτιρίου, που εξετάσθηκε.

Πίνακας 4: Αποτελέσματα για τα δέκα κριτήρια, για τα 11 σενάρια που εξετάστηκαν

Κωδικός κριτηρίου & μονάδες	Κ.1 [1-5]	Π.1 (%)	Π.2 (%)	Π.3 (-)	Π.4 [0/1]	Π.5 [0/1]	Π.6 (έτη)	Ο.1 (%)	Ο.2 (€)	Ο.3 (έτη)
Σ 0	0.00	0.0	0.00	0.600	0	0	0.0	0,00	0	0.0
Σ 1	2.50	46.1	46.26	0.700	0	1	5.8	46.43	316,135	27.6
Σ 2	3.50	46.1	46.26	0.200	1	1	3.8	46.43	308,352	26.9
Σ 3	3.00	29.0	28.94	0.600	0	0	27.9	28.87	38,512	5.4
Σ 4	3.50	20.5	20.38	0.631	0	0	8.6	20.26	12,012	2.4
Σ 5	2.75	66.5	66.54	0.700	0	1	13.8	66.58	354,646	21.6
Σ 6	3.00	66.6	66.64	0.725	0	1	6.2	66.69	328,146	21.2
Σ 7	3.00	76.7	76.57	0.725	0	1	14.1	76.43	366,658	19.4
Σ 8	3.25	66.5	66.54	0.200	1	1	12.2	66.58	346,864	21.1
Σ 9	3.50	66.6	66.64	0.267	1	1	4.5	66.69	320,364	19.5
Σ 10	3.33	76.7	76.57	0.267	1	1	12.5	76.43	358,875	19.0

3.1. Μετατροπή κτιρίου σε nZEB

Σύμφωνα με την ελληνική νομοθεσία [4] ένα νέο κτίριο χαρακτηρίζεται ως nZEB όταν ανήκει στην ενεργειακή κατηγορία Α, και ένα υφιστάμενο όταν ανήκει στην Β+. Στην παρούσα μελέτη περίπτωσης φαίνεται πως τα σενάρια που οδηγούν σε nZEB είναι μόνο τα συνεργατικά, αποτέλεσμα που βρίσκεται σε συμφωνία με τους [16]. Ιδιαίτερα στην κατηγορία Α, οδηγούν μόνο τα σενάρια που περιλαμβάνουν και τις τρεις στρατηγικές αναβάθμισης του κτιρίου (Πίνακας 5).

Πίνακας 5. Ενεργειακή κλάση σεναρίων

Σενάριο Ενεργειακή κλάση	Σ1 Γ	Σ2 Γ	Σ3 Δ	Σ4 Δ	Σ5 [nZEB] Β+	
Σενάριο Ενεργειακή κλάση	Σ6 [nZEB] Β+	Σ7 [nZEB] Α	Σ8 [nZEB] Β+	Σ9 [nZEB] Β+	Σ10 [nZEB] Α	Σ0 Ε

3.2. Κοινωνικά κριτήρια

Βάσει των απαντήσεων των ειδικών, εκτιμάται πως οι ενεργειακές αναβαθμίσεις συνολικά μπορούν να θεωρηθούν εργαλεία εκπαίδευσης για την αειφορία (κριτήριο Κ.1), με χρησιμότερες τεχνικές την εγκατάσταση Φ/Β στοιχείων και το φυτεμένο δώμα. Πιο συγκεκριμένα, 90.77% των απαντήσεων τοποθετούν το φυτεμένο δώμα στο φάσμα «αρκετά έως πολύ χρήσιμο παιδαγωγικό εργαλείο», με την πλειοψηφία των ερωτωμένων (53.08%) να το θεωρούν «πολύ χρήσιμο». Τα ποσοστά, αντίστοιχα, για τα Φ/Β στοιχεία είναι 86.92% και 44.62%.

3.3. Περιβαλλοντικά κριτήρια

Όσον αφορά το κριτήριο της μείωσης χρήσης πρωτογενούς συμβατικής ενέργειας (Π.1), γίνεται φανερό πως κρίσιμος παράγοντας είναι οι ενεργειακές βελτιώσεις του κελύφους. Σε αναλογία με τους [16] και τις [30], καταλήγουμε πως τα μεγαλύτερα ποσοστά εξοικονόμησης ενέργειας επιτυγχάνονται με συνέργειες της βελτίωσης του κελύφους και των Η/Μ συστημάτων, καθώς και της τοποθέτησης Φ/Β στοιχείων: βέλτιστη απόδοση (ποσοστό μείωσης 76.7%) επιτυγχάνεται στα συνδυαστικά σενάρια Σ7 και Σ10, που συνδυάζουν όλες τις στρατηγικές ενεργειακών αναβαθμίσεων. Στη δεύτερη θέση βρίσκονται τα σενάρια που συνδυάζουν την βελτίωση κελύφους με τις άλλες στρατηγικές χωριστά. Πολύ χαμηλότερα βρίσκονται τα σενάρια μεμονωμένων επεμβάσεων.

Όσον αφορά τα κριτήρια που αφορούν την αειφορία στις πόλεις, για τη μείωση των πλημμυρικών φαινομένων καθώς και για την διατήρηση της βιοποικιλότητας στην πόλη (κριτήρια Π.3 και Π.4), κρίσιμος παράγοντας είναι το φυτεμένο δώμα. Για την μείωση της έντασης της αστικής θερμικής νησίδας (κριτήριο Π.5), κρίσιμος παράγοντας είναι η εξωτερική θερμομόνωση του κελύφους του κτιρίου.

Όσον αφορά την ενσωματωμένη ενέργεια των υλικών που προστίθεται κατά τις επεμβάσεις ενεργειακής αναβάθμισης στο κτίριο, η έρευνα καταλήγει στα εξής: Η σύγκριση των υλικών είναι σαφώς υπέρ των καινοτόμων εναλλακτικών υλικών, συμπέρασμα στο οποίο καταλήγουν και οι [8], [30] και [31], σε αντίστοιχες έρευνες. Στη σύγκριση της ενσωματωμένης ενέργειας ανάμεσα στα δύο σενάρια αναβάθμισης του κελύφους, το «συμβατικό» Σ1 είναι 1.5 φορά περισσότερο επιβαρυντικό από το «εναλλακτικό» Σ2. Συγκεκριμένα, η θερμομόνωση του κελύφους με πλάκες εξηλασμένης πολυστερίνης επιβαρύνει με 14 φορές περισσότερη ενσωματωμένη ενέργεια από την αντίστοιχη χρήση κυτταρίνης ως θερμομονωτικό υλικό. Παρομοίως, τα πλαίσια αλουμινίου επιβαρύνουν με 3.5 φορές περισσότερη ενσωματωμένη ενέργεια από τα ξύλινα πλαίσια. Ακόμη διαπιστώθηκε πως η αυξημένη ενσωματωμένη ενέργεια που εμπεριέχεται στην εγκατάσταση φυτεμένου δώματος και οφείλεται στις προστατευτικές μεμβράνες του υποβάθρου της φύτευσης δεν αντιστρέφει την συνολική εικόνα. Εξάλλου, η σύγκριση για το κριτήριο Π.6, τον χρόνο απόσβεσης της ενσωματωμένης ενέργειας, αποβαίνει γενικά υπέρ των σεναρίων που περιλαμβάνουν Φ/Β στοιχεία, λόγω προσθήκης στον ισολογισμό της «καθαρής» ενέργειας από ΑΠΕ. Βέλτιστο σενάριο αναδεικνύεται το συνδυαστικό Σ9 (εναλλακτικό κέλυφος και Φ/Β), με χρόνο απόσβεσης ενσωματωμένη ενέργειας 4.5 χρόνια.

3.4. Οικονομικά κριτήρια

Στο κριτήριο Ο.2 του κόστους επένδυσης, καλύτερα σενάρια είναι τα μεμονωμένα Σ3 και Σ4, της βελτίωσης των Η/Μ συστημάτων και της τοποθέτησης Φ/Β στοιχείων, αντίστοιχα. Παρόλα αυτά, όσον αφορά την αξιολόγηση της συνολικής οικονομικής βιωσιμότητας των σεναρίων, τα συνδυαστικά σενάρια Σ7 και Σ10 που πετυχαίνουν την ενεργειακή κλάση Α, αλλά ταυτόχρονα έχουν και το

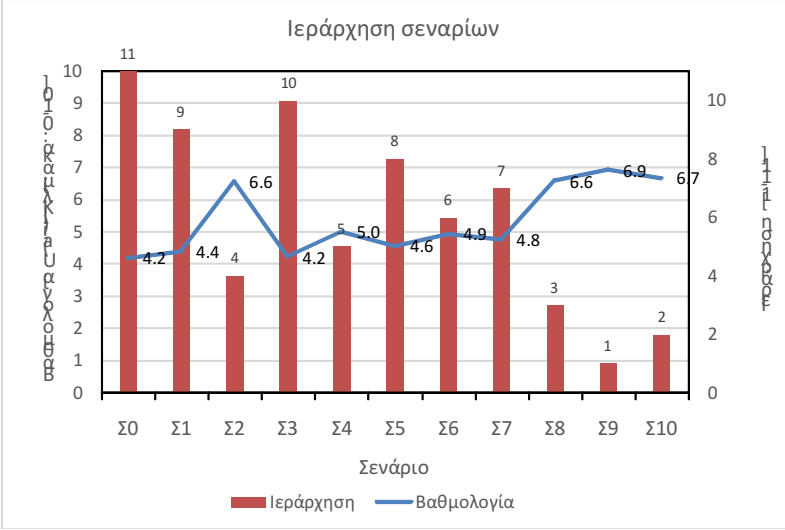
μεγαλύτερο κόστος (κριτήριο Ο.2), οδηγούν στην μεγαλύτερη μείωση του λειτουργικού κόστους (κριτήριο Ο.1) και στον μικρότερο (λίγο κάτω από 20 χρόνια) χρόνο απόσβεσης της επένδυσης (κριτήριο Ο.3). Ακόμη, ένα αξιοσημείωτο αποτέλεσμα υπέρ των συνδυαστικών σεναρίων είναι η σύγκριση του Σ2 (εναλλακτικό κέλυφος), με κόστος περίπου 310,000.00€ και περίοδο αποπληρωμής 26.9 έτη και του Σ9 (εναλλακτικό κέλυφος και Φ/Β στοιχεία), με κόστος περίπου 320,000.00€ και περίοδο αποπληρωμής 19.5 έτη. Φαίνεται πως επενδύοντας επιπλέον χρήματα της τάξης των 10,000.00€, μειώνεται η περίοδος αποπληρωμής της επένδυσης κατά σχεδόν μια δεκαετία, λόγω της παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ, που καλύπτει τις ενεργειακές ανάγκες του κτιρίου, κι έτσι της αντίστοιχης μείωσης του λειτουργικού κόστους του κτιρίου.

3.5. Ιεράρχηση σεναρίων και ανάλυση ευαισθησίας

Χρησιμοποιώντας τις σταθμίσεις των δεικτών βιωσιμότητας (Πίνακας 2) και την ποσοτικοποίησή τους ανά σενάριο (Πίνακας 4), πραγματοποιείται πολυκριτηριακή ανάλυση με τα εξής αποτελέσματα (Εικόνα 3): Βέλτιστο σενάριο αναδεικνύεται το συνεργατικό σενάριο Σ9, που περιλαμβάνει συνέργεια του «εναλλακτικού» κελύφους με το φυτεμένο δώμα και την παραγωγή ενέργειας από Φ/Β στοιχεία. Στις επόμενες θέσεις βρίσκονται τα συνεργατικά σενάρια Σ10 και Σ8 ($2^η$ και $3^η$ θέση, αντίστοιχα) και το μεμονωμένο Σ2 ($4^η$ θέση), δίνοντας το συνολικό προβάδισμα στα σενάρια του «εναλλακτικού» κελύφους. Η μεμονωμένη τοποθέτηση των Φ/Β στοιχείων στο δώμα του κτιρίου έρχεται $5^η$.

Στην μεσαία βαθμίδα κατάταξης βρίσκονται τα σενάρια του «συμβατικού» κελύφους, με το ίδιο μοτίβο στη διάταξη όπως και παραπάνω (Σ6, Σ7 και Σ5 στις θέσεις $6^η$, $7^η$ και $8^η$, αντίστοιχα), επιβεβαιώνοντας το προβάδισμα της στρατηγικής παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ σε σχέση με την βελτίωση των Η/Μ εγκαταστάσεων.

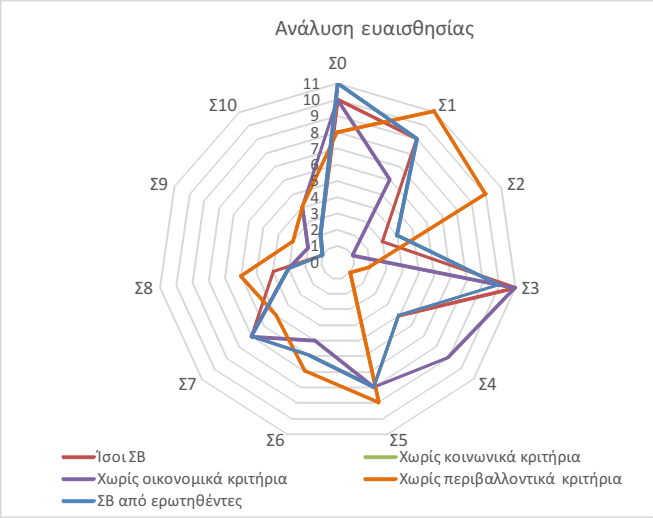
Η ενεργειακή αναβάθμιση μόνο του κτιριακού κελύφους, με συμβατικά υλικά, που μπορεί να δράσουν βλαπτικά στο περιβάλλον (σενάριο Σ1) έρχεται $9^η$, ενώ το σενάριο της μεμονωμένης αναβάθμισης των συγκεκριμένων Η/Μ συστημάτων (Σ3) οριακά ξεπερνά το να παραμείνει το κτίριο ως έχει (Σ0).



Εικόνα 3: Ιεράρχηση σεναρίων

Όσον αφορά την ανάλυση ευαισθησίας, προέκυψε με την αλλαγή των συντελεστών βαρύτητας των κριτηρίων. Εξετάστηκαν οι ακόλουθες περιπτώσεις: α - ίση στάθμιση όλων των δεικτών, β- χωρίς να λαμβάνονται υπόψη τα κοινωνικά κριτήρια, γ- χωρίς να λαμβάνονται υπόψη τα οικονομικά κριτήρια και δ- να αγνοούνται τα περιβαλλοντικά κριτήρια. Τα αποτελέσματα φαίνονται στην Εικόνα 4. Παρατηρείται από την ανάλυση ευαισθησίας ότι η ιεράρχηση των σεναρίων διαφοροποιείται σημαντικά με την αλλαγή των συντελεστών βαρύτητας, επιβεβαιώνοντας την πολυπλοκότητα των σχέσεων μεταξύ των δεικτών βιωσιμότητας της ολιστικής προσέγγισης που επιχειρείται σε αυτήν την ερευνητική εργασία. Εκτός από την περίπτωση του αποκλεισμού των εξεταζόμενων κοινωνικών δεικτών, όπου η

κατάταξη παραμένει η ίδια με εκείνη των συντελεστών βαρύτητας που προέκυψαν από τους ερωτηθέντες (Εικόνα 3), σε όλες τις άλλες περιπτώσεις μπορούν να παρατηρηθούν ενδιαφέρουσες διαφοροποιήσεις. Όταν τοποθετούνται ίσοι συντελεστές βαρύτητας σε όλα τα κριτήρια, το σενάριο Σ2 κατατάσσεται στην 3η θέση (που ήταν η κατάταξη του σεναρίου Σ8). Εάν δεν ληφθούν υπόψη οι προτιμήσεις των ενδιαφερομένων, φαίνεται πιο βιώσιμο να αναβαθμιστεί το κέλυφος του κτιρίου με φιλικά προς το περιβάλλον υλικά, παρά να συνδυαστεί η φιλική προς το περιβάλλον αναβάθμιση του κτιρίου, σε συνέργεια με την αναβάθμιση των Η/Μ συστημάτων (Σ8). Με τους ίδιους συντελεστές βαρύτητας, φαίνεται πιο βιώσιμο να παραμείνει το κτίριο όπως είναι (Σ0 - 10η κατάταξη), παρά να βελτιωθούν τα Η/Μ συστήματα (Σ3 - 11η κατάταξη). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι όταν η ενσωματωμένη ενέργεια, στην οποία έχει δοθεί ο χαμηλότερος συντελεστής στάθμισης από τους ερωτηθέντες (Πίνακας 2), όταν έχει έναν ίσο συντελεστή στάθμισης με τα υπόλοιπα κριτήρια, παίζει τον ίδιο ρόλο. Καθώς το Σ0 έχει τη χαμηλότερη ενσωματωμένη ενέργεια (μηδέν), κατατάσσεται υψηλότερα από το σενάριο Σ3, το οποίο έχει μεγάλη περίοδο απόσβεσης για την ενσωματωμένη ενέργεια (Πίνακας 4). Εκτός από αυτό, τα Η/Μ συστήματα που έχουν εξεταστεί εδώ περιλαμβάνουν θέρμανση από έναν αποδοτικό λέβητα αερίου, το οποίο τελικά δεν είναι η βέλτιστη περίπτωση, σε σύγκριση με άλλες επιλογές θέρμανσης [16].



Εικόνα 4: Ανάλυση ευαισθησίας

Τα σενάρια Σ9 και Σ10 διατηρούν τις υψηλότερες θέσεις, εκτός από όταν δεν λαμβάνονται υπόψη οικονομικά ή περιβαλλοντικά κριτήρια. Σε αυτή την περίπτωση, το υψηλού κόστους σενάριο Σ2 της αναβάθμισης μόνο του κτιριακού κελύφους με οικολογικά υλικά κατατάσσεται στην 1η θέση. Όταν δεν λαμβάνονται υπόψη τα περιβαλλοντικά κριτήρια[1], το οικονομικά αποδοτικό και σχετικά χαμηλού κόστους σενάριο Σ4 (τοποθέτηση φωτοβολταϊκών στοιχείων) κατατάσσεται στην 1η θέση. Μπορεί επίσης να παρατηρηθεί ότι μπορεί τελικά να είναι πιο αειφορικό το να μείνει το κτίριο ως έχει, παρά να αναβαθμισθεί με συστήματα που έχουν υψηλή ενσωματωμένη ενέργεια που αποσβένει με αργούς ρυθμούς.

Γενικά, συνάγεται το συμπέρασμα ότι είναι καλύτερο από αειφορική άποψη να αφεθεί το κτίριο ως έχει, παρά να αναβαθμισθεί ενεργειακά με υλικά που δεν είναι φιλικά προς το περιβάλλον. Σε αντίστοιχο συμπέρασμα έχουν καταλήξει επίσης οι [30].

[1] Φυσικά, το να μη ληφθούν υπόψη περιβαλλοντικά κριτήρια, αντίκειται στην έννοια της αειφορίας. Η περίπτωση αυτή λήφθηκε υπόψη μόνο για λόγους μεθοδολογικής πληρότητας.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκαν κοινωνικά, οικονομικά και περιβαλλοντικά κριτήρια για να εξετασθούν τα εναλλακτικά σενάρια ενεργειακής αναβάθμισης ενός αμόνωτου σχολικού κτιρίου στην κλιματική ζώνη Β της Ελλάδας με προσδοκώμενο χρόνο ζωής σαράντα έτη. Στόχος της έρευνας ήταν η ανάδειξη, μέσω πολυκριτηριακής ανάλυσης, των σεναρίων ενεργειακής αναβάθμισης που μπορούν να χαρακτηρισθούν ως αειφορικά. Προκειμένου να επιλεχθούν τα κριτήρια της αειφορίας, η μεθοδολογία βασίστηκε στους Στόχους Βιώσιμης Ανάπτυξης των Ηνωμένων Εθνών.

Ως πιο αειφορικό σενάριο αναδείχθηκε το συνεργατικό σενάριο Σ9, που περιλαμβάνει βελτίωση του κτιριακού κελύφους με φιλικά προς το περιβάλλον υλικά, τοποθέτηση φυτεμένου δώματος και παραγωγή ΑΠΕ μέσω εγκατάστασης Φ/Β στοιχείων στα δώματα του κτιρίου. Ειδικότερα, από τη διερεύνηση φαίνεται πως το φυτεμένο δώμα και τα Φ/Β στοιχεία είναι κατά γενική εντύπωση συνδεδεμένα, με το αειφορικό κτίριο, όπως διαπιστώθηκε από τις απαντήσεις ειδικών στο σχετικό ερωτηματολόγιο. Ακόμη, το φυτεμένο δώμα και η εξωτερική θερμομόνωση του κελύφους είναι κρίσιμοι παράγοντες για τους δείκτες που αφορούν την αειφορική πόλη. Παρατηρείται επίσης πως η μετατροπή του κτιρίου σε nZEB επιτυγχάνεται μόνο με τα συνεργατικά σενάρια, καθώς επίσης ότι τα σενάρια που περιλαμβάνουν χρήση φιλικών προς το περιβάλλον υλικών επιτυγχάνουν πολύ μικρότερο χρόνο απόσβεσης ενσωματωμένης ενέργειας. Τέλος, τα πιο δαπανηρά ως καθαρή επένδυση σενάρια είναι ταυτόχρονα και τα πιο συμφέροντα από άποψη περιόδου αποπληρωμής. Αναλόγως με το συντελεστή βαρύτητας του κάθε κριτηρίου, μπορεί να προκύψει ότι είναι προτιμότερο, από αειφορικής πλευράς, να παραμείνει το κτίριο ως έχει, παρά να αναβαθμιστεί ενεργειακά είτε με τεχνικές μη φιλικές στο περιβάλλον ή με συνδυασμό τεχνικών που αργούν να αποσβέσουν την ενσωματωμένη τους ενέργεια.

Αξιοσημείωτα είναι επίσης τα αποτέλεσματα της έρευνας ως προς τις εκτιμήσεις των ειδικών που ρωτήθηκαν για τη βαρύτητα του κάθε κριτηρίου: τα κριτήρια που έλαβαν τη χαμηλότερη βαρύτητα από τους ειδικούς είναι η μείωση των πλημμυρικών φαινομένων και η ενσωματωμένη ενέργεια της κατασκευής, γεγονός που δείχνει ότι κατά την αντίληψη των περισσότερων μηχανικών, το κτίριο ως μονάδα δεν συνδέεται με τα πλημμυρικά φαινόμενα, παρόλο που είναι φανερό πως η επανάληψη της χρήσης υλικών και της μορφολογίας ενός μεμονωμένου κτιρίου στον αστικό ιστό μεγιστοποιεί τις επιπτώσεις του και μπορεί κατ' αυτό τον τρόπο να επιδεινώνει τα πλημμυρικά φαινόμενα. Ακόμη, γίνεται φανερό πως οι περισσότεροι μηχανικοί δεν είναι εξοικειωμένοι με την έννοια της ενσωματωμένης ενέργειας και του κύκλου ζωής των υλικών. Κατά την γνώμη μας είναι σημαντικό η έννοια αυτή να εισαχθεί στην εκπαιδευτική και μετεκπαιδευτική διαδικασία των μηχανικών προκειμένου αυτοί να είναι σε θέση να αντιλαμβάνονται και να επιλέγουν τεχνικές και υλικά που όντως μειώνουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και του περιβαλλοντικού αποτυπώματος του κτιρίου, σε όλο τον κύκλο της ζωής του.

Γενικά, από την παρούσα έρευνα τεκμαίρεται πως η αειφορική, με την ολιστική έννοια, αναβάθμιση του κτιρίου δεν ταυτίζεται απαραίτητα με τη μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας. Μια μεθοδολογία πολυκριτηριακής ανάλυσης με τον συνυπολογισμό κοινωνικών, οικονομικών καθώς και επιπλέον περιβαλλοντικών παραγόντων μπορεί να συνεισφέρει ώστε να επιλέγονται αειφορικές λύσεις για την ενεργειακή αναβάθμιση του κτιριακού αποθέματος.

Τέλος, θα ήταν χρήσιμη η περαιτέρω διερεύνηση των επεμβάσεων εξοικονόμησης ενέργειας στον κτιριακό τομέα, υπό το πρίσμα των 17 στόχων βιώσιμης ανάπτυξης των Ηνωμένων Εθνών, ούτως ώστε να καταλήξει σε μια κοινή μεθοδολογία για την αειφορική αναβάθμιση του κτιριακού αποθέματος, ικανή να εφαρμοσθεί για τη διεξαγωγή συμπερασμάτων και χάραξη πολιτικών όχι απλά την ενεργειακή αναβάθμιση του, αλλά για την αειφορική διαχείριση του κτιριακού αποθέματος του πλανήτη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Andersen, I., 2020. "UNEP statement on COVID-19". Ανακτήθηκε 15/02/2020, από: https://www.unenvironment.org/news-and-stories/statement/unep-statement-covid-19

[2] "Έγκριση δεύτερης έκδοσης της Έκθεσης μακροπρόθεσμης στρατηγικής για την κινητοποίηση επενδύσεων για την ανακαίνιση του εθνικού κτιριακού αποθέματος σύμφωνα με την παρ. 2 του άρθρου 6 του ν. 4342/2015 (άρθρο 4 της Οδηγίας 2012/27/ΕΕ)". Απόφ. Αριθμ. ΔΕΠΕΑ/Γ/οικ.175603 (ΦΕΚ Β/2258/2018), Εθνικό Τυπογραφείο, Αθήνα.

[3] Οδηγία 2018/844/ΕΕ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 30ης Μαΐου 2018 για την "Τροποποίηση της οδηγίας 2010/31/ΕΕ για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων και της οδηγίας 2012/27/ΕΕ για την ενεργειακή απόδοση".

[4] Εφημερίδα της Κυβέρνησης της Ελληνικής Δημοκρατίας, 2018, "Έγκριση Εθνικού Σχεδίου αύξησης του αριθμού των κτιρίων με σχεδόν μηδενική κατανάλωση ενέργειας". Αριθμ. ΥΠΕΝ/ΔΕΠΕΑ/85251/242 (ΦΕΚ Β/5447/2018), Εθνικό Τυπογραφείο, Αθήνα.

[5] Szalay, A.Z.Z., 2007, "What is missing from the concept of the new European Building Directive?" Building and Environment, 42(4), pp. 1761-1769.

[6] Chastas, P., Theodosiou, T., and Bikas, D., 2016, "Embodied energy in residential buildings-towards the nearly zero energy building: A literature review". Building and Environment, 105, pp. 267-282.

[7] Srinivasan, R.S., Braham, W.W., Campbell D.E., and Curcija, C.D., 2012, "Re(De)fining net zero energy: renewable energy balance in environmental building design". Building and Environment, 47, pp. 300-315.

[8] Alexandri, E., and Androutsopoulos, A., 2017, "Energy upgrade of existing dwellings in Greece; embodied energy issues". Procedia Environmental Sciences, 38C, pp. 196-203.

[9] Bell, S., and Morse, S., 2012, Sustainability indicators: measuring the immeasurable? Routledge, London.

[10] United Nations, 1987, "Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future". A/42/427/04.08.1987.

[11] ΕΛΣΤΑΤ, 2011, "Πίνακας 7. Κτίρια κατά χρήση και χρονική περίοδο κατασκευής". Ανακτήθηκε 08/08/2020, από https://www.statistics.gr/el/census-buildings-2011

[12] ΕΛΣΤΑΤ, 2011, "Πίνακας 14. Κτίρια κατά χρήση και φορέα ιδιοκτησίας". Ανακτήθηκε 08/08/2020, από https://www.statistics.gr/el/census-buildings-2011

[13] Ballarini, I., Corgnati, S.P. and Corrado, V., 2014. "Use of Reference Buildings to Assess the Energy Saving Potentials of the Residential Building Stock: The Experience of TABULA Project". Energy Policy, 68, pp.273-284.

[14] Li, Y., Kubicki, S., Guerriero, A. and Rezgui, Y., 2019. "Review of Building Energy Performance Certification Schemes towards Future Improvement". Renewable and Sustainable Energy Reviews, 113, pp.109-244.

[15] Sivitanidou, A., & Nikolopoulou, M., 2019, "The Intuitive Bioclimatism and Embedded Sustainability of Cypriot Vernacular Farmhouses, as Principles for their Strategic Restoration and Reuse". IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Vol. 329, No. 1, pp. 012033.

[16] Alexandri, E., and Androutsopoulos, A., 2020, "Multicriteria evaluation of ecolabels for the energy upgrade of dwellings in Greece". International Journal of Sustainable Energy, 39(1), pp. 67-87.

[17] Χαστάς, Π., και Μπίκας, Δ., 2014, "Περιβαλλοντική αξιολόγηση τυπικών κατασκευαστικών λύσεων σε κτίρια κατοικίας" 10ο Εθνικό συνέδριο για τις ήπιες μορφές ενέργειας Θεσσαλονίκη, 26-28.11.2014.

[18] UN, 2015, "Transforming our World: the 2030 Agenda for Sustainable Development". Ανακτήθηκε 05/05/2020, από https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/21252030%20Agenda%20for%20Sustainable%20Development%20web.pdf

[19] Alawneh, R., Ghazali, F. E. M., Ali, H., and Asif, M., 2018. "Assessing the contribution of water and energy efficiency in green buildings to achieve United Nations Sustainable Development Goals in Jordan". Building and Environment, 146, pp 119-132.

[20] Oliva, J.-P., and Courgey, S., 2011, L'Isolation Thermique Écologique. Terre Vivante, Mens.

[21] Hammond, G. P., and Jones, C., 2011, "Embodied energy and carbon in construction materials". Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Energy, 161(2), pp. 87-98.

[22] Berge, B., 2009, The Ecology of Building Materials. Routledge, Abingdon.

[23] Alexandri, E., 2019, "MAUT for the Energy Upgrade of Dwellings". Mendeley Data. Reference Number: 10.17632/d2g67rz5hg.2. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.17632/d2g67rz5hg.2

[24] Ishizaka, A., and Nemery, P., 2013, Multi-Criteria Decision Analysis. Willey & Sons Ltd, Chichester.

[25] ΤΟΤΕΕ 20701-3/2017, Κλιματικά Δεδομένα Ελληνικών περιοχών, Γ' έκδοση (ΦΕΚ Β/4003/2017), ΤΕΕ, Αθήνα.

[26] Tsikra, P., and Andreou, E., 2017, "Investigation of the energy saving potential in existing school buildings in Greece. The role of shading and daylight strategies in visual comfort and energy saving". Procedia Environmental Sciences, 38, pp. 204-211.

[27] Γιάννας, Σ., 2001, Βιοκλιματικές αρχές πολεοδομικού σχεδιασμού. Στο Δ. Λουκόπουλος (Επιμ.), Περιβαλλοντικός σχεδιασμός πόλεων και ανοιχτών χώρων, σ.185-234. Τόμος Α, ΕΑΠ, Πάτρα.

[28] Ευαγγελινός, Ε., 2001, Περιβαλλοντικά Φιλικά Υλικά και Κατασκευές. Στο Δ. Λουκόπουλος (Επιμ.), Περιβαλλοντικός σχεδιασμός πόλεων και ανοιχτών χώρων, σ.235-286. Τόμος Α, ΕΑΠ, Πάτρα.

[29] ΤΟΤΕΕ-20701-2, 2017, Θερμοφυσικές Ιδιότητες Δομικών Υλικών και Έλεγχος της Θερμομονωτικής Επάρκειας των Κτηρίων, Γ' έκδοση (ΦΕΚ Β/4003/2017), ΤΕΕ, Αθήνα.

[30] Zikou, A., and Alexandri, E., 2019, "Multicriteria analysis of the energy upgrade of a heritage, office building". Proc. 12th International Conference on Energy and Climate Change, pp. 259-274.

[31] Alexandri, E., Malamouli, S., and Prinou, A., 2015, "Energy Upgrade of Existing buildings to nearly zero energy consumption ones; embodied energy considerations". Proc. 6th International Renewable and Clean Energy Conference.

ΑΝΑΘΕΩΡΗΜΕΝΕΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΕΠΙΘΕΩΡΗΣΗΣ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΤΗΡΙΩΝ: ΟΙ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΚΑΙ ΨΥΞΗΣ

Κωνσταντίνος Παπουής[1], Φοίβη-Ζωή Μόρσινκ-Γεωργαλή[1], Γεώργιος Χαντζής[2], Πάρις Α. Φωκαΐδης[1*], Άγις Μ. Παπαδόπουλος[2]

[1]Σχολή Μηχανικής και Εφαρμοσμένων Επιστημών, Πανεπιστήμιο Frederick
Φρειδερίκου 7, 1036, Λευκωσία, Κύπρος
[2] Εργαστήριο Κατασκευής Συσκευών Διεργασιών, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τ.Κ. 54124, Θεσσαλονίκη
e-mail: eng.fp@frederick.ac.cy

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διαδικασία της τεχνικής επιθεώρησης είναι απαραίτητη για τη διασφάλιση της αποδοτικής λειτουργίας των συστημάτων θέρμανσης και ψύξης στα κτήρια. Όπως έδειξε η εμπειρία από την εφαρμογή των διατάξεων που ίσχυσαν από το 2002 ως το 2018, οι επιθεωρήσεις των συστημάτων θέρμανσης και ψύξης αποδείχθηκαν ανεπαρκείς. Για το λόγο αυτό, η τροποποιητική οδηγία για την ενεργειακή απόδοση τον κτηρίων 2018/844/ΕΕ της Ευρωπαϊκής Επιτροπής προβλέπει την αναθεώρησή τους, για την εξασφάλιση καλύτερων αποτελεσμάτων. Η νέα οδηγία προβλέπει ότι τα κράτη μέλη θα πρέπει να θεσπίσουν τα αναγκαία εκείνα μέτρα τα οποία θα οδηγήσουν στην καθιέρωση τακτικών επιθεώρησης των προσβάσιμων τμημάτων των συστημάτων θέρμανσης και ψύξης με ή χωρίς εξαερισμό, τα οποία έχουν ωφέλιμη ονομαστική ισχύ άνω των 70kW. Παράλληλα, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή Τυποποίησης (CEN), υιοθετώντας την εντολή M/343 της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, προχώρησε στην αναθεώρηση των πρότυπων, τα οποία εφαρμόζονται για τον υπολογισμό κρίσιμων παραμέτρων σχετικά με την ενεργειακή απόδοση των κτηρίων, συμπεριλαμβανομένων και των προτύπων τα οποία σχετίζονται με διαδικασίες, οι οποίες ακολουθούνται κατά τους τεχνικούς ελέγχους των συστημάτων θέρμανσης και ψύξης των κτηρίων.

Η εργασία αυτή εστιάζεται στις εξελίξεις στον τομέα της επιθεώρησης των συστημάτων θέρμανσης και ψύξης κτηρίων οι οποίες προκύπτουν μέσα από τα αναθεωρημένα Ευρωπαϊκά πρότυπα. Στα πλαίσια της εργασίας θα γίνει μια στοχευμένη παρουσίαση των σημαντικότερων αναθεωρήσεων στις διαδικασίες της τεχνικής επιθεώρησης, και θα παρουσιαστεί η μεθοδολογία βάση της οποίας αυτές υιοθετήθηκαν στις συναφείς διαδικασίες σε Ελλάδα και Κύπρο. Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στις αναθεωρημένες διαδικασίες επιθεώρησης των συστημάτων θέρμανσης με βάση τη σειρά προτύπων EN 15378:2017, καθώς και των συστημάτων κλιματισμού και εξαερισμού βάσει της σειράς προτύπων EN 16798:2017. Στην εργασία παρουσιάζονται επίσης συγκεκριμένες πρόνοιες της νέας μεθοδολογίας επιθεώρησης τεχνικών συστημάτων θέρμανσης και κλιματισμού, όπως αυτές υιοθετήθηκαν στους αναθεωρημένους κανονισμούς επιθεώρησης στην Κύπρο.

Λέξεις Κλειδιά: Τεχνική επιθεώρηση, Συστήματα θέρμανσης-ψύξης, Ευρωπαϊκά πρότυπα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το Στις 30 Μαΐου του 2018 η Ευρωπαϊκή Επιτροπή εξέδωσε την Οδηγία 2018/844/ΕΕ που τροποποιεί την Οδηγία 2010/31/ΕΕ και ορίζει ότι μέχρι το Μάρτιο του 2020 όλα τα Κράτη Μέλη συμπεριλαμβανομένης και της Κύπρου έπρεπε να εναρμονιστούν με τη νέα Οδηγία. Η νέα Οδηγία σε θέματα τεχνικών συστημάτων κτηρίου και επιθεωρήσεων συστημάτων θέρμανσης και κλιματισμού προνοεί ότι:

Κατά το Άρθρο 8:

- Τα κράτη μέλη θεσπίζουν μέτρα, προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η ενεργειακή απόδοση των τεχνικών συστημάτων κτηρίων, οι συστημικές απαιτήσεις όσον αφορά τη συνολική ενεργειακή απόδοση, την ορθή εγκατάσταση και τη σωστή διαστασιολόγηση, ρύθμιση και έλεγχο των τεχνικών συστημάτων που εγκαθίστανται σε υφιστάμενα κτήρια. Τα κράτη μέλη μπορούν επίσης να εφαρμόζουν τις ίδιες απαιτήσεις τεχνικών συστημάτων και σε νέα κτήρια.
- Οι απαιτήσεις όσον αφορά τα συστήματα καθορίζονται για νέα τεχνικά συστήματα κτηρίων ή συστήματα με τα οποία αντικαθίστανται ή αναβαθμίζονται τα υφιστάμενα, και εφαρμόζονται στον βαθμό που αυτό είναι τεχνικά, λειτουργικά και οικονομικά εφικτό.
- Τα κράτη μέλη απαιτούν από τα νέα κτήρια, εφόσον αυτό είναι τεχνικά και οικονομικά εφικτό, να είναι εξοπλισμένα με συστήματα αυτορρύθμισης για την αυτόνομη ρύθμιση της θερμοκρασίας σε κάθε δωμάτιο ή, όπου αυτό δικαιολογείται, σε καθορισμένη θερμική ζώνη της κτιριακής μονάδας. Στα υπάρχοντα κτήρια, η εγκατάσταση συσκευών αυτορρύθμισης απαιτείται όταν αντικαθίσταται η μονάδα παραγωγής θερμότητας και εφόσον αυτό είναι τεχνικά και οικονομικά εφικτό.
- Τα κράτη μέλη μεριμνούν ώστε, όταν εγκαθίσταται, αντικαθίσταται ή αναβαθμίζεται κάποιο τεχνικό σύστημα κτηρίου, να αξιολογείται η συνολική ενεργειακή απόδοση του μεταβαλλόμενου τμήματος και, όπου ενδείκνυται, του συνόλου του συστήματος. Τα αποτελέσματα τεκμηριώνονται και διαβιβάζονται στον ιδιοκτήτη του κτηρίου, ώστε να παραμένουν διαθέσιμα και να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για επαλήθευση της συμμόρφωσης με τις ελάχιστες απαιτήσεις και για την έκδοση πιστοποιητικών ενεργειακής απόδοσης. Με την επιφύλαξη του Άρθρου 12, τα κράτη μέλη αποφασίζουν εάν απαιτείται η έκδοση νέου πιστοποιητικού ενεργειακής απόδοσης.

Κατά το Άρθρο 14:

- Τα κράτη μέλη θεσπίζουν τα αναγκαία μέτρα για την καθιέρωση τακτικών επιθεωρήσεων των προσβάσιμων τμημάτων (μονάδα παραγωγής θερμότητας, σύστημα ελέγχου, κυκλοφορητές, κ.α.) των συστημάτων θέρμανσης ή των συστημάτων συνδυασμένης θέρμανσης και εξαερισμού χώρου ωφέλιμης ονομαστικής ισχύος άνω των 70 kW.. Η επιθεώρηση περιλαμβάνει αξιολόγηση του βαθμού απόδοσης και της διαστασιολόγησης της μονάδας παραγωγής θερμότητας και λαμβάνει υπόψη, ενδεχομένως, τις δυνατότητες του συστήματος θέρμανσης ή του συστήματος συνδυασμένης θέρμανσης και εξαερισμού χώρου να βελτιστοποιήσει την απόδοσή του σε τυπικές ή μέσες συνθήκες λειτουργίας.
- Τα τεχνικά συστήματα κτηρίων που καλύπτονται ρητά από δηλωθείσα απαίτηση ενεργειακής απόδοσης ή από σχετική συμβατική υποχρέωση η οποία να προσδιορίζει συγκεκριμένο επίπεδο βελτίωσης της ενεργειακής τους απόδοσης, όπως επί παραδείγματι οι συμβάσεις ενεργειακής απόδοσης ή τα κτήρια των οποίων τη λειτουργία έχει αναλάβει φορέας εκμετάλλευσης ή διαχειριστής δικτύου και τα οποία, ως εκ τούτου, υπόκεινται σε μέτρα παρακολούθησης της απόδοσής τους, εξαιρούνται από τις απαιτήσεις της επιθεώρησης όπως προσδιορίζεται πιο πάνω, με την προϋπόθεση ότι ο συνολικός αντίκτυπος αυτής της προσέγγισης είναι ισοδύναμος με τον αντίκτυπο που καθορίζεται πιο πάνω.
- Τα κράτη μέλη καθορίζουν τις απαιτήσεις προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι, εφόσον είναι τεχνικά και οικονομικά εφικτό, τα μη οικιστικά κτίρια με συστήματα θέρμανσης ή συστήματα συνδυασμένης θέρμανσης και εξαερισμού χώρου ωφέλιμης ονομαστικής ισχύος άνω των 290 kW, θα έχουν εξοπλιστεί έως το 2025 με συστήματα αυτοματισμού και ελέγχου. Τα συστήματα αυτά εξαιρούνται από τις διαδικασίες επιθεώρησης.

Κατά το Άρθρο 15:

- Τα κράτη μέλη θεσπίζουν τα αναγκαία μέτρα για την καθιέρωση τακτικών επιθεωρήσεων των προσβάσιμων τμημάτων συστημάτων κλιματισμού, ή συστημάτων συνδυασμού κλιματισμού

και εξαερισμού, ωφέλιμης ονομαστικής ισχύος άνω των 70 kW. Η επιθεώρηση περιλαμβάνει αξιολόγηση του βαθμού απόδοσης και της διαστασιολόγησης του συστήματος κλιματισμού και λαμβάνει υπόψη, τις δυνατότητες του συστήματος κλιματισμού ή του συστήματος συνδυασμού κλιματισμού και εξαερισμού να βελτιστοποιήσει την απόδοσή του υπό τυπικές ή μέσες συνθήκες λειτουργίας.

- Τα τεχνικά συστήματα κτηρίων που καλύπτονται ρητά από δηλωθείσα απαίτηση ενεργειακής απόδοσης ή από σχετική συμβατική υποχρέωση η οποία να προσδιορίζει συγκεκριμένο επίπεδο βελτίωσης της ενεργειακής τους απόδοσης, όπως επί παραδείγματι οι συμβάσεις ενεργειακής απόδοσης ή τα κτήρια των οποίων τη λειτουργία έχει αναλάβει φορέας εκμετάλλευσης ή διαχειριστής δικτύου και τα οποία, ως εκ τούτου, υπόκεινται σε μέτρα παρακολούθησης της απόδοσής τους, εξαιρούνται από τις πιο πάνω απαιτήσεις, υπό την προϋπόθεση ότι ο συνολικός αντίκτυπος της προσέγγισης αυτής είναι ισοδύναμος με τον αντίκτυπο που προκύπτει από τις απαιτήσεις της παραγράφου 1.
- Τα κράτη μέλη καθορίζουν τις απαιτήσεις προκειμένου να εξασφαλιστεί, εφόσον είναι τεχνικά και οικονομικά εφικτό, ότι τα μη οικιστικά κτήρια με σύστημα κλιματισμού, ή συνδυασμού κλιματισμού και εξαερισμού, ονομαστικής ισχύος άνω των 290 KW θα έχουν εξοπλιστεί έως το 2025 με συστήματα αυτοματισμού και ελέγχου. Τα συστήματα αυτά εξαιρούνται από τις διαδικασίες επιθεώρησης.

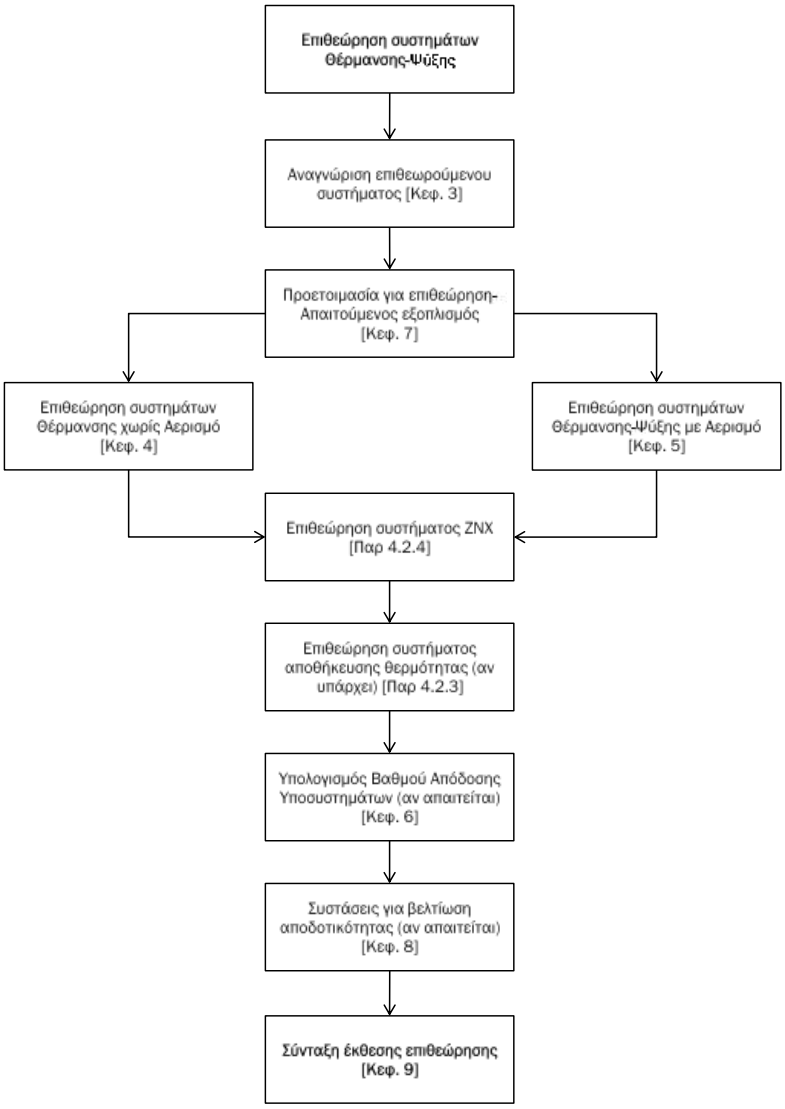
Επίσης η Ευρωπαϊκή Επιτροπή Τυποποίησης (CEN) στο πλαίσιο της εντολής Μ/343 της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, έχει πρόσφατα αναθεωρήσει τα Πρότυπα για την Ενεργειακή Απόδοση των Κτηρίων.

Στην παρούσα εργασία εξετάζονται η ανάπτυξη και συγγραφή των Μεθοδολογιών Επιθεώρησης Συστημάτων Θέρμανσης με Αερισμό (ΜΕΣΘΑΕ) και Κλιματισμού/Ψύξης με Αερισμό, οι οποίες θα συμπεριλαμβάνουν την αναθεώρηση της μεθόδου επιθεώρησης συστήματος θέρμανσης με ή χωρίς αερισμό/εξαερισμό, καθώς και του συστήματος κλιματισμού/ψύξης με αερισμό/εξαερισμό, αντίστοιχα, με βάση τα Νέα Πρότυπα. Δεδομένου των πιο πάνω, η αναθεώρηση της Μεθόδου Επιθεωρήσεων Συστημάτων Θέρμανσης και Κλιματισμού με ή χωρίς Αερισμό/Εξαερισμό (ΜΕΣΘΚΑΕ) κρίνεται επιτακτική.

Για σκοπούς ανάπτυξης των μεθόδων επιθεώρησης, ελήφθησαν υπόψη τα ακόλουθα ευρωπαϊκά πρότυπα:

1. Για τη μέθοδο επιθεώρησης των συστημάτων θέρμανσης:
   - Πρότυπο EN15378-1:2017
   - Πρότυπο CEN/TR15378-2:2017
   - Πρότυπο EN15378-3:2017
   - Πρότυπο CEN/TR15378-4:2017
2. Για τη μέθοδο επιθεώρησης των συστημάτων κλιματισμού με αερισμό
   - Πρότυπο CEN/TR16798-18:2017
   - Πρότυπο EN 16798-17:2017
3. Για την μέθοδο επιθεώρησης του συστήματος αερισμού του κτηρίου
   - Πρότυπο EN16798-9:2017

Η συχνότητα των επιθεωρήσεων καθορίζεται από διατάγματα τα οποία εκδίδονται τακτικά από τον Αρμόδιο Υπουργό. Η συχνότητα επιθεώρησης των προσβάσιμων τμημάτων των συστημάτων θέρμανσης ή των συστημάτων συνδυασμού θέρμανσης και εξαερισμού και των συστημάτων κλιματισμού ή των συστημάτων συνδυασμού κλιματισμού και εξαερισμού, ωφέλιμης ονομαστικής ισχύος μεγαλύτερης των 70 kW, καθορίζεται στα πέντε (5) έτη και διενεργείται σύμφωνα με τον «Οδηγό Επιθεώρησης Συστημάτων Θέρμανσης και Συστημάτων Κλιματισμού». Στα ακόλουθα διαγράμματα ροής παρουσιάζεται συνοπτικά η διαδικασία επιθεώρησης συστημάτων θέρμανσης και συστημάτων κλιματισμού.



Διάγραμμα 1: Διάγραμμα ροής της μεθόδου επιθεώρησης

Διάγραμμα 2: Διαδικασία επιθεώρησης συστημάτων και υποσυστημάτων

2. Διαδικασίες επιθεώρησης συστημάτων θέρμανσης χωρίς αερισμό

2.1. Εισαγωγή

Στην ενότητα αυτή περιγράφονται οι διαδικασίες οι οποίες ακολουθούνται κατά την επιθεώρηση των συστημάτων παραγωγής θέρμανσης χωρίς αερισμό και των συστημάτων διανομής θέρμανσης χωρίς αερισμό από το σύστημα παραγωγής μέχρι το κτήριο, αλλά και εντός του κτηρίου. Περιγράφονται επίσης οι διαδικασίες επιθεώρησης επιπρόσθετων στοιχείων του συστήματος διανομής θέρμανσης, όπως το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας και το σύστημα ζεστού νερού χρήσης. Για σκοπούς ολοκληρωμένης

υλοποίησης της προτεινόμενης διαδικασίας, ο επιθεωρητής θα πρέπει να προχωρά στον υπολογισμό μεγεθών, όπως ο βαθμός απόδοσης και ο εποχιακός βαθμός απόδοσης.

2.2. Διαδικασία επιθεώρησης συστήματος παραγωγής θέρμανσης χωρίς αερισμό

Η επιθεώρηση του συστήματος παραγωγής θερμότητας περιλαμβάνει μεταξύ άλλων την περιγραφή του συστήματος παραγωγής θερμότητας, την αξιολόγηση του βαθμού απόδοσης και της διαστασιολόγησης του συστήματος παραγωγής θερμότητας, την αξιολόγηση της ενεργειακής απόδοσης και της διαστασιολόγησης άλλων συστημάτων παραγωγής θερμότητας, καθώς και την τεχνική επιθεώρηση στα συστήματα ελέγχου του συστήματος. Κατά την επιθεώρηση του συστήματος παραγωγής θερμότητας αρχικά καθορίζεται το επίπεδο επιθεώρησης του συστήματος.. Τα δύο επίπεδα επιθεώρησης περιλαμβάνουν τα συστήματα θέρμανσης-κλιματισμού σε μεμονωμένες κατοικίες ή κτήρια με αυτόνομο σύστημα θέρμανσης-κλιματισμού και τα κτήρια με κεντρικό σύστημα παραγωγής θερμότητας. Η καταγραφή των γενικών πληροφοριών που αφορούν το σύστημα που επιθεωρείται, περιλαμβάνει εκτός των άλλων και τον καθορισμό της ταυτότητας του συστήματος, δηλαδή μίας μοναδικής ακολουθίας χαρακτήρων την οποία μπορεί να καθορίσει ο επιθεωρητής, και η οποία θα ταυτοποιεί το συγκεκριμένο σύστημα. Κατά την επιθεώρηση του συστήματος παραγωγής θερμότητας, συλλέγονται και αξιολογούνται όλα τα απαραίτητα τεχνικά έγγραφα, όπως οι προηγούμενες εκθέσεις επιθεώρησης, το χρονικό μοτίβο χρήσης συστήματος, τα μηχανολογικά σχέδια και το αρχείο συντήρησης. Η αξιολόγηση της επάρκειας της συντήρησης του συστήματος γίνεται με βάση τις οδηγίες του κατασκευαστή και του μηχανολόγου μελετητή του συστήματος και η συντήρηση διενεργείται σύμφωνα με τον «Οδηγό Συντήρησης Συστημάτων Κλιματισμού» και τον «Οδηγό Συντήρησης Συστημάτων Θέρμανσης με Λέβητες» που βρίσκονται αναρτημένοι στην ιστοσελίδα της Υπηρεσίας Ενέργειας. Τα δε προσόντα των εγκαταστατών και αυτών που ρυθμίζουν και ελέγχουν τα τεχνικά συστήματα κτηρίων καθορίζονται από την Εθνική Νομοθεσία Κ.Δ.Π.285/2018.

Ο έλεγχος των μετρητικών οργάνων και των αυτοματισμών που βρίσκονται εγκατεστημένοι στο χώρο του συστήματος παραγωγής θερμότητας και εξυπηρετούν την ομαλή λειτουργία του, περιλαμβάνει τον έλεγχο της χωροθέτησης, της επάρκεια λειτουργίας και ρυθμίσεων, καθώς και της αλληλουχίας λειτουργίας, σε περίπτωση περισσοτέρων του ενός συστήματος θέρμανσης. Οι τιμές των μετρητών που αφορούν και καταγράφουν την κατανάλωση ενεργειακών πόρων περιλαμβάνουν την παροχή καυσίμου, την στάθμη καυσίμου στο δοχείο αποθήκευσης, την βοηθητική ενέργεια (auxiliary energy), το ζεστό νερό χρήσης, την κατανάλωση νερού δικτύου και τη θερμότητα για τη θέρμανση των χώρων.

Ο υπολογισμός του βαθμού απόδοσης του συστήματος παραγωγής θερμότητας, περιλαμβάνει την καταγραφή και τον υπολογισμό της παρεχόμενης ενέργειας στην είσοδο του συστήματος, της κατανάλωσης ενέργειας, των ρυθμίσεων, του βαθμού απόδοσης και του εποχιακού βαθμού απόδοσης του συστήματος. Επιπρόσθετα, περιλαμβάνει την καταγραφή, αξιοποίηση και υπολογισμό άλλων απωλειών του συστήματος παραγωγής ενέργειας, οι οποίες μπορεί να οφείλονται π.χ. σε απώλειες ακτινοβολίας ή και κατάστασης αναμονής (stand-by mode), των ρυθμίσεων του λέβητα, και της ενδεχόμενης υπερδιαστασιολόγησής του. Αυτά γίνονται βάσει των προβλεπόμενων διαδικασιών μέτρησης και υπολογισμού του βαθμού απόδοσης. Για τη σύνταξη και παράδοση τηςέκθεσης συστάσεων, οι οποίες οδηγούν στην αποδοτικότερη ενεργειακή απόδοση του συστήματος παραγωγής θερμότητας και οι οποίες θα πρέπει να είναι υλοποιήσιμες με βάση δείκτες οικονομοτεχνικής ανάλυσης και άλλες παραμέτρους, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη το νομικό πλαίσιο, η σύγκριση των ονομαστικών και των πραγματικών τιμών λειτουργίας των στοιχείων που επιθεωρούνται, οι οδηγίες του κατασκευαστή, οι μέσες τιμές για παρόμοιου τύπου διατάξεις, οι βέλτιστες πρακτικές και τα αποτελέσματα προηγούμενων επιθεωρήσεων.

2.2.1. Διαδικασία μέτρησης βαθμού απόδοσης καύσης

Η διαδικασία της μέτρησης περιλαμβάνει τη λήψη δείγματος καυσαερίων από την καπνοδόχο του λέβητα. Η δειγματοληψία πραγματοποιείται σε απόσταση τριών διαμέτρων της καπνοδόχου, από το σημείοεξόδου των καυσαερίων από τον λέβητα. Κατά την διαδικασία πραγματοποιούνται μετρήσεις της θερμοκρασίας προσαγωγής αέρα στην είσοδο του καυστήρα,της θερμοκρασίας καυσαερίων, της συγκέντρωσης οξυγόνου στα καυσαέρια και της θερμοκρασίας αέρα καύσης στο ίδιο σημείο. Οι μετρήσεις διενεργούνται με αναλυτή καυσαερίων, οι ιδιότητες του οποίου συμμορφώνονται με το πρότυπο EN 50379.

2.2.2. Υπολογισμός βαθμού απόδοσης λέβητα

Ο βαθμός απόδοσης της καύσης υπολογίζεται σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$\eta_{comb} = 100 - a_{ch,on} + a_{cond} \quad [1]$$

όπου:

- $\alpha_{ch,on}$ οι απώλειες καπνοδόχου όταν ο λέβητας βρίσκεται σε λειτουργία
- α_{cond} ο συντελεστής ανάκτησης θερμότητας με συμπύκνωση

Για υψηλές θερμοκρασίες καυσαερίων θ_{fg}, και εκεί όπου η συμπύκνωση δεν είναι δυνατή, ο υπολογισμός του συντελεστή ανάκτησης θερμότητας με συμπύκνωση θεωρείται ίσος με 0.

Η σχέση 1 δίνει το βαθμό απόδοσης του λέβητα, σύμφωνα με την κατώτερη θερμογόνο δύναμη του καυσίμου H_i. Στις περιπτώσεις όπου ο υπολογισμός πραγματοποιείται με τη χρήση της ανώτερης θερμογόνου δύναμης του καυσίμου H_S, τότε ο βαθμός απόδοσης της καύσης υπολογίζεται σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$\eta_{comb,Hs} = 100 - a_{ch,on,Hs} + a_{cond,Hs} \quad [2]$$

όπου:

- $\alpha_{ch,on,Hs}$ οι απώλειες καπνοδόχου όταν ο λέβητας είναι σε λειτουργία, για ανώτερη θερμογόνο δύναμη
- $\alpha_{cond,Hs}$ ο συντελεστής ανάκτησης θερμότητας με συμπύκνωση, για την ανώτερη θερμογόνο δύναμη

2.2.3. Μεθοδολογίες υπολογισμού εποχιακού βαθμού απόδοσης

- Κυκλική μεθοδολογία

Ο εποχιακός βαθμός απόδοσης με βάση την κυκλική μεθοδολογία εξαρτάται από τον βαθμό απόδοσης καύσης, το μέσο φορτίο του λέβητα β_{comb}, τον συντελεστή απωλειών α_{ge} και τον συντελεστή απωλειών καπνοδόχου $\alpha_{ch,off}$. Ο υπολογισμός του εποχιακού βαθμού απόδοσης καύσης γίνεται σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$\eta_{b,seas} = \eta_{comb} - \left(\frac{1}{\beta_{comb}} - 1\right) \times \alpha_{ch,off} - \frac{1}{\beta_{comb}} \times \alpha_{ge} \quad [3]$$

- Μέθοδος συνολικών απωλειών αναμονής

Η διαδικασία υπολογισμού του εποχιακού βαθμού απόδοσης με τις συνολικές απώλειες αναμονής γίνεται με βάση τον υπολογισμό του βαθμού απόδοσης καύσης, του μέσου φορτίου λέβητα β_{comb}, του συντελεστή απωλειών α_{ge} και του συντελεστή λειτουργίας αναμονής α_{PO}. Ο υπολογισμός του εποχιακού βαθμού απόδοσης καύσης τελικά πραγματοποιείται σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$\eta_{b;seas} = \left(\eta_{comb} - a_{ge}\right) \times \frac{100 - \frac{\alpha_{PO}}{\beta_{comb}}}{100 - \alpha_{PO}} \quad [4]$$

3. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΕΠΙΘΕΩΡΗΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΜΕ ΑΕΡΙΣΜΟ

3.1. Εισαγωγή

Στην ενότητα αυτή περιγράφονται οι διαδικασίες οι οποίες ακολουθούνται κατά την επιθεώρηση συστημάτων κλιματισμού για ψύξη και θέρμανση και του συστήματος μηχανικού εξαερισμού. Περιγράφονται επίσης οι διαδικασίες επιθεώρησης επιπρόσθετων στοιχείων, όπως το σύστημα διανομής ψυκτικού μέσου και αέρα, οι τερματικές μονάδες και τα συστήματα ελέγχου. Για σκοπούς ολοκληρωμένης υλοποίησης της προτεινόμενης διαδικασίας, ο επιθεωρητής θα πρέπει να προβαίνει στον υπολογισμό μεγεθών, όπως ο βαθμός απόδοσης και ο εποχιακός βαθμός απόδοσης.

Όλες οι προαναφερθείσες διαδικασίες επιθεώρησης περιλαμβάνουν οπτική επιθεώρηση κατά την οποία ελέγχονται τα συστήματα για ενδείξεις που μπορεί για παράδειγμα να υποδεικνύουν φθορές ή μη ικανοποιητική κατάσταση του κελύφους της μονάδας, μη ικανοποιητικό συφωνισμό συμπυκνωμάτων, ασυμφωνία με τη μηχανολογική μελέτη ή τα σχέδια, ανεπαρκή θερμομόνωση ή στεγανότητα της μονάδας, του κελύφους, των σωληνώσεων των αγωγών. Υπάρχουν και άλλες ενδείξεις που διαφοροποιούνται ανάλογα με το σύστημα που επιθεωρείται, όπως είναι η ανεπαρκής λειτουργία των

μετρητικών οργάνων θερμοκρασίας και πίεσης για την παραγωγή ψύξης, του στοιχείου ανεμιστήρα για τις τερματικές μονάδες, των βαλβίδων συστήματος ύγρανσης για τις κεντρικές κλιματιστικές μονάδες ή των βαλβίδων ψυκτικού μέσου για τα συστήματα μηχανικού εξαερισμού.

Η συλλογή και αξιολόγηση όλων των απαραίτητων τεχνικών εγγράφων που αφορούν τη μονάδα παραγωγής ψύξης, τις τερματικές μονάδες και την Κεντρική Κλιματιστική Μονάδα που επιθεωρούνται περιλαμβάνουν τις οδηγίες λειτουργίας και συντήρησης, τα φύλλα συμμόρφωσης, τα μηχανολογικά σχέδια και άλλα έγγραφα. Η συλλογή των τεχνικών πληροφοριών σε σχέση με το σύστημα που θα τύχει επιθεώρησης περιλαμβάνει εκτός των άλλων και τον καθορισμό της ταυτότητας του συστήματος, δηλαδή μίας μοναδικής ακολουθίας χαρακτήρων την οποία μπορεί να καθορίσει ο επιθεωρητής, και η οποία θα ταυτοποιεί το συγκεκριμένο σύστημα, τον τύπο του συστήματος και τον τύπο ελέγχου του συστήματος. Παράλληλα αξιολογείται η συμφωνία μεταξύ εγκατάστασης και της μηχανολογικής μελέτης/σχεδίωνων ,αλλά και μεταξύ προγράμματος λειτουργίας και ωραρίου λειτουργίας του κτηρίου. Άλλο ένα κοινό σημείο μεταξύ των διαδικασιών επιθεώρησης είναι η καταγραφή των τεχνικών χαρακτηριστικών των μονάδων παραγωγής ψύξης, των συστημάτων ελέγχου τερματικών μονάδων και εξαερισμού, του δικτύου διανομής και των κεντρικών κλιματιστικών μονάδων. Η συλλογή και η αξιολόγηση όμως των τεχνικών αυτών πληροφοριών διαφέρει για κάθε διαδικασία.

3.2. Διαδικασία επιθεώρησης συστήματος παραγωγής ψύξης

Η επιθεώρηση του συστήματος παραγωγής ψύξης θα πρέπει να περιλαμβάνει την περιγραφή και την αξιολόγηση του βαθμού απόδοσης του συστήματος παραγωγής ψύξης, καθώς και την αξιολόγηση της διαστασιολόγησης του συστήματος παραγωγής ψύξης και την τεχνική επιθεώρηση των συστημάτων ελέγχου. Η καταγραφή των τιμών των μετρητών, οι οποίοι σχετίζονται με την κατανάλωση ενεργειακών πόρων παροχής ηλεκτρισμού και BMS λαμβάνει χώρα, και όπου είναι δυνατό γίνεται επίσης καταγραφή και προηγούμενης τιμής σε χρονικά προσδιορισμένο σημείο. Κατά την επιθεώρηση του συστήματος παραγωγής ψύξης, συλλέγονται και αξιολογούνται όλα τα απαραίτητα τεχνικά έγγραφα, όπως η ονομαστική ισχύς της μονάδας σε λειτουργία ψύξης και θέρμανσης, η ηλεκτρική ισχύς εισόδου και ο συνολικός χρόνος λειτουργίας της μονάδας ανά έτος. Εκτός αυτών, σημαντικά στοιχεία αποτελούν ο ονομαστικός βαθμός ενεργειακής απόδοσης (EER), ο εποχιακός βαθμός ενεργειακής απόδοσης (SEER), ο ονομαστικός συντελεστής απόδοσης (COP), ο εποχιακός συντελεστή απόδοσης (SCOP) και οι συνθήκες εξωτερικού περιβάλλοντος. Άλλα στοιχεία που λαμβάνονται υπόψη είναι η θερμοκρασία προσαγωγής και επιστροφής του ψυκτικού ρευστού και του νερού ή αέρα, το είδος του συμπιεστή (π.χ. κοχλιοειδής, σπειροειδής), ο τύπος του συμπυκνωτή, καθώς και ο τύπος και η ισχύς των ανεμιστήρων ή των κυκλοφορητών.

3.3. Διαδικασία επιθεώρησης τερματικών μονάδων

Κατά την επιθεώρηση των τερματικών μονάδων θα πρέπει να ακολουθείται ανάλογη διαδικασία όπως και στην περίπτωση της επιθεώρησης του συστήματος παραγωγής ψύξης. Αυτό σημαίνει πως ο επιθεωρητής θα πρέπει να καταγράφει γενικές πληροφορίες για το σύστημα, να συλλέγει τα απαραίτητα έγγραφα και τεκμήρια για την επιθεώρηση, να εκτελεί οπτικό έλεγχο της κατάστασης των τερματικών μονάδων, να καταγράφει τις τιμές των διάφορων μετρητών, τα τεχνικά χαρακτηριστικά των τερματικών μονάδων και των συστημάτων ελέγχου. Στα τεχνικά χαρακτηριστικά που συλλέγονται περιλαμβάνονται η ονομαστική ισχύς για ψύξη και θέρμανση, η ηλεκτρική ισχύς και η ισχύς των ανεμιστήρων, ο συνολικός χρόνος λειτουργίας της μονάδας ανά έτος για ψύξη και θέρμανση, η εσωτερική θερμοκρασία,η σχετική υγρασία λειτουργίας, η παροχή αέρα, η θερμοκρασία αέρα προσαγωγής και επιστροφής, η θερμοκρασία νωπού αέρα κατά τη θερινή και χειμερινή περίοδο, καθώς και η παροχή ψυκτικού και θερμικού μέσου.

3.4. Διαδικασία επιθεώρησης δικτύου διανομής

Για την επιθεώρηση του δικτύου διανομής ψύξης/θέρμανσης από τη μονάδα παραγωγής ψύξης/θέρμανσης προς τις τερματικές μονάδες του κτηρίου θα πρέπει να ακολουθείται ανάλογη διαδικασία όπως και στην περίπτωση της επιθεώρησης του συστήματος παραγωγής ψύξης. Αυτό σημαίνει πως ο επιθεωρητής θα πρέπει να καταγράφει γενικές πληροφορίες για το δίκτυο, να εκτελεί οπτικό έλεγχο της κατάστασης του δικτύου, να καταγράφει τις τιμές των διάφορων μετρητών, καθώς και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του δικτύου. Η συλλογή και η αξιολόγηση των τεχνικών πληροφοριών του δικτύου διανομής που θα τύχει επιθεώρησης, περιλαμβάνει τον τύπο αυτονόμησης, το μέσο μεταφοράς της θερμότητας προς τις τερματικές μονάδες, τη θερμοκρασία προσαγωγής και επιστροφής, την χωρητικότητα και γενική περιγραφή του δοχείου αδράνειας και τον τύπο, την ισχύ και την ενεργειακή κλάση των κυκλοφορητών.

3.5. Διαδικασία επιθεώρησης Κεντρικών Κλιματιστικών Μονάδων (Κ.Κ.Μ)

Για την επιθεώρηση Κεντρικών Κλιματιστικών Μονάδων, θα πρέπει να ακολουθείται ανάλογη διαδικασία όπως και στην περίπτωση της επιθεώρησης του συστήματος παραγωγής ψύξης/θερμότητας. Αυτό σημαίνει πως ο επιθεωρητής θα πρέπει να καταγράφει τις τιμές των διάφορων μετρητών, τις γενικές πληροφορίες για το κτήριο και το σύστημα, τα τεχνικά χαρακτηριστικά της Κ.Κ.Μ και των συστημάτων ελέγχου της Κ.Κ.Μ. Επιπρόσθετα, κατά τον έλεγχο των Κεντρικών Κλιματιστικών Μονάδων, ο επιθεωρητής θα πρέπει να συλλέγει τα απαραίτητα έγγραφα, να κάνει την τεκμηρίωση για την επιθεώρηση και να εκτελεί οπτικό έλεγχο της κατάστασης της Κ.Κ.Μ. Επίσης, η συλλογή και αξιολόγηση των τεχνικών πληροφοριών της μονάδας που επιθεωρείται, περιλαμβάνει την ενεργειακή σήμανση της μονάδας, την ονομαστική ισχύ για ψύξη και θέρμανση, το συνολικό χρόνο λειτουργίας της μονάδας το έτος για ψύξη και θέρμανση, την θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία των θερμαινόμενων χώρων, την παροχή αέρα, την εκτιμώμενη απαίτηση εξαερισμού και την παροχή ψυκτικού/θερμικού μέσου. Άλλα στοιχεία που περιλαμβάνονται στις συλλεγόμενες πληροφορίες είναι η θερμοκρασία και η απόλυτη υγρασία νωπού αέρα για τη θερινή και τη χειμερινή περίοδο, η θερμοκρασία προσαγωγής και επιστροφής αέρα, το ποσοστό ανακυκλοφορίας αέρα, ο τύπος, η ειδική ισχύς και η κατηγορία των ανεμιστήρων προσαγωγής και επιστροφής. Η εσωτερική ειδική ισχύς (SFP) μονάδας, η ειδική ισχύς εισόδου (SPI) και η ειδική ενεργειακή κατανάλωση (SEC) για οικιακές μονάδες αμφίδρομης ροής, όπως αυτές δίνονται από τον κατασκευαστή ή από δελτίο Ecodesign, καθώς επίσης ο τύπος και ο αριθμός φίλτρων αέρα, η κλάση των φίλτρων, η εκτίμηση της απαιτούμενης κλάσης φίλτρων, ο τύπος και ο αριθμός συστημάτων ύγρανσης αέρα και η ποσότητα υδρατμών, ο τύπος εναλλάκτη ανάκτησης θερμότητας και το ποσοστό ανάκτησης θερμότητας και υγρασίας είναι και αυτά στοιχεία που συλλέγονται για την αξιολόγηση των τεχνικών πληροφοριών της μονάδας.

3.6. Διαδικασία επιθεώρησης συστημάτων μηχανικού εξαερισμού

Για την επιθεώρηση των συστημάτων μηχανικού εξαερισμού θα πρέπει να ακολουθείται ανάλογη διαδικασία όπως και στην περίπτωση της επιθεώρησης του συστήματος παραγωγής ψύξης. Αυτό σημαίνει πως ο επιθεωρητής θα πρέπει να καταγράφει τις τιμές των διάφορων μετρητών, τις γενικές πληροφορίες για το κτήριο και το σύστημα, τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος μηχανικού αερισμού, και να εκτελεί οπτικό έλεγχο της κατάστασης του. Η συλλογή και η αξιολόγηση όλων των απαραίτητων τεχνικών πληροφοριών του συστήματος εξαερισμού που επιθεωρείται, περιλαμβάνει τον τύπο και τον αριθμό φίλτρων προσαγωγής και απαγωγής, την θερμοκρασία και σχετική υγρασία λειτουργίας, την παροχή αέρα, την εκτιμώμενη απαίτηση εξαερισμού, το ποσοστό ανάκτησης θερμότητας και υγρασίας. Άλλα στοιχεία που χρησιμοποιούνται κατά την αξιολόγηση είναι, ο τύπος των ανεμιστήρων προσαγωγής και επιστροφής, η ειδική ισχύς και η κατηγορία ανεμιστήρα προσαγωγής και απαγωγής, η κλάση των φίλτρων, η εκτίμηση της απαιτούμενης κλάσης φίλτρων, και ο τύπος εναλλάκτη θερμότητας, για συστήματα ανάκτησης θερμότητας.

3.7. Συντελεστής απόδοσης SCOP

3.7.1. Μεθοδολογία υπολογισμού εποχιακού βαθμού απόδοσης θέρμανσης (SCOP)

Ο επιθεωρητής δύναται να χρησιμοποιήσει την πιο κάτω μεθοδολογία, βάσει του προτύπου EN 14825:2018. Ο υπολογισμός του εποχιακού βαθμού απόδοσης γίνεται με βάση το ετήσιο φορτίο θέρμανσης, Q_H, σε kWh και την κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση ανά έτος, Q_{HE}, σε kWh. Ο υπολογισμός του εποχιακού βαθμού απόδοσης θέρμανσης, SCOP, γίνεται με την ακόλουθη σχέση:

$$SCOP = \frac{Q_H}{Q_{HE}} \quad [5]$$

3.7.2. Μεθοδολογία υπολογισμού για μονάδες μεταβλητής ισχύς

Θα πρέπει να καθορίζεται η δηλωμένη θερμική ισχύς και η δηλωμένος βαθμός απόδοσης ⟦COP⟧_d στη κοντινότερη βαθμίδα ισχύος της μονάδας για τη κάλυψη του αντίστοιχου θερμικού φορτίου. Αν η βαθμίδα βρίσκεται σε εύρος ±10% από την τιμή του θερμικού φορτίου (π.χ. εύρος 8.1kW - 9.9kW για θερμικό φορτίο 9kW), τότε θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι πιο κάτω υποθέσεις:

- Για θερμοκρασίες μεγαλύτερες ή ίσες με T_{biv}, η απαιτούμενη ισχύς έχει επιτευχθεί και η τιμή COP της μονάδας μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως τιμή COP_{bin}.
- Για θερμοκρασίες μικρότερες από T_{biv}, η απαιτούμενη ισχύς δεν έχει επιτευχθεί και η τιμή COP της μονάδας θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ως τιμή COP_d.

Σε περίπτωση που η βαθμίδα ισχύος της μονάδας για τη κάλυψη του αντίστοιχου θερμικού φορτίου βρίσκεται σε εύρος μεγαλύτερο του ±10%, χρησιμοποιείται η μέθοδος υπολογισμού για μονάδες σταθερής ισχύος.

3.8. Βαθμός απόδοσης αντλιών θερμότητας προσρόφησης

3.8.1. Μεθοδολογία υπολογισμού θεωρητικού βαθμού απόδοσης (COP)

Η διαδικασία για τον υπολογισμό της πραγματικής ενεργειακής απόδοσης των αντλιών θερμότητας απορρόφησης-προσρόφησης κρίνεται ιδιαίτερα δύσκολη και χρονοβόρα, αφού απαιτεί αναλυτικό υπολογισμό των πρωτογενών θερμικών ροών σε κάθε τμήμα του συστήματος. Κατά την προσεγγιστική μέθοδο υπολογισμού του βαθμού απόδοσης ενός τέτοιου συστήματος ο δείκτης αποδοτικότητας προκύπτει χρησιμοποιώντας την είσοδο θερμικής ενέργειας στην αντλία θερμότητας, E_{th}, σε J. Ο υπολογισμός του θεωρητικού βαθμού απόδοσης, COP, γίνεται με την ακόλουθη σχέση:

$$COP = \frac{E_{net}}{E_{th} + E_{el}} \quad [6]$$

3.8.2. Μεθοδολογία υπολογισμού πραγματικού βαθμού απόδοσης (COP)

Προκειμένου να υπολογίσουμε τον πραγματικό βαθμό απόδοσης μιας θερμικά οδηγούμενης αντλίας θερμότητας, απαιτείται η μέτρηση της παροχής του μέσου θέρμανσης-ψύξης και της θερμοκρασίας του, καθώς και της παροχής του ζεστού νερού και της θερμοκρασίας του. Αρχικά, πραγματοποιείται η μέτρηση της παροχής και της θερμοκρασίας του μέσου θέρμανσης-ψύξης και του θερμού νερού μέσω ενσωματωμένων ή ένθετων παροχόμετρων, καθώς και της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας της μονάδας μέσω κάποιου αναλυτή ηλεκτρικής ενέργειας. Τα σημεία δειγματοληψίας των θερμοκρασιών είναι η είσοδος και η έξοδος του εναλλάκτη, καθώς και η είσοδος και η έξοδος της αντλίας θερμότητας. Ο πραγματικός βαθμός απόδοσης της μονάδας προκύπτει σύμφωνα με τον υπολογισμό της καθαρής ψυκτικής-θερμικής ικανότητας, P_{HC}, σε kW, της προσδιδόμενης θερμότητας, P_{th}, σε kW, και της προσδιδόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, P_{el}, σε kW. Ο υπολογισμός του πραγματικού βαθμού απόδοσης (COP) γίνεται με την ακόλουθη σχέση:

$$COP = \frac{P_{HC}}{P_{th} + P_{el}} \quad [7]$$

4. Συστάσεις βελτίωσης αποδοτικότητας συστημάτων θέρμανσης και κλιματισμού

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή Τυποποίησης (CEN) στο πλαίσιο της εντολής M/343 της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, έχει πρόσφατα αναθεωρήσει τα Πρότυπα για την Ενεργειακή Απόδοση των Κτηρίων. Λαμβάνοντας υπόψη τη νέα Οδηγία και τα αναθεωρημένα Πρότυπα, η αναθεώρηση της Μεθόδου Επιθεωρήσεων Συστημάτων Θέρμανσης και Κλιματισμού με ή χωρίς Αερισμό/Εξαερισμό (ΜΕΣΘΚΑΕ) θεωρείται επιτακτική. Με την ολοκλήρωση της επιθεώρησης του συστήματος θέρμανσης και κλιματισμού, ο επιθεωρητής οφείλει να παραδώσει έκθεση ελέγχου με συστάσεις βελτίωσης αποδοτικότητας του συστήματος. Οι συστάσεις αυτές στηρίζονται στα αποτελέσματα της επιθεώρησης και θα πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τον αρχικό σχεδιασμό του συστήματος, τις αλλαγές χρήσης του συστήματος, αλλά και τις τροποποιήσεις στο κτήριο και στο σύστημα θέρμανσης και κλιματισμού, την διαθεσιμότητα ανάλογου εξοπλισμού με καλύτερη ενεργειακή απόδοση με σκοπό την αντικατάσταση του υφιστάμενου εξοπλισμού, τη σύγκριση της πραγματικής ενεργειακής απόδοσης με την ονομαστική, ή με τιμές αναφοράς, καθώς και τις ελάχιστες νομικές απαιτήσεις. Επιπρόσθετα, οι συστάσεις θα πρέπει να ελέγχονται ως προς την τεχνοοικονομική τους σκοπιμότητα καθώς και ως προς τη δυνατότητα υλοποίησής τους, λαμβάνοντας υπόψη την διαθεσιμότητά των συστημάτων στην τοπική αγορά, αλλά και την ύπαρξη της απαραίτητης τεχνογνωσίας για την εφαρμογή τους. Όπου είναι τεχνοοικονομικά σκόπιμο, ο επιθεωρητής θα πρέπει να προτείνει τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την συνολική βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης. Εκτός των παραπάνω, ο επιθεωρητής θα πρέπει να είναι σε θέση να κρίνει κατά πόσο οι προτεινόμενες συ-στάσεις δύναται να υλοποιηθούν σε περίπτωση υφιστάμενου κτηρίου, θα πρέπει μέσα από τις συστάσεις του να διασφαλίζει την τακτική συντήρηση του συστήματος από τεχνικά καταρτισμένο προσωπικό. Ταυτόχρονα δύναται εφόσον το κρίνει σκόπιμο, να προτείνει την πραγματοποίηση ολοκληρωμένου ενεργειακού ελέγχου για όλη την κτηριακή μονάδα. Οι προαναφερθείσες συστάσεις διαρθρώνονται σε συστάσεις που οδηγούν στην άμεση βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του συστήματος και σε συστάσεις οι οποίες μπορούν να υλοποιηθούν σε

περίπτωση ανακαίνισης μεγάλης κλίμακας του κτηρίου, ή αντικατάστασης στοιχείων του συστήματος λόγω γήρανσης ή αστοχίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Κυπριακή νομοθεσία

1. Περί Ρύθμισης της Ενεργειακής Απόδοσης των Κτιρίων Νόμος του 2006 έως 2017 (N. 142(I)/2006)
2. Περί Ρύθμισης της Ενεργειακής Απόδοσης των Κτηρίων (Επιθεώρηση Συστημάτων Κλιματισμού) Διάταγμα του 2009 (Κ.Δ.Π.413/2009),
3. Περί Ρύθμισης της Ενεργειακής Απόδοσης των Κτηρίων (Διαδικασία Επιθεώρησης Συστημάτων Θέρμανσης με Λέβητες Ονομαστικής Ισχύς Εξόδου από 20 KW έως 100 KW) Διάταγμα του 2013 (Κ.Δ.Π.148/2013),
4. Περί Ρύθμισης της Ενεργειακής Απόδοσης των Κτηρίων (Διαδικασία Επιθεώρησης Συστημάτων Θέρμανσης με Λέβητες Ονομαστικής Ισχύς Εξόδου μεγαλύτερης των 100 KW) Διάταγμα του 2013 (Κ.Δ.Π.149/2013),
5. Περί Ρύθμισης της Ενεργειακής Απόδοσης των Κτηρίων (Ρύθμισης και Έλεγχος Συστημάτων Θέρμανσης με Λέβητες Ονομαστικής Ισχύς Εξόδου Μεγαλύτερης των 20 KW) Διάταγμα του 2013, (Κ.Δ.Π.244/2013),
6. Περί Ρύθμισης της Ενεργειακής Απόδοσης των Κτηρίων (Ρύθμισης και Έλεγχος Συστημάτων κλιματισμού Ονομαστικής Ισχύς Εξόδου Μεγαλύτερης των 12 KW) Διάταγμα του 2015, (Κ.Δ.Π.420/2015),
7. Περί Ρύθμισης της Ενεργειακής Απόδοσης των Κτηρίων (Απαιτήσεις Νέων Τεχνικών Συστημάτων κτηρίων που Εγκαθίστανται σε Υφιστάμενα Κτήρια και Κτιριακές Μονάδες και Τεχνικών Συστημάτων Κτηρίων που Αντικαθίστανται και Αναβαθμίζονται Διάταγμα του 2016, (Κ.Δ.Π.231/2016).
8. Περί Ρύθμισης της Ενεργειακής Απόδοσης των Κτηρίων (Επιθεώρηση Συστημάτων Κλιματισμού) Διάταγμα του 2017, (Κ.Δ.Π.62/2017),
9. Περί Ρύθμισης της Ενεργειακής Απόδοσης των Κτηρίων (Επιθεώρηση Συστημάτων Θέρμανσης) Διάταγμα του 2017, (Κ.Δ.Π.63/2017).
10. Περί Ασφαλείας και Υγείας στην Εργασία Νόμος του 1996 έως 2015 (N. 89(I)/1996) και τροποποιητικοί νόμοι

Πρότυπα – Συστήματα Θέρμανσης με Λέβητα

1. EN 15378-1:2017 Energy performance of buildings – Heating systems and DHW in buildings – Part 1: Inspection of boilers, heating systems and DHW, Module M3-11, M8-11
2. CEN/TR 15378-2:2017 Energy performance of buildings – Heating systems and DHW in buildings – Part 2: Explanation and justification of EN 15378-1, Module M3-11and M8-11
3. EN 15378-3:2017 Energy performance of buildings – Heating systems and DHW in buildings – Part 3: Measured energy performance, Module M3-10, M8-10
4. CEN/TR 15378-4:2017 Energy performance of buildings – Heating systems and DHW in buildings – Part 4: Explanation and justification of EN 15378-3 Module M3-10, M8-10
5. EN 12828:2012 Heating systems in buildings. Design for water-based heating system

Πρότυπα – Συστήματα Κλιματισμού-Εξαερισμού

1. EN 16798-3:2017 “Energy performance of buildings – Ventilation for buildings – Part 3: For non-residential buildings – Performance requirements for ventilation and room-conditioning systems (Modules M5-1, M5-4)
2. EN 16798-17:2017 “Energy performance of buildings – Ventilation for buildings – Part 17: Guidelines for inspecting of ventilation and air conditioning systems (Module M4-11, M5-11, M6-11, M7-11)”
3. EN 16798-18:2017 “Energy performance of buildings – Ventilation for buildings – Part 18: Interpretation of the requirements in EN 16798-17 - Guidelines for inspecting of ventilation and air conditioning systems (Module M4-11, M5-11, M6-11, M7-11)”

Βιβλιογραφία Συστήματα Θέρμανσης Ψύξης - Κλιματισμού

1. ΤΕΕ, Κατάρτιση ενεργειακών επιθεωρητών. Εκπαιδευτικό υλικό. Θεματική Ενότητα ΘΚ2: „Επιθεώρηση Λεβήτων και Εγκαταστάσεων Θέρμανσης“. Αθήνα 2011
2. ΚΑΠΕ, «Τεχνολογίες εξοικονόμησης ενέργειας σε κτίρια», Αθήνα, 2008
3. Σοφία Ψυχογυιού, ΙΜΕ ΓΣΕΒΕΕ, «Κατάρτιση Συντηρητών & Εγκαταστατών Καυστήρων υγρών & αερίων καυσίμων» Αθήνα, 2014

4. ΚΑΠΕ, «Οδηγός εξοικονόμησης ενέργειας στα συστήματα HVAC», Αθήνα, 1999
5. Κ. Τ Παπακώστας, «Εξοικονόμηση ενέργειας σε συστήματα θέρμανσης και κλιματισμού», ΤΕΕ-Τμ. Κεντρ. Μακεδονίας, Θεσσαλονίκη, 2009
6. ΤΕΕ, Κατάρτιση ενεργειακών επιθεωρητών. Εκπαιδευτικό υλικό. Θεματική Ενότητα ΨΚ2, «Επιθεώρηση εγκατάστασης ψύξης και κλιματισμού», Αθήνα, 2011
7. ΚΑΠΕ, «Μικρής κλίμακας συστήματα ηλιακής θέρμανσης και ψύξης», Αθήνα, 2010
8. ΚΑΠΕ, «Οδηγός Συστημάτων Συμπαραγωγής Ηλεκτρισμού & Θερμότητας», Αθήνα
9. ΚΑΠΕ, «Προμελέτη συστημάτων τηλεθέρμανσης»
10. Papakostas, K., Martinopoulos, Georgios & Papadopoulos, Agis. (2015). A Comparison of Various Heating Systems in Greece Based on Efficiency and Fuel Cost.
11. ΓΙΑΝΝΑΚΟΣ Ν., „Αντλίες θερμότητας σε συστήματα θέρμανσης. Σχεδιασμός – Ενεργειακή Αξιολόγηση“, Θεσσαλονίκη 2014
12. Α.Μ.Παπαδόπουλος, Σημειώσεις προγράμματος κατάρτισης ενεργειακών ελεγκτών, Frederick University, Λευκωσία 2019.

ΔΕΙΚΤΕΣ ΕΥΦΥΟΥΣ ΕΤΟΙΜΟΤΗΤΑΣ ΚΤΗΡΙΩΝ (SMART READINESS INDICATORS): ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ, ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Α. Παναγίδου[1], Χ. Παντελή, Π. Α. Φωκαΐδης[1],

[1]Σχολή Μηχανικής και Εφαρμοσμένων Επιστημών, Πανεπιστήμιο Frederick
Φρειδερίκου 7, 1036, Λευκωσία, Κύπρος

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι προσπάθειες εξοικονόμησης ενέργειας στον κατασκευαστικό τομέα είναι πολυάριθμες και χρονολογούνται από τη δεκαετία του '70, με την έκδοση των πρώτων σχετικών οδηγιών της ΕΕ. Τα τελευταία χρόνια, με την έκρηξη των εξελίξεων γύρω από έξυπνα κτήρια και έξυπνες πόλεις, υπάρχει μια ισχυρή σύνδεση μεταξύ του τομέα της εξοικονόμησης ενέργειας και της νοημοσύνης του δομημένου περιβάλλοντος. Έχουν αναπτυχθεί μεθοδολογίες οι οποίες εξετάζουν τον αντίκτυπο της μεταφοράς και διαχείρισης πληροφοριών στην εξοικονόμηση ενέργειας, αλλά και την ικανότητα των ευφυών κτηρίων να ενσωματώνονται σε ευφυείς πόλεις. Ταυτόχρονα, η ψηφιοποίηση του δομημένου περιβάλλοντος με τη χρήση εργαλείων ψηφιακού σχεδιασμού όπως το BIM, ενισχύει αυτήν την προσπάθεια. Η λογική του ευφυούς σχεδιασμού του δομημένου περιβάλλοντος επεκτάθηκε επίσης σε ειδικές περιπτώσεις, όπως σε ενεργειακές κοινότητες, την ίδια στιγμή που η διαχείριση και η χρηματοδότηση όλων αυτών των προσπαθειών θεωρούνται εξίσου ζωτικής σημασίας για την επιτυχή εγκατάσταση ευφυών κτηρίων και πόλεων.

Το 2018 η Ευρωπαϊκή Επιτροπή υιοθέτησε την έννοια έξυπνος δείκτης ετοιμότητας, γνωστός ως Smart Readiness Indicator (SRIs) στην αναδιατύπωση της οδηγίας για την ενεργειακή απόδοση των κτηρίων. Οι δείκτες αυτοί (SRIs) καταγράφουν και υπολογίζουν την ευφυΐα των συστημάτων στα κτήρια και η προώθησή τους αναμένεται να συμβάλει στην εξοικονόμηση ενέργειας. Η εργασία αυτή παρουσιάζει το θεωρητικό υπόβαθρο της ανάπτυξης αυτών των δεικτών καθώς και τις βασικές πτυχές της μεθοδολογίας υπολογισμού τους. Παρουσιάζονται επίσης, οι πρώτοι υπολογισμοί και αποτελέσματα αξιολόγησης της ευφυΐας των κτηρίων με την εξαγωγή δεικτών ευφυούς ετοιμότητας, τα οποία λαμβάνονται με την χρήση υπολογιστικού εργαλείου που αναπτύχθηκε από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή.

1. Εισαγωγή

Οι προσπάθειες εξοικονόμησης ενέργειας στον κτιριακό τομέα είναι πολυάριθμες και χρονολογούνται από τη δεκαετία του 1970, με την έκδοση των πρώτων σχετικών οδηγιών της ΕΕ [1]. Τα τελευταία χρόνια, με τις ραγδαίες εξελίξεις γύρω από τα έξυπνα κτήρια και τις έξυπνες πόλεις, υπάρχει μια ισχυρή σύνδεση μεταξύ του τομέα εξοικονόμησης ενέργειας και της ευφυΐας του δομημένου περιβάλλοντος [2]. Έχουν αναπτυχθεί μεθοδολογίες, οι οποίες εξετάζουν τον αντίκτυπο της ευφυούς οικοδομής στην εξοικονόμηση ενέργειας, αλλά και την ικανότητα των έξυπνων κτηρίων να ενσωματώνονται σε ευφυείς πόλεις [3]. Ταυτόχρονα, η ψηφιοποίηση του δομημένου περιβάλλοντος με τη χρήση εργαλείων ψηφιακού σχεδιασμού όπως το BIM ενισχύει αυτήν την προσπάθεια [4]. Η λογική του έξυπνου σχεδιασμού του δομημένου περιβάλλοντος επεκτάθηκε επίσης και σε ειδικές περιπτώσεις, όπως τα απομονωμένα ενεργειακά συστήματα. [5]. Ταυτόχρονα, η διαχείριση [6] και η χρηματοδότηση [7] όλων αυτών των προσπαθειών θεωρούνται εξίσου ζωτικής σημασίας για την επιτυχή δημιουργία έξυπνων κτηρίων και έξυπνων πόλεων.

Σύμφωνα με την οδηγία 2018/844 για την εξοικονόμηση ενέργειας στα κτήρια, θα πρέπει να υιοθετηθεί ένα προαιρετικό κοινό σύστημα της Ένωσης για την αξιολόγηση της ευφυούς ετοιμότητας των κτηρίων, βάσει δεικτών που ορίστηκαν ως δείκτες ευφυούς ετοιμότητας (SRI) [8]. Η πρώτη αναφορά σε αυτούς τους δείκτες έχει γίνει στο πακέτο "Clean Energy for All Europeans " [9]. Σύμφωνα με αυτήν την αναφορά, οι δείκτες SRI θα πρέπει να επιτρέπουν την αξιολόγηση της ικανότητας της τεχνολογικής ετοιμότητας ενός κτηρίου να προσαρμόζεται στις ανάγκες των χρηστών του καθώς και στο ενεργειακό περιβάλλον. Πρόδρομος του SRI υπήρξε η ενεργειακή ευελιξία (energy flexibility), η οποία ορίζεται ως οι απαραίτητες υποδομές ενός κτηρίου προκειμένου αυτό να δύναται να συνδεθεί με έξυπνα δίκτυα για καλύτερη ανταπόκριση στη ζήτηση ενέργειας [10]. Το 2017, αποφασίστηκαν δίοδοι επικοινωνίας μεταξύ της Επιτροπής «Υποστήριξη δημιουργίας ενός Ευφυούς Δείκτη Ετοιμότητας για Κτήρια και σχετική εκτίμηση επιπτώσεων» και του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας (International Energy Agency - IEA), και συγκεκριμένα του Παραρτήματος 67 σχετικά με τα Ενεργειακά Ευέλικτα Κτήρια. Η πρωτοβουλία του IEA θα παρείχε υποστήριξη στη μελέτη της ΕΕ σχετικά με το SRI. Ωστόσο, προβλέπεται ότι το Παράρτημα 67 του πλαισίου IEA για την ενεργειακή ευελιξία των κτηρίων θα διαφέρει από τους δείκτες ευφυΐας του EPBD [11]. Οι Junker et al. [12] παρουσίασαν μια δυναμική μεθοδολογία για τον ορισμό της ενεργειακής ευελιξίας των κτηρίων, με τίτλο λειτουργία ευελιξίας. Η μεθοδολογία προσαρμόστηκε για τις απαιτήσεις του Παραρτήματος 67 του IEA, αλλά οι συγγραφείς ισχυρίστηκαν ότι αυτή η μελέτη θα μπορούσε να είναι ο ακρογωνιαίος λίθος για τη μεθοδολογία SRI.

Σύμφωνα με το ερευνητικό έργο D ^ 2EPC, το οποίο χρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή, και αφορά τα πιστοποιητικά ενεργειακής απόδοσης επόμενης γενιάς που θα ενισχύσουν την ποιότητα ζωής και ευαισθητοποίηση του χρήστη, θα πρέπει να εισαχθούν παράμετροι σχετικά με το επίπεδο ευφυΐας των κτηρίων, προκειμένου να υποκινηθούν επενδύσεις σε ενεργειακά αποδοτικά κτήρια. Τα κριτήρια αξιολόγησης αυτών των δεικτών θα πρέπει να συνοψιστούν σε ένα σύνολο κριτηρίων, όπως η θέρμανση, η ψύξη, ο εξαερισμός, ο φωτισμός, τα ηλεκτρικά οχήματα καθώς και οι δυνατότητες ενσωμάτωσης έξυπνων δικτύων στα κτίρια, ως επίσης και το ποσοστό των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που χρησιμοποιούνται στα κτήρια [13].

Λόγω του γεγονότος ότι το SRI αναπτύχθηκε και υιοθετήθηκε από το Μάιο του 2018 έως τον Σεπτέμβριο του 2020, στο χρονικό πλαίσιο κατά το οποίο εκπονείται αυτή η μελέτη, δεν υπάρχουν ακόμη επαρκείς αναφορές στην επιστημονική βιβλιογραφία. Οι Janhunen et al. [14] χρησιμοποίησαν τις μετρήσεις SRI για να εξετάσουν την οικονομική βιωσιμότητα ενός ευφυούς ενεργειακού συστήματος σε ένα κτήριο. Σε αυτή τη μελέτη, δεν παρουσιάζεται σημαντική σχέση μεταξύ της απόδοσης του SRI και των εσόδων από την εξοικονόμηση ενέργειας, Ο Märzinger και ο Österreicher [15] επιχείρησαν να επεκτείνουν το πεδίο εφαρμογής του SRI, παρέχοντας ένα σύνολο εξισώσεων που ισχύουν για συγκεκριμένους τύπους κτηρίων. Αυτή η μελέτη βασίζεται σε προηγούμενες ανακοινώσεις των ίδιων συγγραφέων [16], οι οποίες αναφέρονταν στην ποσοτική αξιολόγηση των

δυνατοτήτων μετατόπισης φορτίων σε έξυπνα κτήρια. Οι Vigna et al. [17] αξιολόγησαν τη μέθοδο SRI, ενώ ήταν ακόμη υπό ανάπτυξη, χρησιμοποιώντας την σε κτήριο σχεδόν μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης. Η αξιολόγηση της μεθοδολογίας πραγματοποιήθηκε παράλληλα από δύο διαφορετικές ομάδες εμπειρογνωμόνων αποτελούμενες από ειδικούς και ερευνητές τεχνικών συστημάτων κτηρίων. Οι Janhunen et al. [18] δοκίμασαν επίσης τη δυνατότητα εφαρμογής του SRI για χώρες με ψυχρό κλίμα, καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι η μεθοδολογία του SRI δεν εφαρμόζεται υπό τέτοιες συνθήκες.

2. Διατάξεις της αναθεωρημένης οδηγίας για την ενεργειακή απόδοση των κτηρίων (2018/844) σχετικά με τους δείκτες ευφυούς ετοιμότητας κτηρίων (SRI)

2.1. Αναθεώρηση οδηγίας για την ενεργειακή απόδοση των κτηρίων

Σύμφωνα με την αναθεωρημένη οδηγία για την ενεργειακή απόδοση των κτηρίων, ο δείκτης ευφυούς ετοιμότητας των κτηρίων (SRI) καθορίζει την ικανότητα των κτηρίων να χρησιμοποιούν τεχνολογίες αυτοματισμού και επικοινωνίας προκειμένου να προσαρμόσουν τη λειτουργία τους στις ανάγκες των χρηστών και του δικτύου, βελτιώνοντας τη συνολική ενεργειακή απόδοση του κτηρίου. Το SRI στοχεύει στην ευαισθητοποίηση των χρηστών σχετικά με την αξία του αυτοματισμού και της παρακολούθησης των τεχνικών συστημάτων, καθώς και στην υιοθέτηση ευφυών τεχνολογιών με βελτιωμένες δυνατότητες προς τον χρήστη. Από τον Οκτώβριο του 2020, η επιτροπή εξέδωσε κατ 'εξουσιοδότηση πράξεις προκειμένου να θεσπίσει ένα προαιρετικό κοινό σύστημα της Ένωσης για την αξιολόγηση της ευφυούς ετοιμότητας των κτηρίων, σύμφωνα με το άρθρο 23 της τροποποιημένης οδηγίας.

Η Επιτροπή ζήτησε τη γνώμη των ενδιαφερόμενων μερών και εξέδωσε πράξη εφαρμογής, η οποία καθορίζει τις τεχνικές λεπτομέρειες για την αποτελεσματική εφαρμογή αυτού του συστήματος, συμπεριλαμβανομένου ενός χρονοδιαγράμματος για μη δεσμευτική πιλοτική εφαρμογή σε εθνικό επίπεδο. Το SRI βασίζεται σε χαρακτηριστικά και δυνατότητες που προκύπτουν από διασυνδεδεμένες ευφυής συσκευές. Η μεθοδολογία εξετάζει ορισμένα στοιχεία και τις λεπτομερείς λειτουργίες τους, όπως για παράδειγμα συστήματα θέρμανσης, ψύξης και αερισμού, συστήματα διαχείρισης κτηρίων, συστήματα αυτοματισμού και ελέγχου, δυναμικά κελύφη, ηλεκτρικά οχήματα, καθώς επίσης και θέματα διαχείρισης ενέργειας. Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε βασίζεται σε τρεις βασικές αρχές:

- Την δυνατότητα προσαρμογής της κατανάλωσης ενέργειας με βάση τη ζήτηση των χρηστών, διατηρώντας παράλληλα τα επίπεδα ενεργειακής απόδοσης.
- Την ικανότητα προσαρμογής της λειτουργίας του κτηρίου σύμφωνα με τις ανάγκες των χρηστών, λαμβάνοντας υπόψη τις συνθήκες άνεσης και παρέχοντας στους χρήστες πληροφορίες σχετικά με την κατανάλωση ενέργειας.
- Την ευελιξία του κτηρίου στη συνολική ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης της ικανότητάς του να συμμετέχει τόσο στην ενεργητική όσο και στην παθητική ζήτηση, καθώς και στην άμεση και έμμεση απόκρισή του στη ζήτηση δικτύου.

Η μεθοδολογία θα πρέπει επίσης να εξετάσει τη διαλειτουργικότητα (interoperability) μεταξύ των τεχνικών συστημάτων, καθώς επίσης και τον αντίκτυπο των υφιστάμενων δικτύων επικοινωνίας, σύμφωνα με τη σχετική ενωσιακή νομοθεσία για την προστασία των δεδομένων και τις βέλτιστες διαθέσιμες τεχνικές ασφάλειας στον κυβερνοχώρο. Επιπλέον, σύμφωνα με την αναδιατύπωση του EPBD, το SRI πρέπει να διατυπώνεται με απλό και διαφανή τρόπο, ώστε να γίνεται εύκολα κατανοητό από τους καταναλωτές, τους χρήστες και τους επενδυτές. Οι τεχνικές και οι διαδικασίες χάραξης πολιτικής για τον καθορισμό του SRI που έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία τρία χρόνια, περιγράφονται λεπτομερώς στις τεχνικές οδηγίες εφαρμογής του εκδόθηκαν τον Οκτώβριο του 2020 [19].

2.2. Ενέργειες για την εφαρμογή των δεικτών ευφυούς ετοιμότητας των κτηρίων

Προκειμένου να υποστηριχθούν οι νέες διατάξεις της αναθεωρημένης οδηγίας για την ενεργειακή απόδοση των κτηρίων, αναφορικά με την υιοθέτηση ευφυών τεχνολογιών, διενεργήθηκαν και

εποπτεύθηκαν δύο τεχνικές μελέτες από τις υπηρεσίες της Γραμματείας Ενέργειας. Οι μελέτες αποσκοπούσαν στην παροχή τεχνικής υποστήριξης στη Γενική Διεύθυνση Ενέργειας των υπηρεσιών της Ευρωπαϊκής Επιτροπής για τη θέσπιση του μεθοδολογικού πλαισίου του SRI. Η πρώτη τεχνική μελέτη, η οποία ολοκληρώθηκε τον Αύγουστο του 2018, ήταν μια προκαταρκτική έρευνα για το πιθανό εύρος και τα χαρακτηριστικά των δεικτών. Τα αποτελέσματα της μελέτης κατέληξαν σε μια μέθοδο εκτίμησης πολλαπλών κριτηρίων για τον υπολογισμό του SRI βάσει ενός καταλόγου διαφόρων έξυπνων συσκευών, με βάση το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 15217:2017. Με βάση διάφορους βαθμούς «ευφυΐας», οι οποίοι αναφέρονται ως «επίπεδα λειτουργικότητας» (functionality levels), οι υπηρεσίες χωρίζονται σε πολλαπλούς τομείς (θέρμανση, ψύξη, εξαερισμός κ.λπ.) και σχετίζονται με βαθμολογίες επιπτώσεων για τους χρήστες και το δίκτυο. Τα μεμονωμένα κριτήρια αντίκτυπου των συσκευών, καθώς και ο συντελεστής βαρύτητάς τους στην τελική βαθμολογία SRI, καθορίστηκαν επίσης, στην πρώτη μελέτη. Η μεθοδολογία SRI κανονικοποιήθηκε, έτσι ώστε οι βαθμολογίες επιπτώσεων των επιθεωρημένων υπηρεσιών να εναρμονιστούν με τα ειδικά χαρακτηριστικά του κτηρίου και τις κλιματολογικές συνθήκες.

Με βάση τα ευρήματα της πρώτης μελέτης, εκπονήθηκε η δεύτερη μελέτη τεχνικής υποστήριξης με σκοπό την οριστικοποίηση του ορισμού του SRI, εμπλουτίζοντας την μεθοδολογία υπολογισμού του. Επιπλέον, η μελέτη διερεύνησε πιθανές οδούς εφαρμογής καθώς και τον αντίκτυπό τους σε ευρωπαϊκό επίπεδο . Η δεύτερη μελέτη κατέληξε σε δύο μεθόδους αξιολόγησης SRI, εισάγοντας μια τρίτη για μελλοντική ανάπτυξη. Η μέθοδος Α είναι μια απλοποιημένη μέθοδος, κατάλληλη για οικίες μικρής κλίμακας και μικρές επιχειρήσεις, η οποία περιλαμβάνει έναν απλοποιημένο και μειωμένο κατάλογο υπηρεσιών προς έλεγχο. Αυτή η μέθοδος περιλαμβάνει διαδικτυακό εργαλείο αξιολόγησης. Η μέθοδος Β αποτελεί μια λεπτομερέστερη αξιολόγηση, η οποία βασίζεται σε μια μεγαλύτερη λίστα ελέγχου συστημάτων, η οποία συμπεριλαμβάνει επιπρόσθετες υπηρεσίες. Αυτή η μέθοδος απευθύνεται σε κτήρια που δεν είναι κατοικίες και δύναται να εκπονηθεί από ειδικευμένους εμπειρογνώμονες. Η τρίτη μέθοδος εισήχθη μόνο για μελλοντική ανάπτυξη και θα αφορά τον καθορισμό της ευφυούς ετοιμότητας των κτηρίων βάσει μετρήσεων στο κτήριο σε πραγματικό χρόνο. Η μελέτη ολοκληρώθηκε τον Σεπτέμβριο του 2020, με την ενεργό συμμετοχή των ενδιαφερομένων και των εκπροσώπων των κρατών μελών. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών που προκύπτουν καθώς και οι ενδιάμεσες εκθέσεις και των δύο μελετών είναι διαθέσιμες στο κοινό μέσω του επίσημου ιστότοπου SRI (https://smartreadinessindicator.eu/).

3. Το σύστημα αξιολόγησης του δείκτη ευφυούς ετοιμότητας

3.1. Τομείς αξιολόγησης του δείκτη ευφυούς ετοιμότητας

Το σύστημα αξιολόγησης της ευφυΐας των κτηρίων αποτιμά τους ακόλουθους εννέα τομείς [20]:

- Θέρμανση
- Ψύξη
- Ζεστό νερό χρήσης
- Αερισμός
- Φωτισμός
- Δυναμικό κέλυφος κτηρίου.
- Διαχείριση ζήτησης
- Φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων
- Παρακολούθηση και έλεγχος.

Κάθε τομέας έχει συγκεκριμένες πτυχές και στοιχεία που αξιολογούνται σε σχέση με διαφορετικές κατηγορίες επιπτώσεων, και η βαθμολογία της ευφυΐας υπολογίζεται με βάση την απόδοση κάθε μεμονωμένου στοιχείου (βλ. Εικ. 1).

- Τα **συστήματα θέρμανσης και ψύξης** αξιολογούνται με βάση δέκα κριτήρια, τέσσερα εκ των οποίων αξιολογούνται επίσης στην απλοποιημένη μέθοδο. Τα τερματικά θερμότητας βαθμολογούνται σύμφωνα με τον έλεγχο των μονάδων. Οι κλίμακες ευφυΐας εξετάζουν τα διαφορετικά επίπεδα ελέγχου, συμπεριλαμβανομένου του κεντρικού, μεμονωμένου ή ακόμη και του ελέγχου ανίχνευσης κίνησης στον χώρο, με το τελευταίο να αποτελεί το επίπεδο της μεγαλύτερης ευφυίας. Η νοημοσύνη των λεβήτων καθορίζεται σύμφωνα με τη διακύμανση του ελέγχου της θερμοκρασίας, η οποία μπορεί να εξαρτάται από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος ή από το φορτίο θέρμανσης. Το δίκτυο διανομής θερμικού μέσου αξιολογείται σύμφωνα με τη χρήση αντιστάθμισης και ελέγχου βάσει ζήτησης. Τα επίπεδα λειτουργικότητας της αποθήκευσης θερμότητας αξιολογούν τη διαθεσιμότητα των δοχείων αποθήκευσης και την ικανότητα ελέγχου της αποθήκευσης θερμότητας με τη χρήση εξωτερικών αισθητήρων. Όσον αφορά τις αντλίες διανομής, τα επίπεδα λειτουργικότητάς τους εξαρτώνται από τον έλεγχο των στροφών λειτουργίας της αντλίας. Παρόμοια επίπεδα λειτουργικότητας εφαρμόζονται επίσης για μονάδες αντλίας θερμότητας. Άλλες κτιριακές υπηρεσίες που περιλαμβάνονται στην βαθμολογία του συστήματος θέρμανσης περιλαμβάνουν την απόδοση θερμικών συστημάτων ενσωματωμένων στο κέλυφος του κτηρίου (όπως π.χ. ενδοδαπέδια θέρμανση), την αλληλουχία λειτουργίας περισσότερων του ενός λεβήτων και την αλληλεπίδραση του συστήματος θέρμανσης με το δίκτυο. Η αναφορά της απόδοσης των συστημάτων θέρμανσης είναι παρόμοια σε διάφορους τομείς του SRI και λαμβάνει υπόψη την καταγραφή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και διαχρονικά, καθώς και την προληπτική ικανότητα συντήρησης των συστημάτων. Παρόμοιοι τομείς αξιολογούνται επίσης για τα συστήματα ψύξης. Ένα επιπλέον στοιχείο που εξετάζεται στα συστήματα ψύξης είναι η αλληλοσύνδεση της θέρμανσης και της ψύξης στην ίδια θερμική ζώνη ("χωρίς αλληλοσύνδεση", "μερική", "ολική αλληλοσύνδεση αποφεύγοντας ταυτόχρονη θέρμανση και ψύξη").
- Η αξιολόγηση του **ζεστού νερού χρήσης** βασίζεται σε πέντε κριτήρια. Ο τομέας αξιολογείται σύμφωνα με την πηγή ενέργειας για θέρμανση, δηλαδή λέβητα, θερμότητα με ηλεκτρικό στοιχείο αντίστασης, ή αντλία θερμότητας και ηλιακή θέρμανση. Για καθεμία από αυτές τις υπηρεσίες, τα επίπεδα λειτουργικότητας κυμαίνονται από on / off έως ζήτηση και ανταπόκριση με βάση τις ανάγκες του χρήστη. Η καταγραφή των δεδομένων λειτουργίας του συστήματος, θεωρείται επίσης ως κριτήριο απόδοσης.
- Τα **συστήματα φωτισμού** βαθμολογούνται σύμφωνα με τον έλεγχο του συστήματος φωτισμού (on / off, ρυθμιζόμενο, αισθητήρες κίνησης) καθώς και την αλληλεπίδραση μεταξύ του τεχνητού και του φυσικού φωτισμού σε ένα χώρο.
- Τα **ελεγχόμενα συστήματα εξαερισμού** αξιολογούνται βάσει έξι κριτηρίων: σύμφωνα με τη ροή αέρα, τη θερμοκρασία του αέρα, την ανάκτηση θερμότητας, τον φυσικό κλιματισμό και την ποιότητα του εσωτερικού αέρα (IAQ). Ο έλεγχος ροής αέρα στο επίπεδο του δωματίου βαθμολογείται σύμφωνα με τις λειτουργίες ελέγχου του. Ο έλεγχος ροής αέρα κυμαίνεται από on / off έως αυτόματο έλεγχο. Η πρόληψη της υπερθέρμανσης ορίζεται σύμφωνα με αισθητήρες στην επιστροφή του αέρα ή πολλαπλούς αισθητήρες θερμοκρασίας. Ο έλεγχος θερμοκρασίας αέρα στο επίπεδο της μονάδας χειρισμού αέρα βαθμολογείται με βάση τον έλεγχο της καθορισμένης θερμοκρασίας εξαερισμού. Η φυσική ψύξη με το μηχανικό σύστημα εξαερισμού εκτιμάται σύμφωνα με τον νυχτερινό ή τον φυσικό κλιματισμό. Ένα άλλο κριτήριο απόδοσης για αυτόν τον τομέα είναι οι πληροφορίες αναφοράς σχετικά με την ποιότητα του αέρα στον εσωτερικό χώρο.
- **Στο δυναμικό κέλυφος κτηρίου** αξιολογούνται οι αυτοματισμοί στα συστήματα σκίασης παραθύρων καθώς επίσης και ο έλεγχος λειτουργίας των δυναμικών στοιχείων λαμβάνοντας υπόψη την λειτουργία των συστημάτων θέρμανσης και ψύξης του κτηρίου.

- Η αξιολόγηση της **διαχείρισης από πλευράς ζήτησης** βασίζεται σε επτά κριτήρια. Η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας είναι μία από τις κατηγορίες και αξιολογείται σύμφωνα με την τεχνολογία που αξιοποιείται. Η αξιολόγηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στο κτήριο, πραγματοποιείται βάσει της διαχείρισης της ενέργειας, της διαθεσιμότητας ανανεώσιμης ενέργειας και τις προβλεπόμενες ενεργειακές ανάγκες. Η συνδυασμένη μονάδα θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας (CHP) βαθμολογείται σύμφωνα με τα διαφορετικά επίπεδα ελέγχου, με βάση την προγραμματισμένη διαχείριση, τη διαθεσιμότητα ΑΠΕ και τη σύνδεση της με το δίκτυο. Η υποστήριξη ευφυών δικτύων αποτελεί επίσης κριτήριο και αξιολογείται με βάση την διακύμανση στην διαχείριση της κατανάλωσης και της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. Αναφορές σχετικά με την τοπική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, την αποθήκευση ενέργειας και τη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται για αξιολόγηση, λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές, τα ιστορικά δεδομένα, την ανατροφοδότηση σε πραγματικό χρόνο, την απόδοση και τη συγκριτική αξιολόγηση.
- Η **αξιολόγηση των υποδομών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων** βασίζεται στην ικανότητα φόρτισης στο κτήριο, όπου τα επίπεδα λειτουργικότητας εξαρτώνται από το ποσοστό των θέσεων στάθμευσης τα οποία έχουν σημεία φόρτισης ως προς το σύνολο των χώρων στάθμευσης. Επίσης, η αξιολόγηση βασίζεται στην εξισορρόπηση του δικτύου φόρτισης που καθορίζεται σύμφωνα με τον έλεγχο της φόρτισης σε 1 ή 2 κατευθύνσεις και βασίζεται στις πληροφορίες και τη συνδεσιμότητα φόρτισης.
- Όσον αφορά την **παρακολούθηση και την διαχείριση της ενέργειας στο κτήριο,** αυτή βασίζεται σε οκτώ κατηγορίες. Οι κύριες πτυχές που εξετάζονται είναι η διαχείριση του χρόνου λειτουργίας των συστημάτων HVAC και η ικανότητα εντοπισμού σφαλμάτων των τεχνικών συστημάτων του κτηρίων.

Σχήμα 1. Τομείς και κατηγορίες επιπτώσεων δεικτών ευφυούς ετοιμότητας.

3.2. Υπολογισμός δείκτη ευφυούς ετοιμότητας κτηρίου: Μελέτη Περίπτωσης

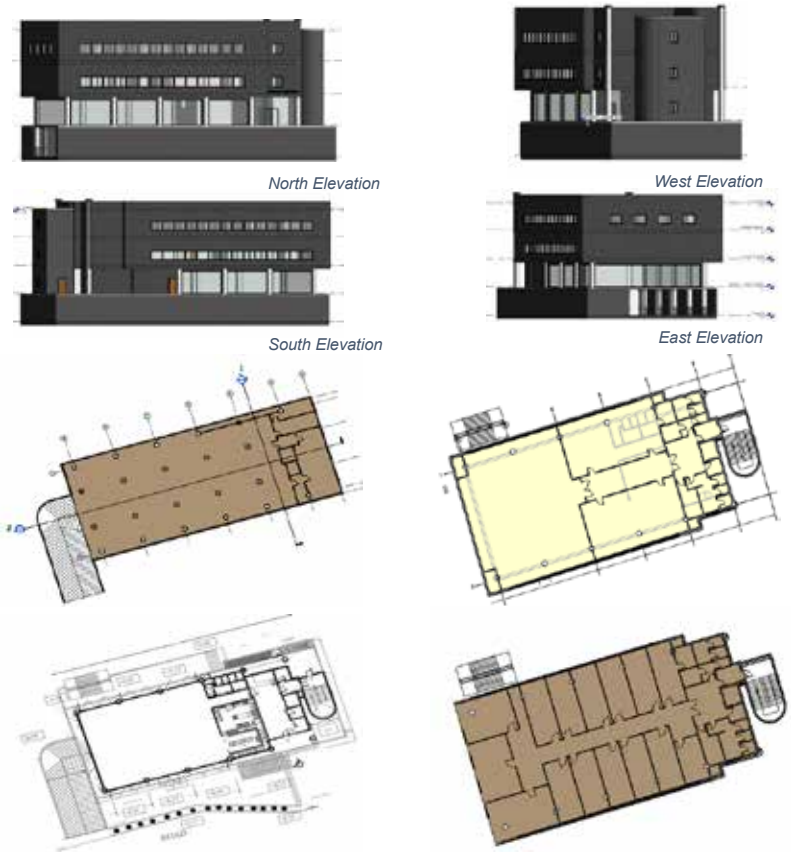
Σε αυτήν την ενότητα, παρουσιάζεται ένα παράδειγμα υπολογισμού του δείκτη SRI. Ο υπολογισμός πραγματοποιήθηκε για κτήριο μικτής χρήσης, και ιδιαίτερα για την κεντρική πτέρυγα του Πανεπιστημίου Frederick στην Κύπρο. Το υπό μελέτη κτήριο, αποτελεί διώροφη κατασκευή έκτασης 2000 m², το οποίο ανεγέρθηκε το 2007. Στο ισόγειο του κτηρίου βρίσκεται χώρος εστίασης, στον πρώτο όροφο, υπάρχουν τρεις αίθουσες διδασκαλίας χωρητικότητας 220 φοιτητών και στον δεύτερο όροφο βρίσκονται τα γραφεία της διεύθυνσης του Πανεπιστημίου (βλ. Πίνακα 1). Το κτήριο μπορεί να φιλοξενήσει έως 390 άτομα. Οι υπηρεσίες που παρέχονται εντός του κτηρίου περιλαμβάνουν θέρμανση, ψύξη, εξαερισμό, φωτισμό και ηλεκτρικές συσκευές. Ένα ηλιοθερμικό σύστημα ονομαστικής ισχύος 3 kW είναι εγκατεστημένο στην οροφή του κτήριο ως επίσης και ένα σύστημα

BMS για την παρακολούθηση και τον έλεγχο των συστημάτων, του φωτισμού και των συσκευών HVAC του κτηρίου.

Πίνακας 1. Μελέτη περιπτώσεων SRI - πληροφορίες.

Χρήση/Ημ. Δόμησης	Μεικτή χρήση 2000 τ.μ./ 2007
Δομικά Υλικά/Στοιχεία	Διάτρητοι οπτόπλινθοι, Σοβάς, Οπλισμένο Σκυρόδεμα, Διπλοί υαλοπίνακες, Κεντρική κλιματιστική μονάδα, μονάδα BMS
Ενεργειακή κατανάλωση	Συνολική ενεργειακή κατανάλωση: 140 kWh/m²/έτος Θέρμανση/Ψύξη: 90 kWh/m²/έτος
Υφιστάμενη Ενεργειακή Κλάση	Κατηγορία D

Το κτήριο προσομοιώθηκε αρχικά σε σχέση με την ενεργειακή του απόδοση με τη χρήση λογισμικού BIM (Autodesk Revit) και τα ενεργειακά φορτία του κτηρίου εξήχθησαν με τη χρήση του εργαλείου ενεργειακής εκτίμησης του Revit, το οποίο χρησιμοποίησε τις διαδικασίες υπολογισμού του Energy Plus. Στο Σχήμα 2, παρουσιάζονται οι λεπτομέρειες κατασκευής και τα σχέδια προσομοίωσης του κτηρίου υπό μελέτη. Ο υπολογισμός των ενεργειακών φορτίων του κτηρίου, καθώς και των φορτίων για εναλλακτικές υπηρεσίες, δίνονται στον Πίνακα 2.

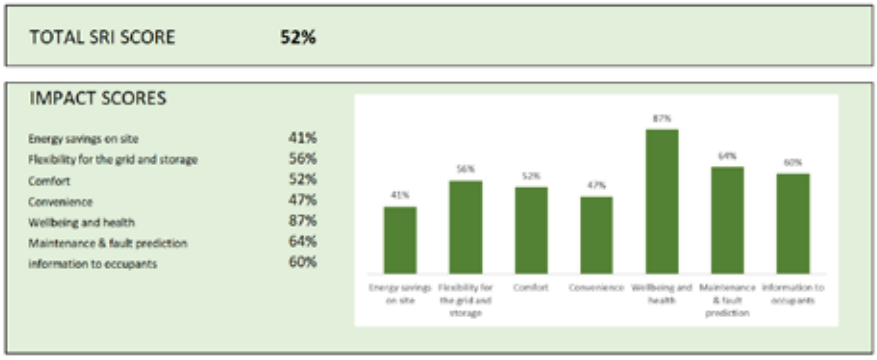


Σχήμα 2. Όψεις και Κατόψεις Νέας Πτέρυγας Πανεπιστημίου Frederick, Λευκωσία

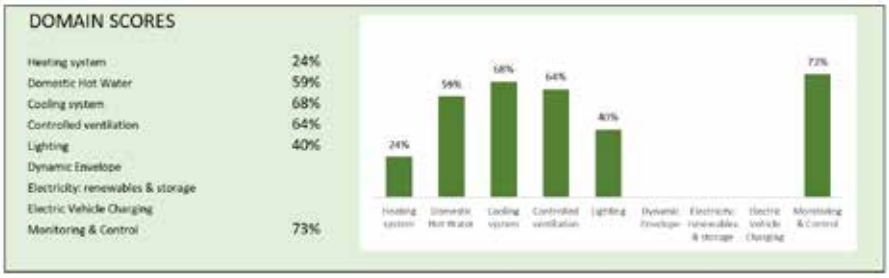
Πίνακας 2. Ενεργειακή ανάλυση κτηρίου: Εκπομπές ισοδυνάμου CO2 (kg CO2).

	Ηλεκτρισμός	Φυσικό Αέριο	Υγραέριο	Βιοαέριο	Βιομάζα	Diesel
Θέρμανση	62,217.3	6193.2	7949.1	798.1	798.1	8491.8
Ψύξη	277,705.7	--	--	--	--	--
Εσωτερικός Φωτισμός	63,224.9	--	--	--	--	--
Εξοπλισμός	55,303.6	--	--	--	--	--
Πρωτογενής Ενέργεια	**458,451.6**	**402,427**	**404,183**	**397,032.3**	**397,032.3**	**404,726.1**

Τα σχήματα 3 και 4 παρουσιάζουν τα αποτελέσματα των δεικτών ευφυούς ετοιμότητας SRI του κτηρίου το οποίο αξιολογήθηκε. Όπως φαίνεται, η συνολική βαθμολογία SRI είναι στο 52%, ενώ η αξιολόγηση των επιμέρους τομέων αποκαλύπτει ότι ευφυής ετοιμότητα του εξεταζόμενου κτηρίου είναι σχετικά υψηλές, κυρίως λόγω του εγκατεστημένου συστήματος BMS στο Κτήριο. Ένα σημαντικό εύρημα είναι το γεγονός ότι παρόλο που το κτήριο φαίνεται να έχει σχετικά καλή βαθμολογία SRI, η ενεργειακή του κλάση σύμφωνα με το πιστοποιητικό ενεργειακής απόδοσης του είναι στην κατηγορία D. Αυτό αποκαλύπτει, ότι η πραγματική ενεργειακή απόδοση του εξεταζόμενου κτηρίου δεν είναι σύμφωνη με την ευφυΐα του.



Σχήμα 3. Συνολική αξιολόγηση βαθμολογίας SRI του υπό μελέτη κτηρίου.



Σχήμα 4. Συνολική αξιολόγηση επί μέρους τομέων SRI για το υπό μελέτη κτήριο.

4. Συμπεράσματα

Είναι προφανές ότι η επιστημονική κοινότητα της δομικής φυσικής βρίσκεται ενώπιον μιας σημαντικής μετάβασης στον τρόπο αξιολόγησης της ενεργειακής συμπεριφοράς των κτηρίων. Η ενσωμάτωση του SRI στις πρακτικές αξιολόγησης των κτηρίων αναμένεται να αποτελέσει μια αναπόφευκτη εξέλιξη και ταυτόχρονα, μια σημαντική πρόκληση για την ερευνητική κοινότητα της δομικής φυσικής και των υπηρεσιών κτηρίου. Όπως σε κάθε σημαντική αλλαγή, η ερευνητική κοινότητα θα πρέπει να υποστηρίξει την ανάπτυξη και την καθιέρωση του SRI μέσω ενδελεχούς ανάλυσης όλων των πτυχών που σχετίζονται με αυτό. Αυτή η εργασία είχε ως στόχο την παρουσίαση και αξιολόγηση του συστήματος SRI. Αν και η χρήση των δεικτών αποτελεί μια πολύ ενδιαφέρουσα

εξέλιξη, οι δείκτες εξακολουθούν να βρίσκονται σε νηπιακό στάδιο ανάπτυξης και, επομένως, υπάρχουν πολλές πτυχές τους οι οποίοι χρήζουν βελτίωσης. Οι δείκτες πρέπει να ενσωματωθούν σε άλλες διαδικασίες αξιολόγησης της ενεργειακής απόδοσης των κτηρίων και να διευρυνθούν περαιτέρω, έτσι ώστε να ληφθούν υπόψη οι ιδιαιτερότητες διαφορετικών τύπων κτηρίων. Ταυτόχρονα, οι δείκτες θα πρέπει να καθοδηγήσουν τις εξελίξεις στον τομέα των συστημάτων κτηρίων, μέσω του καθορισμού ελάχιστων απαιτήσεων για SRI. Αυτή η εξέλιξη απαιτεί τη ποσοτικοποίηση της εξοικονόμησης ενέργειας από την βελτίωση του SRI ενός κτηρίου και συνεπώς την τεχνοοικονομική αποτίμηση του SRI, μια μεθοδολογία στην οποία η επιστημονική κοινότητα θα πρέπει να στρέψει την προσοχή της στο εγγύς μέλλον. Σε γενικές γραμμές, ωστόσο, η πρώτη ανακοίνωση των δεικτών λαμβάνει υπόψη τις περισσότερες πτυχές των κτηρίων και είναι ένα καλό σημείο εκκίνησης για μια ολοκληρωμένη αξιολόγηση της ευφυΐας των κτηρίων.

Αναφορές

[1] Economidou, M.; Todeschi, V.; Bertoldi, P.; D'Agostino, D.; Zangheri, P.; Castellazzi, L. Review of 50 years of EU energy efficiency policies for buildings. Energy Build. 2020, 225, 110322, doi:10.1016/j.enbuild.2020.110322.

[2] Fokaides, P.A.; Christoforou, E.A.; A Kalogirou, S. Legislation driven scenarios based on recent construction advancements towards the achievement of nearly zero energy dwellings in the southern European country of Cyprus. Energy 2014, 66, 588–597, doi:10.1016/j.energy.2013.12.073.

[3] Bach, B.; Wilhelmer, D.; Palensky, P. Smart buildings, smart cities and governing innovation in the new millennium. In Proceedings of the 2010 8th IEEE International Conference on Industrial Informatics, Osaka, Japan, 13–16 July 2010; pp. 8–14.

[4] Charef, R.; Emmitt, S.; Alaka, H.; Fouchal, F. Building Information Modelling adoption in the European Union: An overview. J. Build. Eng. 2019, 25, 100777, doi:10.1016/j.jobe.2019.100777.

[5] Rodrigues, E.M.G.; Osório, G.; Godina, R.; Bizuayehu, A.; Lujano-Rojas, J.; Catalão, J.P. Grid code reinforcements for deeper renewable generation in insular energy systems. Renew. Sustain. Energy Rev. 2016, 53, 163–177, doi:10.1016/j.rser.2015.08.047.

[6] Khatoun, R.; Zeadally, S. Smart cities: concepts, architectures, research opportunities. Commun. ACM 2016, 59, 46–57.

[7] Lin, B.; Lin, B. On the economics of carbon pricing: Insights from econometric modeling with industry-level data. Energy Econ. 2020, 86, 104678, doi:10.1016/j.eneco.2020.104678.

[8] European Commission. Directive (EU) 2018/844 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 Amending Directive 2010/31/EU on the Energy Performance of Buildings and Directive 2012/27/EU on Energy Efficiency. 2018. Available online: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:32018L0844&from=EN. Last Accessed 14 Sep. 2020

[9] European Commission. Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council Amending Directive 2010/31/EU on the Energy Performance of Buildings. COM (2016) 765 Final. Brussels, 30.11.2016. 2016. Available online: http://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:4908dc52-b7e5-11e6-9e3c-01aa75ed71a1.0023.02/DOC_1&format=PDF. Last Accessed 14 Sep. 2020

[10] Vigna, I.; Pernetti, R.; Pasut, W.; Lollini, R. New domain for promoting energy efficiency: Energy Flexible Building Cluster. Sustain. Cities Soc. 2018, 38, 526–533, doi:10.1016/j.scs.2018.01.038.

[11] Jensen, S.R.; Marszal-Pomianowska, A.; Lollini, R.; Pasut, W.; Knotzer, A.; Engelmann, P.; Stafford, A.; Reynders, G. IEA EBC Annex 67 Energy Flexible Buildings. Energy Build. 2017, 155, 25–34, doi:10.1016/j.enbuild.2017.08.044.

[12] Junker, R.G.; Azar, A.G.; Lopes, R.; Lindberg, K.B.; Reynders, G.; Relan, R.; Madsen, H. Characterizing the energy flexibility of buildings and districts. Appl. Energy 2018, 225, 175–182, doi:10.1016/j.apenergy.2018.05.037.

[13] European Commission. Next-Generation Dynamic Digital EPCs for Enhanced Quality and User Awareness. 2020. Available online: https://cordis.europa.eu/project/id/892984. Last Accessed 14 Sep. 2020

[14] Janhunen, E.; Leskinen, N.; Junnila, S.I. The Economic Viability of a Progressive Smart Building System with Power Storage. Sustainability 2020, 12, 5998, doi:10.3390/su12155998.
[15] Märzinger, T.; Österreicher, D. Extending the Application of the Smart Readiness Indicator—A Methodology for the Quantitative Assessment of the Load Shifting Potential of Smart Districts. Energies 2020, 13, 3507, doi:10.3390/en13133507.
[16] Märzinger, T.; Österreicher, D. Supporting the Smart Readiness Indicator—A Methodology to Integrate A Quantitative Assessment of the Load Shifting Potential of Smart Buildings. Energies 2019, 12, 1955, doi:10.3390/en12101955.
[17] Vigna, I.; Pernetti, R.; Pernigotto, G.; Gasparella, A. Analysis of the Building Smart Readiness Indicator Calculation: A Comparative Case-Study with Two Panels of Experts. Energies 2020, 13, 2796, doi:10.3390/en13112796.
[18] Janhunen, E.; Pulkka, L.; Säynäjoki, A.; Junnila, S.I. Applicability of the Smart Readiness Indicator for Cold Climate Countries. Buildings 2019, 9, 102, doi:10.3390/buildings9040102.
[19] European Commission. Personal Communication, European Commission, DG Energy, Unit C4, Energy Efficiency; European Commission: 2020, Berlin, Germany.
[20] VITO. Support for Setting up a Smart Readiness Indicator for Buildings and Related Impact Assessment (Tender Number ENER/C3/2016-554). 2020. Available online: https://smartreadinessindicator.eu/. Last Accessed 22 Sep. 2020
[21] European Committee for Standardization. EN 15232-1:2017 Energy Performance of Buildings. Impact of Building Automation, Controls and Building Management; Modules M10-4,5,6,7,8,9,10; European Committee for Standardization: 2017, Brussels, Belgium.
[22] Leadership in Energy and Environmental Design (LEED) Award. Manag. Environ. Qual. Int. J. 2008, 19, doi:10.1108/meq.2008.08319cab.001.
[23] Building Research Establishment (BRE). Building Research Establishment Environmental Assessment Method (BREEAM). 2020. Available online: https://www.breeam.com/. Last Accessed 14 Sep. 2020
[24] European Commission. Commission Delegated Regulation (EU) No 244/2012 of 16 January 2012 Supplementing Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council on the Energy Performance of Buildings by Establishing a Comparative Methodology Framework for Calculating Cost-Optimal Levels of Minimum Energy Performance Requirements for Buildings and Building Elements. 2012. Available online: https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2012:081:0018:0036:EN:PDF. Last Accessed 14 Sep. 2020
[25] Kylili, A.; Ilic, M.; Fokaides, P.A. Whole-building Life Cycle Assessment (LCA) of a passive house of the sub-tropical climatic zone. Resour. Conserv. Recycl. 2017, 116, 169–177, doi:10.1016/j.resconrec.2016.10.010.

ΟΙ ΑΝΑΠΤΥΞΙΑΚΕΣ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗΣ ΕΝΟΤΗΤΑΣ ΚΟΖΑΝΗΣ ΤΗ ΜΕΤΑΛΙΓΝΙΤΙΚΗ ΕΠΟΧΗ

Ζηνοβία Δημητριάδου, Ρόιδω Μητούλα[1]*, Ελένη Σαρδιανού[1],

Αγησίλαος Οικονόμου[1]

[1] ΠΜΣ "Βιώσιμη Ανάπτυξη", Τμήμα Οικονομίας και Βιώσιμης Ανάπτυξης, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Ελ. Βενιζέλου 70, 17671 Καλλιθέα
*e-mail: mitoula@hua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία ερευνά τις προοπτικές ανάπτυξης της Περιφερειακής Ενότητας Κοζάνης κατά τη μεταλιγνιτική εποχή. Η συγκεκριμένη περιοχή επελέγη λόγω του ότι είναι αυτή που θα πληγεί περισσότερο από όλες τις άλλες από την απεξάρτηση της χώρας από το λιγνίτη. Σύμφωνα με το Εθνικό Ταμείο Δίκαιης Μετάβασης η επιλογή των δράσεων που θα εφαρμοστούν στις περιοχές στόχους, οι οποιες θα βοηθηθούν για τη μετάβασή τους στη μεταλιγνιτική εποχή, θα πρέπει να γίνεται με ανοιχτή διαβούλευση. Στη διαβούλευση θα μπορούν να εκφέρουν γνώμη οι πολίτες, οι τοπικοί φορείς και οι παραγωγικοί κλάδοι. Στο πλαίσιο αυτό η παρούσα εργασία έχει ως στόχο τη διερεύνηση των απόψεων των κατοίκων της Π.Ε. Κοζάνης, αναφορικά με τη μετάβαση της περιοχής στη μεταλιγνιτική εποχή.

Για τις ανάγκες της εργασίας πραγματοποιήθηκε έρευνα με ερωτηματολόγια κατά τους μήνες Απρίλιο και Μάιο του 2020. Το δείγμα αποτελούνταν από 354 πολίτες της Περιφερειακής Ενότητας Κοζάνης. Δεδομένου του περιορισμού κυκλοφορίας την εποχή εκείνη λόγω της πανδημίας COVID-19, τα ερωτηματολόγια εστάλησαν και συλλέχθηκαν διαδικτυακά. Η οργάνωση και επεξεργασία των αποτελεσμάτων της έρευνας έγινε μέσω του ανοιχτού ελεύθερου προγράμματος google forms και για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας παρουσιάζονται μέσω της περιγραφικής στατιστικής.

Από την ανάλυση των στοιχείων και τις βιβλιογραφικές πηγές προέκυψαν συμπεράσματα, τα οποία συνοψίζονται σε swot ανάλυση της περιοχής έρευνας. Από την επιτόπια έρευνα, επίσης, προέκυψαν συμπεράσματα και προβληματισμοί, οι οποίοι προσανατολίζουν σε δράσεις και παρεμβάσεις που θα πρέπει να γίνουν ώστε η Π.Ε. Κοζάνης να κατορθώσει να έχει μία ομαλή μετάβαση στη μεταλιγνιτική εποχή και να επιτύχει τη βιώσιμη ανάπτυξή της.

Λέξεις Κλειδιά: *Ενέργεια, Μεταλιγνιτική Εποχή, Λιγνίτης, Περιφερειακή Ενότητα Κοζάνης*

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην παρούσα εργασία διερευνώνται οι προοπτικές ανάπτυξης της Περιφερειακής Ενότητας Κοζάνης κατά τη μεταλιγνιτική εποχή). Ο λιγνίτης για πολλά χρόνια υπήρξε βασικό καύσιμο που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η Ελλάδα διαθέτει πλούσια κοιτάσματα του συγκεκριμένου ενεργειακού πόρου και ιδιαίτερα σε συγκεκριμένες περιοχές όπως η περιοχή έρευνας (Mitoula & Balerbas, 2002).

Η προσφορά του λιγνίτη ήταν σημαντική σε οικονομικό και κοινωνικό επίπεδο. Υπήρξε καύσιμο στρατηγικής σημασίας για την Ελλάδα, καθώς συνέβαλε κατά πολύ στη μείωση της εξάρτησης από το πετρέλαιο καθώς και στην ενεργειακή εθνική σταθερότητα και ασφάλεια. Ταυτόχρονα, συνέβαλε στην αντιμετώπιση της ανεργίας, η οποία έπληττε την Ελληνική Περιφέρεια, διασφαλίζοντας χιλιάδες θέσεις εργασίας. Η δημιουργία νέων θέσεων εργασίας, κυρίως στην περιοχή έρευνας, οδήγησε όχι μόνο στη μείωση του ποσοστού ανεργίας, αλλά και στην ενδυνάμωση των τοπικών ιδιωτικών επιχειρήσεων, καθώς αναπτύχθηκαν συνεργασίες και βελτιώθηκε κατά πολύ η τεχνογνωσία και η εξειδίκευση του εργατικού δυναμικού (Στεφάνου & Μητούλα, 2002)

Ωστόσο, από την εξόρυξη και καύση του λιγνίτη προέκυψαν αρκετά περιβαλλοντικά προβλήματα. Οι δραστηριότητες της εξόρυξης και της επεξεργασίας του λιγνίτη προκάλεσαν υποβάθμιση του εδάφους αλλά και των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων. Το μεγαλύτερο, όμως, πρόβλημα προέκυψε στην ατμόσφαιρα, λόγω των υψηλών εκπομπών ατμοσφαιρικών ρύπων και αερίων του θερμοκηπίου από τις ενεργειακές μονάδες (Chatzitheodoridis et al, 2008). Όσον αφορά στο κοινωνικό επίπεδο, λόγω της αποκλειστικής ενασχόλησης με την παραγωγή λιγνίτη δεν αναπτύχθηκαν και δεν εφαρμόστηκαν εναλλακτικές αναπτυξιακές στρατηγικές στις εν λόγω περιοχές. Τέλος το βιοτικό επίπεδο των κατοίκων των περιοχών στις οποίες γίνεται η εξόρυξη λιγνίτη, μπορεί μεν να γνώρισε μεγάλη οικονομική ανάπτυξη, όμως αυξήθηκαν κατά πολύ τα προβλήματα υγείας (καρκίνος κ.ά.) με αποτέλεσμα την αύξηση της θνησιμότητας (Δακής, 2009).

Στο παρακάνω διάγραμμα 1 φαίνεται η σταδιακή μείωση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας τα τελευταία χρόνια στην Ελλάδα από το 2011 έως το 2019.

Διάγραμμα 1: Συνολική εγκατεστημένη ισχύ και προσφορά ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα από το 2011 έως το 2019.

Πηγή: www.sdam.gr/el/node/143

Η εξέλιξη της παραγωγής και καύσης του λιγνίτη στην Ελλάδα χωρίζεται σε τρεις χρονικές περιόδους. Κατά την πρώτη περίοδο, η οποία διήρκεσε από το 1960 έως το 1990 (αρχή της μονοδιάστατης ανάπτυξης), η εξόρυξη των λιγνιτικών αποθεμάτων έγινε με ταχείς ρυθμούς και ακολούθησε η εκβιομηχάνιση των εν λόγω περιοχών. Η περίοδος αυτή χαρακτηρίστηκε από μετακινήσεις του εργατικού δυναμικού προς τις “λιγνιτικές” περιοχές, με σκοπό την ανεύρεση εργασίας, εφόσον το τοπικό εργατικό δυναμικό δεν επαρκούσε για την κάλυψη των αναγκών. Στις υπόψη περιοχές εγκαταλήφθηκαν παραδοσιακά επαγγέλματα, αυξήθηκαν τα ενοίκια, τα κόστη των ακινήτων και γενικότερα το κόστος ζωής των κατοίκων. Ταυτόχρονα όμως βελτιώθηκε και το βιοτικό τους επίπεδο.

Στη δεύτερη περίοδο, η οποία διήρκεσε από το 1990 έως το 2002 αναπτύσσονται ανταγωνιστικά καύσιμα στην Ελλάδα, με αποτέλεσμα την αποδυνάμωση τόσο του λιγνίτη, όσο και των περιοχών που τον διαθέτουν.

Η τρίτη περίοδος από το 2002 έως σήμερα, είναι η εποχή της εγκατάλειψης του λιγνίτη. Χαρακτηριστικά αυτής της περιόδου είναι η αναπτυξιακή παθογένεια, η έλλειψη οράματος, η

μετανάστευση του εργατικού δυναμικού τόσο στο εσωτερικό όσο και στο εξωτερικό, αλλά και το κλείσιμο των λιγνιτικών μονάδων λόγω της έλλειψης χρηματοδότησης.
Η μεταλιγνιτική εποχή της Ελλάδας ξεκίνησε από το 2002, χρονικό σημείο από το οποίο ξεκίνησε και η πτώση της παραγωγής του λιγνίτη. Έκτοτε, η προσφορά νέων θέσεων εργασίας στο συγκεκριμένο τομέα μειώνεται συνεχώς, ενώ παρατηρείται σταδιακό κλείσιμο των σχετικών μονάδων ηλεκτροπαραγωγής (Karasmanaki et al, 2000, Marinakis, et al, 2020). Το τέλος της μεταλιγνιτικής εποχής οριοθετείται μέσα στην τρέχουσα δεκαετία, όπου αν δεν έχουν ληφθεί τα απαραίτητα μέτρα, οι περιοχές που παράγουν λιγνίτη στην Ελλάδα, επομένως και η περιοχή έρευνας, θα είναι μη βιώσιμες (Αναπτυξιακή Δυτικής Μακεδονίας-ΑΝΚΟ, 2015).

Μεθοδολογία της Έρευνας

Προκειμένου να διερευνηθούν οι προοπτικές ανάπτυξης της Περιφερειακής Ενότητας Κοζάνης κατά τη μεταλιγνιτική εποχή, αρχικά ερευνήθηκαν περιπτώσεις άλλων ανάλογων περιοχών στην Ευρώπη που αντιμετώπισαν παρόμοια προβλήματα. Στη συνέχεια καταγράφηκε η τρέχουσα Ευρωπαϊκή πολιτική και οι στόχοι που έχουν τεθεί για το μέλλον πάνω σε αυτά τα ζητήματα. Ακολούθως, η μελέτη εστιάστηκε στη συγκεκριμένη περιοχή έρευνας, όπου συνοψίστηκαν τα θετικά και αρνητικά χαρακτηριστικά της, οι ευκαιρίες και οι απειλές (swot ανάλυση). Από τα δεδομένα που προέκυψαν από την έρευνα της βιβλιογραφίας φάνηκε ότι όποιο μέτρο και απόφαση και αν ληφθεί στις περιοχές παρέμβασης, θα πρέπει να έχει ως γνώμονα τους κατοίκους των περιοχών, καθώς αυτοί είναι που θα επηρεαστούν άμεσα από την οποιαδήποτε αλλαγή. Επομένως, η συμμετοχή τους κρίνεται αναγκαία προκειμένου ο τόπος να καταστεί βιώσιμος. Άλλωστε, όπως αποδεικνύεται στη συνέχεια, αυτό αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση σύμφωνα με το Εθνικό Ταμείο Δίκαιης Μετάβασης. Με βάση τα παραπάνω κατέστη απαραίτητη η ανάγκη διερεύνησης των απόψεων των μόνιμων κατοίκων της Π.Ε. Κοζάνης, αναφορικά με τη μετάβαση της περιοχής στη μεταλιγνιτική εποχή και πραγματοποιήθηκε επιτόπια έρευνα με ερωτηματολόγια. Από την περιγραφική στατιστική ανάλυση εξήχθησαν συμπεράσματα τα οποία παρατίθενται στο τέλος της παρούσας εργασίας.

Η Μεταλιγνιτική Εποχή στην Ευρώπη και την Ελλάδα

Τα τελευταία χρόνια οι παγκόσμιες και οι ευρωπαϊκές πολιτικές για την ενέργεια θέτουν ως στόχο τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, την εξασφάλιση ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές και την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης, με απώτερο σκοπό, να μειωθεί το ενεργειακό και ανθρακικό αποτύπωμα. Σύμφωνα με την Οδηγία 2009/28/ΕΚ, η Ε.Ε. έχει θέσει ως στόχο την εξασφάλιση του 20% της ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Ταυτόχρονα, οι περιοχές της Ευρώπης που στηρίζονταν σε εξορυκτικές δραστηριότητες, βρίσκονται πλέον μπροστά σε μια νέα πραγματικότητα. Ανάλογα με τη γεωγραφική τους κατανομή χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι περιοχές του πρώην Ανατολικού Μπλόκ, που βρέθηκαν αντιμέτωπες με τις συνέπειες μιας ραγδαίας κατάρρευσης του υφιστάμενου παραγωγικού και εξορυκτικού μοντέλου, και οι περιοχές του Δυτικού Μπλόκ, όπου ήρθαν επίσης σε παρόμοια φάση, είτε γιατί εξαντλήθηκαν τα αποθέματα, είτε γιατί οι κυβερνήσεις αποφάσισαν να αλλάξουν το υφιστάμενο παραγωγικό μοντέλο για άλλους λόγους, όπως για παράδειγμα τον περιορισμό της χρήσης άνθρακα στην ηλεκτροπαραγωγή και τη στροφή προς τις ΑΠΕ (WWF Ελλάς, 2016). Χαρακτηριστικά είναι τα παραδείγματα που περιγράφονται στη συνέχεια του κειμένου.
Περιοχή της Λειψίας στην Ανατολική Γερμανία: Ο Δήμος του Zeitz βρίσκεται στην Ανατολική Γερμανία, κοντά στην περιοχή της Λειψίας. Κατά την περίοδο ύπαρξης της Ανατολικής Γερμανίας, η περιοχή είχε σημαντική εξορυκτική δραστηριότητα. Συνολικά υπήρχαν πάνω από 20 ορυχεία, που παρήγαγαν περισσότερο από 100 εκ. τόνους λιγνίτη και πολλές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από λιγνίτη. Σήμερα λειτουργούν μόνο 5 ορυχεία που τροφοδοτούν δυο μονάδες παραγωγής. Σημειώνεται ότι η μονάδα Liebentrof, εγκατεστημένης ισχύος περίπου 2000 MW είναι από τις μεγαλύτερες και πιο σύγχρονες παγκοσμίως. Στα σημερινά ενεργά ορυχεία εργάζεται περιορισμένο αριθμητικά προσωπικό σε σχέση με το παρελθόν, το οποίο αποτελείται από περίπου 2000 εργαζόμενους. Μετά την επανένωση της Γερμανίας, κατέρρευσε η οικονομία της Ανατολικής Γερμανίας και πολλά παλιά εργοστάσια και ορυχεία έκλεισαν. Για την αποκατάσταση της περιοχής εφαρμόστηκε από τις αρχές συγκεκριμένο πρόγραμμα που ανέλαβε η εταιρεία LMBV, η οποία προέκυψε μετά τη διάσπαση της εταιρείας MIBRAG, που ιδιωτικοποιήθηκε και συνέχισε την εξορυκτική δραστηριότητα. Η πρακτική που εφαρμόστηκε στην περιοχή είναι κατά τη φάση της εξόρυξης, να προετοιμάζεται και η φάση της αποκατάστασης. Δημιουργείται ειδικό αποθεματικό από τα έσοδα της εξόρυξης, το οποίο προορίζεται συγκεκριμένα για την αποκατάσταση. Επίσης, η διαδικασία της εξόρυξης δεν προχωρά σε νέα πεδία, αν δεν έχει ολοκληρωθεί η αποκατάσταση του

προηγούμενου πεδίου. Επενδύθηκαν τεράστια ποσά χρημάτων και αποκαταστάθηκαν περίπου 20 ορυχεία. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η Λίμνη Geiseltalsee, η οποία ήταν το πρώην ορυχείο Mucheln, το μεγαλύτερο στην περιοχή, εκτάσεως 4500 εκτάρια. Το 1991 ήταν ένα ανοιχτό ορυχείο και σήμερα έχει μετατραπεί σε λίμνη, κοστίζοντας 350.000.000 ευρώ (WWF Ελλάς, 2016).

Περιοχή Loos-En -Gohelle στην Γαλλία: Επιτυχημένο ευρωπαϊκό παράδειγμα μετάβασης στη μεταλιγνιτική εποχή, αποτελεί και ο Δήμος Loos-En-Gohelle στο Nord-Pas-de-Calais. Πρόκειται, για μια περιοχή αρκετά μικρή με 7000 κατοίκους, που βρίσκεται στη Βόρεια Γαλλία. Στην περιοχή η εξορυκτική δραστηριότητα ξεκίνησε περίπου 200 χρόνια πριν. Το 1997 ο Δήμος αποφάσισε να στραφεί σε πολιτικές αειφόρου ανάπτυξης, ενθαρρύνοντας τη συμμετοχή των πολιτών, καθώς η παύση της εξορυκτικής δραστηριότητας, προβλεπόταν ότι θα προκαλέσει εκτός από τα ήδη υπάρχοντα περιβαλλοντικά προβλήματα και κατάρρευση της τοπικής οικονομίας και διάλυση του κοινωνικού ιστού. Εκτός από την ανακήρυξη της περιοχής σε μνημείο Παγκόσμιας Κληρονομιάς από την UNESCO, εφαρμόστηκαν και άλλες αειφορικές πολιτικές. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν, η δημιουργία σε συνεργασία με πολυτεχνικές σχολές, Κέντρου Ερευνών και Δοκιμών για 24 ηλιακές τεχνολογίες και η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών σταθμών και ανεμογεννητριών στις πρώην περιοχές εξόρυξης με σκοπό την αξιοποίηση της ηλιακής και αιολικής ενέργειας αντίστοιχα. Επίσης, ιδρύθηκε Κέντρο Ανάπτυξης και Υποστήριξης, με σκοπό να στηρίξει «πράσινες επιχειρήσεις» της περιοχής, πολλές από τις οποίες έχουν ως αντικείμενο τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Τέλος, αξιοποιήθηκε το κτιριακό απόθεμα και οι κατοικίες ανθρακωρύχων, προκειμένου να πραγματοποιηθούν προγράμματα εξοικονόμησης ενέργειας. (www.renewables networking.eu) (WWF Ελλάς, 2016).

Περιοχή Ruhr στη Γερμανία: Η περιοχή Rurh της Γερμανίας βρίσκεται στη Βόρεια Ρηνανία, αποτελεί μία από τις πιο πυκνοκατοικημένες περιοχές της Ευρώπης και ο πληθυσμός της ανέρχεται περίπου στα 5,3 εκατομμύρια. Από το 1758 αποτέλεσε έναν από τους μεγαλύτερους χώρους συγκέντρωσης βαριάς βιομηχανίας ολόκληρης της Ευρώπης, καθώς στην περιοχή συγκεντρώνονταν πλούσια κοιτάσματα άνθρακα. Ωστόσο, από το 1957 ξεκίνησε η αποβιομηχάνιση της περιοχής, καθώς υπήρξε αύξηση του κόστους της εξόρυξης, και μεταστροφή προς άλλους ενεργειακούς πόρους όπως, το φυσικό αέριο, την πυρηνική ενέργεια, το πετρέλαιο, ακόμη και την εισαγωγή άνθρακα από άλλες χώρες, λόγω της χαμηλότερης τιμής του. Αυτό είχε ως φυσικό επακόλουθο τη σταδιακή εγκατάλειψη της εξορυκτικής δραστηριότητας. Χαρακτηριστικά, το 1957 στα ορυχεία απασχολούνταν περίπου 490.000 εργαζόμενοι, αριθμός ο οποίος το 2005 μειώθηκε στους 40.000 εργαζόμενους. Οι αρχές εγκαίρως αντιλήφθηκαν το πρόβλημα και έλαβαν μέτρα, προκειμένου να προλάβουν τις επερχόμενες συνέπειες στην τοπική οικονομία. Μέσω αναπτυξιακών προγραμμάτων κατόρθωσαν να μεταβούν από το δευτερογενή στον τριτογενή τομέα παραγωγής, με αποτέλεσμα σήμερα να απασχολείται στον τελευταίο ποσοστό μεγαλύτερο του 70% του οικονομικά ενεργού πληθυσμού. Η μετάβαση της περιοχής από τον ένα τομέα στον άλλο έγινε μέσω της επανεκπαίδευσης και του επαναπροσανατολισμού του ανθρώπινου δυναμικού σε νέες δραστηριότητες, μέσω ανάπλασης οικιστικών κέντρων αλλά και προώθησης της καινοτομίας και τεχνολογίας. Σημαντικός λόγος επιτυχίας του συγκεκριμένου εγχειρήματος, ήταν ότι προκειμένου να επιτευχθεί η μετάβαση, συνεργάστηκαν όλοι οι φορείς όπως τράπεζες, επιμελητήρια, συνδικάτα εργαζομένων, τοπική αυτοδιοίκηση και επιχειρήσεις, με τις τοπικές αναπτυξιακές εταιρίες να αναλαμβάνουν το σχεδιασμό των αναπτυξιακών σχεδίων. Διαρθρωτικά ταμεία της Ευρωπαϊκής Ένωσης και κοινοτικά προγράμματα ενίσχυσαν την προσπάθεια και δημιουργήθηκαν δίκτυα περιφερειών και κοινοτήτων, μέσω των οποίων αναδείχθηκε η βιομηχανική και πολιτιστική κληρονομιά. Φυσικό επακόλουθο, ήταν η τουριστική ανάπτυξη της περιοχής και η γενικότερη ανάδειξη της. Πλέον, η περιοχή Ruhr αποτελεί ένα επιτυχημένο παράδειγμα περιοχής μετάβασης στη μεταλιγνιτική εποχή, καθώς έχει κατορθώσει να στρέψει την τοπική οικονομία προς μία νέα κατεύθυνση ανάπτυξης και να προσανατολίσει το εργατικό της δυναμικό προς νέους κλάδους όπως της τεχνολογίας της πληροφορικής και της βιοϊατρικής. Η προώθηση της τεχνολογίας και της καινοτομίας στην περιοχή οδήγησε στη δημιουργία 5 πανεπιστημίων, 8 τεχνικών σχολών και τεχνολογικών κέντρων, ενώ στην περιοχή δραστηριοποιούνται πλέον περισσότερες από 600 εταιρίες. Τέλος, στο Ruhr έγινε αποκατάσταση των εγκαταλειμμένων ορυχείων και στη θέση τους δημιουργήθηκαν εκτος από πανεπιστήμια, ερευνητικά ιδρύματα και τεχνολογικά πάρκα, τουριστικά αξιοθέατα και πολιτιστικά κέντρα (Αναπτυξιακή Δυτικής Μακεδονίας-ΑΝΚΟ, 2015).

Η Μεταλιγνιτική Εποχή στον Ελλαδικό χώρο: Όσον αφορά στην Ελλάδα, αν και και είναι χώρα που διαθέτει πολλά κοιτάσματα λιγνίτη, τα τελευταία χρόνια ξεκίνησε να βγαίνει από την αδράνεια της και να κατανοεί το τέλος της εποχής του λιγνίτη. Εκτός από την Περιφερειακή Ενότητα Κοζάνης, που εξετάζεται και στη συγκεκριμένη έρευνα, υπάρχουν και άλλες περιοχές στην Ελλάδα που βρίσκονται στην ίδια δυσμενή κατάσταση με χαρακτηριστικό παράδειγμα την Μεγαλόπολη στην Πελοπόννησο και τις περιοχές Αμυνταίου και Φλώρινας επίσης στη Δυτική Μακεδονία (Τεχνικό Επιμελητήριο, Τμήμα Δυτικής Μακεδονίας, 2012). Τα έργα, τα οποία έχουν προταθεί να γίνουν τόσο στη Μεγαλόπολη, όσο

και στη Δυτική Μακεδονία, αφορούν στην αποκατάσταση των ανοιχτών ορυχείων και τη δημιουργία στη θέση τους πάρκων με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, για τη Μεγαλόπολη σχεδιάστηκε master plan, το οποίο χρηματοδοτείται από το Ταμείο Δίκαιης Μετάβασης και το ΕΣΠΑ (www.kozani.pdm.gov.gr/). Το master plan περιλαμβάνει προτάσεις, οι οποίες θα εκμεταλλεύονται τα συγκριτικά πλεονεκτήματα της περιοχής στον τομέα της οικονομίας, της ενέργειας, της βιομηχανίας, την αγροτική ανάπτυξη και την τεχνολογία. Στόχος του είναι η δημιουργία θέσεων εργασίας και η εξασφάλιση βιώσιμης προοπτικής για τους κατοίκους των περιοχών αυτών.
Επένδυση που είναι προς συζήτηση και αφορά στη Δυτική Μακεδονία, είναι η δημιουργία μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία θα λειτουργεί με την καύση απορριμμάτων ή βιομάζας. Επίσης, προβλέπεται η αποκατάσταση των εκτάσεων, όπου βρίσκονται τα εργοστάσια και μία από τις προτάσεις που έχουν γίνει είναι η δημιουργία τεχνητών λιμνών στη θέση τους. Επιπρόσθετα, μέρος του σχεδιασμού για τη μετάβαση των περιοχών αυτών στη μεταλιγνιτική εποχή είναι η κήρυξη των λιγνιτικών περιοχών της Δυτικής Μακεδονίας και της Μεγαλόπολης ως ειδικών φορολογικών ζωνών, ζήτημα για το οποίο αναμένεται έγκριση από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή. Το μέτρο αυτό θα παρέχει τη δυνατότητα να γίνουν επενδύσεις στον ενεργειακό τομέα και σε άλλες επιχειρηματικές δραστηριότητες, όπως τη βιομηχανία, τον αγροτουρισμό κ.ά. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται δύο δράσεις, οι οποίες ήδη εξελίσσονται. Η πρώτη αφορά στη δημιουργία ενός φωτοβολταϊκού πάρκου στην Κοζάνη, ενώ η δεύτερη είναι το Ταμείο Δίκαιης Μετάβασης, στο οποίο έχει ξεκινήσει η εκταμίευση, προκειμένου να υπάρχουν πόροι για την υλοποίηση των παραπάνω προτάσεων.

Εθνικό Ταμείο Δίκαιης Μετάβασης

Οι στόχοι της στρατηγικής "Ευρώπη 2020", δηλαδή η μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, η εξασφάλιση της ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές και η αύξηση της ενεργειακής απόδοσης, μπορεί να αποτελούν τις καλύτερες λύσεις για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής, αλλά ταυτόχρονα σε κάποιες περιπτώσεις, όπως στην περιοχή έρευνας, μπορεί να επιφέρουν αρνητικές συνέπειες στην οικονομία, την απασχόληση και τον κοινωνικό ιστό (www.europarl.europa.eu). Οι περιοχές, οι οποίες θα πληγούν περισσότερο, είναι αυτές που οι οικονομίες τους στηρίζονταν στην παραγωγή ενέργειας από ορυκτούς πόρους. Προκειμένου, να επιτευχθούν οι παραπάνω στόχοι, θεσμοθετήθηκαν μέτρα για τις μονάδες ηλεκτροπαραγωγής όπως η αύξηση της τιμής των δικαιωμάτων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και κάποιοι περιβαλλοντικοί περιορισμοί για τις εκπομπές. Αναμένεται ότι τα μέτρα αυτά θα οδηγήσουν σε σταδιακή μείωση της χρήσης των ορυκτών καυσίμων και επομένως σε σταδιακό κλείσιμο μονάδων ηλεκτροπαραγωγής. Για το λόγο αυτό, ξεκίνησε η προσπάθεια στήριξης των περιοχών, οι οποίες εξαρτώνται από τον άνθρακα. Προτάθηκε, από το Ευρωκοινοβούλιο, η δημιουργία ενός Ευρωπαϊκού Ταμείου Δίκαιης Μετάβασης, το οποίο θα χρηματοδοτείται από τα διαθέσιμα δικαιώματα εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Ωστόσο, η συγκεκριμένη πρόταση δεν ευδοκίμησε, αντ' αυτού δημιουργήθηκε από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή μια πλατφόρμα, η "Coal Regions in Transition", η οποία ως κύριο μέλημα έχει τη στήριξη περιοχών παραγωγής ενέργειας μέσω άνθρακα. Στην Ελλάδα συστάθηκε ένας ειδικός λογαριασμός για τη «Δίκαιη Μετάβαση των λιγνιτικών περιοχών», όπου κατά την περίοδο 2018-2020, προγραμματίστηκε να χρηματοδοτηθεί με 60 εκατομμύρια ευρώ, τα οποία θα προέλθουν από τον εκπλειστηριασμό δικαιωμάτων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και άλλες πηγές.
Στόχος, της δημιουργίας του Ταμείου Δίκαιης Μετάβασης, είναι να χρηματοδοτήσει δράσεις οι οποίες θα οδηγήσουν στη δημιουργία νέων μακροπρόθεσμων θέσεων εργασίας, αλλά και ενέργειες που θα οδηγούν σε μείωση του ανθρακικού και ενεργειακού αποτυπώματος και σε μηδενισμό των στερεών ορυκτών και άλλων αποβλήτων. Δράσεις που προτείνονται είναι η χρηματοδότηση προγραμμάτων στήριξης της καινοτομίας και της επιχειρηματικότητας, η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων του Δημοσίου ώστε να εξοικονομείται ενέργεια κ.ά.. Ταυτόχρονα, προωθείται η ανάπτυξη κλάδων όπως ο τουρισμός, η γεωργία, η κτηνοτροφία, ενώ προωθούνται οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και η αντιμετώπιση της ενεργειακής φτώχειας. Όσον αφορά στη διαχείριση του Ειδικού Λογαριασμού, θα γίνεται από κρατικό φορέα και θα εποπτεύεται από το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. Η χρηματοδότηση των δράσεων θα αποφασίζεται από το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, σε συνεργασία με το κατά περίπτωση δράσης συναρμόδιο Υπουργείο. Τέλος, υπογραμμίζεται ότι η επιλογή των δράσεων θα πρέπει να γίνεται με ανοιχτή διαβούλευση, όπου θα μπορούν να εκφέρουν γνώμη οι πολίτες, οι τοπικοί φορείς και οι παραγωγικοί κλάδοι (www.opengov.gr/).

Φωτοβολταϊκό Πάρκο

Έργο, το οποίο έχει προγραμματιστεί να γίνει στην Κοζάνη στο πλαίσιο μετάβασης στη μεταλιγνιτική εποχή είναι το φωτοβολταϊκό πάρκο ισχύος 230MW. Πρόκειται, για ένα από τα μεγαλύτερα έργα

ανανεώσιμων πηγών στην Ευρώπη και το μεγαλύτερο έργο στην Ελλάδα. Έχει ως άξονα την εθνική ενεργειακή πολιτική που υποστηρίζει τη δίκαιη μετάβαση της περιοχής Δυτικής Μακεδονίας στη μεταλιγνιτική εποχή.
Το φωτοβολταϊκό πάρκο αναμένεται να τεθεί σε λειτουργία στο τέλος του 2021 και θα είναι ικανό να εξασφαλίσει την παροχή ενέργειας σε 75.000 νοικοκυριά. Πρόσφατα με την κατακύρωση των δύο διαγωνισμών, η ΔΕΗ Ανανεώσιμες άνοιξε το δρόμο για να ξεκινήσει η κατασκευή του σε εκτάσεις των ορυχείων της ΔΕΗ στην Κοζάνη, θέτοντας τις βάσεις για ένα μεταλιγνιτικό ενεργειακό μοντέλο ανάπτυξης στην περιοχή της Δυτικής Μακεδονίας. Στις 28 Μαΐου του τρέχοντος έτους αναμένεται η κατάθεση των προσφορών και για το μεγάλο φωτοβολταϊκό των 200 MW που μαζί με τα δύο μικρότερα των 15 MW συμπληρώνουν το κλάστερ των 230 μεγαβάτ.
Η ολοκλήρωση του συγκεκριμένου έργου θα στηρίξει την ανάπτυξη της ελληνικής και της τοπικής κοινωνίας, θα βοηθήσει στην επίτευξη των περιβαλλοντικών στόχων που έχουν τεθεί και παράλληλα θα τονώσει οικονομικά την περιοχή της Π.Ε. Κοζάνης (www.kathimerini.gr/).

Μελέτη Περίπτωσης: Η Περιφερειακή Ενότητα Κοζάνης

Η Περιφερειακή Ενότητα Κοζάνης ανήκει στην Περιφέρεια Δυτικής Μακεδονίας. Αποτελείται από τέσσερις Καλλικρατικούς Δήμους, το Δήμο Κοζάνης, το Δήμο Βοΐου, το Δήμο Σερβίων-Βελβεντού και το Δήμο Εορδαίας. Η έκταση της είναι 3.516 km^2 και η πυκνότητά της είναι 47,59 κατοίκους/km^2. Χαρακτηρίζεται ως η ενεργειακή Περιφέρεια της Ελλάδας, καθώς σε αυτήν παράγεται περισσότερο από το 50% της ηλεκτρικής ενέργειας όλης της χώρας από τους ΑΗΣ και ΥΗΣ της ΔΕΗ. Η οικονομία της στηρίζεται κατά κύριο λόγο στην εξόρυξη λιγνίτη και στην παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος, καθώς το ΑΕΠ της διαμορφώνεται σε ποσοστό 47,7% από αυτά. Στην περιοχή υφίσταται επίσης αγροτικός τομέας και παραγωγή παραδοσιακών προϊόντων όπως ο γνωστός κρόκος Κοζάνης. Επίσης, σημαντική είναι και η ενασχόληση με τον κλάδο του μαρμάρου και με άλλα μεταλλεύματα όπως ο αμίαντος και ο χρωμίτης. Όμως, πρόκειται για μία από τις Περιφερειακές Ενότητες με το μεγαλύτερο ποσοστό ανέργων, καθώς από το 2013 ακόμη, όταν ξεκίνησε η μεταλιγνιτική εποχή, το μέσο ετήσιο ποσοστό ανεργίας της ανερχόταν στο 34,7%. Το ποσοστό ανεργίας της περιοχής αυξάνεται συνεχώς τα τελευταία έτη, καθώς σταδιακά χάνει μία από τις βασικότερες παραγωγικές της δραστηριότητες, που είναι η εξόρυξη του λιγνίτη, που απασχολούσε ένα πολύ μεγάλο μέρος του πληθυσμού της.

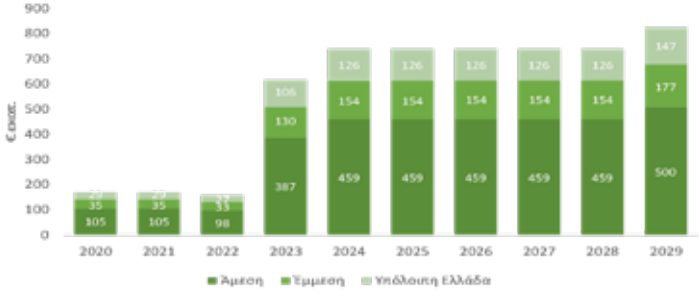
Εικόνα 1. Περιφερειακή Ενότητα Κοζάνης

Πηγή: Ιδία Επεξεργασία, QGIS

Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, η περιοχή διαθέτει και άλλα στοιχεία, τα οποία μπορούν να καταστήσουν την οικονομία της βιώσιμη και να μην έχουν μεγάλο αντίκτυπο στο περιβάλλον. Ο πρωτογενής τομέας παραγωγής δεν έχει αναπτυχθεί επαρκώς και με τις κατάλληλες βελτιώσεις και ενισχύσεις μπορεί να αποδώσει πολύ περισσότερα. Το ίδιο ισχύει και για τον τριτογενή τομέα, ο οποίος έχει πολύ καλές προοπτικές να διασφαλίσει την οικονομική ανάπτυξη της περιοχής έρευνας.
Όσον αφορά στις υποδομές της Π.Ε. Κοζάνης, παρατηρείται ότι υπάρχουν αρκετές ελλείψεις στον τομέα της υγείας και κοινωνικής πρόνοιας και στον τομέα των μεταφορών, όπου εκτός από τη διέλευση της Εγνατίας οδού, τόσο η αεροπορική σύνδεση, όσο και η σιδηροδρομική είναι σχεδόν ανύπαρκτες στην περιοχή. Όμως, θα πρέπει να αναφέρουμε ότι στην Κοζάνη βρίσκεται το Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, το οποίο της εξασφαλίζει μία αξιοσημείωτη δυναμική. Όσον αφορά στην πολιτιστική κληρονομιά, η περιοχή διαθέτει αξιόλογα στοιχεία ιστορίας και πολιτισμού, τα οποία

της προσδίδουν πολιτιστική αξία. Υπάρχουν μουσεία, εκκλησίες, αρχοντικά, αρχαιολογικοί χώροι, ιδιαίτερες παραδόσεις, ήθη και έθιμα, τα οποία έχουν τις ρίζες τους βαθιά στο χρόνο και δίνουν στην περιοχή μία ιδιαίτερα αξιοποιήσιμη φυσιογνωμία. Σημειώνεται ότι στα όρια της Π.Ε. Κοζάνης βρίσκονται αρχοντικά με τη χαρακτηριστική Μακεδονική Αρχιτεκτονική, αλλά και αρχαίες και βυζαντινές πόλεις. Επομένως, ο πολιτισμός αποτελεί ένα αναπόσπαστο κομμάτι της οικονομίας και της κοινωνίας του τόπου, το οποίο με τις κατάλληλες δράσεις μπορεί να συμβάλει στη βιώσιμη ανάπτυξη και την ανάκαμψη του. (www.kozani.pdm.gov.gr/)
Όσον αφορά στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, στην Π.Ε. Κοζάνης υπάρχουν τρεις Ατμοηλεκτρικοί Σταθμοί (ΑΗΣ) και δύο Υδροηλεκτρικοί (ΥΗΣ). Πιο συγκεκριμένα, στην περιοχή βρίσκεται ο ΑΗΣ Αγίου Δημητρίου που αποτελείται από 5 μονάδες συνολικής ισχύος 1456MW και ο ΑΗΣ Καρδιάς με 4 μονάδες συνολικής ισχύος 1102MW. Επίσης, υπάρχουν ο ΥΗΣ Πολυφύτου ισχύος 375MW και ο ΥΗΣ Ιλαρίωνα ισχύος 153MW. Στην Πτολεμαΐδα, υπάρχει ο ΑΗΣ Πτολεμαΐδας, ο οποίος αποτελείται από 4 μονάδες συνολικής ισχύος 600MW που όμως τα τελευταία τέσσερα χρόνια είναι εκτός λειτουργίας. Τη θέση τους θα καταλάβει η 5η μονάδα, η οποία είναι ακόμη υπό κατασκευή και αναμένεται ότι θα μπει σε λειτουργία από το 2023 και θα είναι συνολικής ισχύος 660MW (www.dei.gr/el/). Στο παρακάτω διάγραμμα 2 φαίνονται οι αναμενόμενες απώλειες του ΑΕΠ στην Π.Ε.Κοζάνης έχοντας ως έτος βάσης το 2019.

Διάγραμμα 2: Αναμενόμενες απώλειες του ΑΕΠ στην Π.Ε.Κοζάνης



Πηγή: www.sdam.gr/el/node/143

SWOT Ανάλυση της Περιοχής Έρευνας

Δυνατά Σημεία. Η περιοχή έρευνας αποτελεί το ενεργειακό κέντρο της Ελλάδας, καθώς στο έδαφος της παράγεται περισσότερο από το μισό της ηλεκτρικής ενέργειας ολόκληρης της χώρας. Επίσης, αποτελεί την έδρα του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας, στο οποίο έχει ενταχθεί πλέον και το πρώην Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα (ΤΕΙ) με περισσότερα από 28 τμήματα και περισσότερους από 25.000 φοιτητές. Επίσης, η περιοχή έχει πολύ καλή προσβασιμότητα μετά την ολοκλήρωση της Εγνατίας Οδού και των Κάθετων Αξόνων, καθώς η διέλευση της από την Περιφέρεια συμβάλει στη συνδεσιμότητα της όχι μόνο με την υπόλοιπη Ελλάδα αλλά και με το εξωτερικό. Εκτός από καλή προσβασιμότητα, η περιοχή διαθέτει και αξιόλογα φυσικά οικοσυστήματα αλλά και πολιτιστική κληρονομιά, τα οποία έχει καταφέρει να διατηρήσει σε έναν αρκετά ικανοποιητικό βαθμό και αν αξιοποιηθούν σωστά μπορεί να αποτελέσουν τουριστικούς πόρους. Ακόμη, η Κοζάνη έχει εξιδεικευμένο εργατικό δυναμικό, το οποίο διαθέτει χρόνια εμπειρία στη βιομηχανία. Τέλος, η Κοζάνη είναι γνωστή και για την παραγωγή γεωργικών και κτηνοτροφικών προϊόντων με πιο σημαντικό και παγκοσμίως γνωστό για τις θεραπευτικές και φαρμακευτικές του ιδιότητες, τον “κρόκο Κοζάνης”.
Αδύναμα Σημεία. Στην Π.Ε. Κοζάνης, παρατηρείται ιδιαίτερα υψηλό ποσοστό ανεργίας και μάλιστα στις ηλικίες 18 με 25 ετών. Ταυτόχρονα, τόσο το φυσικό περιβάλλον όσο και η ανθρώπινη υγεία είναι ιδιαίτερα επιβαρυμένα λόγω της ρύπανσης από τα εργοστάσια της ΔΕΗ και πολλές εκτάσεις έχουν κριθεί ακατάλληλες για καλλιέργεια. Όσον αφορά στην υγεία των κατοίκων, έχουν παρατηρηθεί πολλά κρούσματα βρογχίτιδας, άσθματος, καρδιαγγειακών νοσημάτων, με πιο σημαντικό απ’ όλα το υψηλό ποσοστό καρκίνου. Επίσης, το εξειδικευμένο εργατικό δυναμικό που αναφέρθηκε και ως πλεονέκτημα της περιοχής, αποτελεί και αδύνατο σημείο της, καθώς υπάρχει έλλειψη επιχειρηματικής κουλτούρας λόγω της μέχρι πρόσφατα μεγάλης προσφοράς εργασίας από τη ΔΕΗ. Τέλος, το πιο σημαντικό ίσως απ’ όλα τα μειονεκτήματα της περιοχής έρευνας είναι η υψηλή εξάρτηση της τοπικής οικονομίας από τη ΔΕΗ σε βάρος άλλων δραστηριοτήτων και η περιορισμένη επιχειρηματική δραστηριότητα της, πέρα από ελάχιστες εξαιρέσεις. Το υπόψη αδύναμο σημείο, αν δεν αντιμετωπιστεί και δεν αξιοποιηθεί

κατάλληλα, μπορεί να αποβεί μοιραίο, όχι μόνο για την Π.Ε. Κοζάνης αλλά και για ολόκληρη την Περιφέρεια Δυτικής Μακεδονίας.

Ευκαιρίες. Το κλείσιμο των λιγνιτικών μονάδων, μπορεί να αποτελεί ένα μειονέκτημα και μια ενδεχόμενη απειλή για την περιοχή, ωστόσο ταυτόχρονα δημιουργεί και την ευκαιρία επανάχρησης των εγκαταστάσεων της ΔΕΗ και την ένταξη τους στην οικονομική ζωή της Π.Ε. Κοζάνης. Η επανάχρηση των εγκαταστάσεων μπορεί να γίνει με τέτοιο τρόπο, ώστε να βοηθήσει την περιοχή να στραφεί προς νέες μορφές τουρισμού, όπως είναι ο βιομηχανικός και πολιτιστικός τουρισμός, καθώς ο λιγνίτης είναι κομμάτι της ιστορίας του τόπου. Επίσης, η συνεργασία με Βαλκανικές χώρες και η ανάπτυξη οικονομικών σχέσεων, είναι μία δυνατότητα για την περιοχή, την οποία θα πρέπει να εκμεταλλευτεί. Ευκαιρία αποτελεί και η σύνδεση του πρωτογενή τομέα παραγωγής, ο οποίος είναι αρκετά δυναμικός, με τον τουρισμό. Ταυτόχρονα, η δικτύωση και ανάπτυξη συνεργασιών με άλλες Περιφέρειες του εσωτερικού και του εξωτερικού, αποτελεί μία ακόμη ευκαιρία για την περιοχή, καθώς με αυτόν τον τρόπο θα γίνεται ανταλλαγή ιδεών, τεχνολογίας, καινοτομίας και ο ένας τόπος θα μπορεί να καλύψει τις ανάγκες του άλλου. Τελευταία, αλλά εξίσου σημαντική ευκαιρία είναι η ανάπτυξη των γνώσεων γύρω από τις νέες μορφές παραγωγής ενέργειας, κάτι το οποίο θα ενισχύσει και το εργατικό δυναμικό της Π.Ε. Κοζάνης.

Απειλές. Η περαιτέρω περιβαλλοντική υποβάθμιση της Π.Ε. Κοζάνης, αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους κινδύνους που εγκυμονούν και θα πρέπει να αντιμετωπιστούν, όχι μόνο για τη βιωσιμότητα της περιοχής, αλλά κυρίως για την υγεία και το βιοτικό επίπεδο των κατοίκων. Σημειώνεται ότι αν δεν ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα, η Κοζάνη θα βρεθεί αντιμέτωπη με τη μετανάστευση του εργατικού δυναμικού της. Απειλή επίσης είναι η περαιτέρω συρρίκνωση του εμπορίου και γενικότερα της επιχειρηματικότητας, κάτι το οποίο θα οδηγήσει με τη σειρά του και σε μείωση του τουριστικού ενδιαφέροντος και της ελκυστικότητας του τόπου. Κίνδυνος τέλος είναι και η γενικότερη οικονομική κατάσταση της χώρας, η οποία δυσκολεύει ακόμη περισσότερο την περιοχή όσον αφορά στις επενδύσεις που πρέπει να γίνουν σε αυτή, προκειμένου να αντιμετωπίσει την κατάσταση και να ανακάμψει. Σε όλα αυτά βεβαίως προστίθεται και το δυσμενές επιχειρηματικό και όχι μόνο περιβάλλον, λόγω της πανδημίας covid 19 που εξελίσσεται τον τελευταίο χρόνο.

Έρευνα

Για τις ανάγκες της έρευνας δημιουργήθηκε ερωτηματολόγιο, το οποίο περιελάμβανε εικοσιμία (21) ερωτήσεις κλειστού τύπου δομημένης απάντησης, ήταν ανώνυμο και μοιράστηκε σε 354 άτομα. Λόγω της πανδημίας COVID-19, όπου επιβλήθηκαν σημαντικοί περιορισμοί στην κυκλοφορία και τη μετακίνηση των πολιτών, δεν ήταν δυνατή η φυσική διανομή των ερωτηματολογίων. Επομένως, τα ερωτηματολόγια οργανώθηκαν μέσω του ανοιχτού, ελεύθερου προγράμματος Google Forms και στάλθηκαν διαδικτυακά μέσω της ίδιας πλατφόρμας. Αρχικά δίνονταν η σχετική διευκρίνιση, ότι το ερωτηματολόγιο απευθύνεται σε άτομα που είτε είναι μόνιμοι κάτοικοι της Π.Ε. Κοζάνης, είτε έχουν σχέση με την Π.Ε. Κοζάνης. Η έρευνα πραγματοποιήθηκε τους μήνες Απρίλιο και Μάιο του 2020. Για την οικονομία του κειμένου έγινε επιλογή των πιο σημαντικών ερωτήσεων και τα αποτελέσματα αναφέρονται στη συνέχεια.

Σύμφωνα με τα δημογραφικά αποτελέσματα, το 48% του δείγματος ήταν άνδρες και το 52% γυναίκες. Όσον αφορά στην ηλικία, η πλειοψηφία του δείγματος ανήκει σε παραγωγική ηλικία. Μόλις το 3% ήταν έως 18 ετών, το 30% ήταν 19-30 ετών, το 25% ήταν 31-45 ετών, και το 42% ήταν μεγαλύτεροι από 45 ετών (βλ. Σχήμα 1). Όσον αφορά στο επίπεδο εκπαίδευσης, το δείγμα στην πλειοψηφία του διαθέτει υψηλή μόρφωση, και επομένως είναι σε θέση να κατανοήσει πλήρως τα ερωτήματα της έρευνας (το 40% είναι απόφοιτοι Α.Ε.Ι./Τ.Ε.Ι.) (βλ. Σχήμα 2).

Το 31% του δείγματος δήλωσε ότι το ετήσιο οικογενειακό εισόδημα του κυμαίνεται από 10.000€ έως και 20.000€ (31%). Ωστόσο, αρκετά ήταν εκείνοι που δήλωσαν από 20.000€ έως και 30.000€ (26%) και πάνω, συνεπώς το δείγμα αποτελείται από μέτρια αμειβόμενους πολίτες. (Σχήμα 3)

Όσον, αφορά στο επάγγελμα των ερωτώμενων, οι περισσότεροι είναι δημόσιοι υπάλληλοι (26%), ελεύθεροι επαγγελματίες (22%) και ιδιωτικοί υπάλληλοι (22%), πράγμα το οποίο ήταν αναμενόμενο για την Π.Ε. Κοζάνης όπου υπερισχύει ο τριτογενής και ο δευτερογενής τομέας παραγωγής. (βλ. Σχήμα 4)

Στην ερώτηση “Είστε μόνιμος κάτοικος Κοζάνης” το 91% του δείγματος απάντησε “ναι” και το 9% “όχι” (βλ. Σχήμα 5). Επομένως, θεωρούμε ότι το δείγμα αποτελείται κυρίως από κατοίκους της περιοχής έρευνας.

Στην ερώτηση “Ποιος κλάδος απασχόλησης θα σας έκανε να παραμείνετε στην περιοχή”, η πλειοψηφία των ερωτώμενων απάντησε οι “υπηρεσίες”, το “εμπόριο” και η “ενέργεια”. Η συγκεκριμένη ερώτηση έγινε με σκοπό να βγει ένα συμπέρασμα για το ποιες θέσεις εργασίας θα συγκρατούσαν το εργατικό δυναμικό στην Π.Ε. Κοζάνης. (βλ. Σχήμα 6)

Στην ερώτηση “Γνωρίζετε τι είναι μεταλιγνιτική εποχή;” το 96% δήλωσε, ότι γνωρίζει (βλ. Σχήμα 7). Ωστόσο, υπήρξε ένα 4%, το οποίο δήλωσε ότι λόγω ελλιπούς ενημέρωσης (40%) αλλά και δικής του αδιαφορίας (13%) δεν γνώριζε. (βλ. Σχήμα 8)

Οι ερωτώμενοι οι οποίοι απάντησαν ότι γνώριζαν τι είναι μεταλιγνιτική εποχή, ερωτήθηκαν για το “Ποιοί πιστεύουν ότι είναι οι λόγοι μετάβασης σε αυτή”. Η πλειοψηφία θεωρεί ότι οι λόγοι είναι “οικονομικοί και περιβαλλοντικοί” (63%). (βλ. Σχήμα 9)

Στην ερώτηση “Εάν είναι σύμφωνοι με την παύση της χρήσης του λιγνίτη”, το 53% του δείγματος απάντησε “όχι”. Ωστόσο, ένα μεγάλο ποσοστό (47%) απάντησε “ναι”. Από το συγκεκριμένο αποτέλεσμα φαίνεται ότι οι κάτοικοι είναι διχασμένοι για το τι θα είναι καλύτερο γι’ αυτούς και την περιοχή. Υπάρχουν αυτοί, που είναι υπέρμαχοι του λιγνίτη και αυτοί που είναι κατά και θεωρούν ότι θα έπρεπε πολύ νωρίτερα να έχει σταματήσει η χρήση του λιγνίτη στην περιοχή. (βλ. Σχήμα 10)

Στην ερώτηση “Ποιές πιστεύετε ότι είναι οι αρνητικές συνέπειες από την παύση της χρήσης του λιγνίτη” στο μεγαλύτερο ποσοστό τους οι ερωτώμενοι απάντησαν “η αύξηση της ανεργίας”, “η μείωση της οικονομικής δραστηριότητας”, “η μετανάστευση του εργατικού δυναμικού και “η ερήμωση της περιοχής”. (βλ. Σχήμα 11)

Στην ερώτηση “Ποιές πιστεύετε ότι είναι οι θετικές συνέπειες από τη μετάβαση στη μεταλιγνιτική εποχή”, η πλειοψηφία των ερωτώμενων απάντησε “μείωση της ρύπανσης” και “βελτίωση της υγείας των κατοίκων”, και ίσως “βελτίωση της εικόνας της Π.Ε. Κοζάνης”. (βλ.Σχήμα 12)

Στην ερώσηση “Σε ποιον τομέα πιστεύετε ότι θα πρέπει να στηριχθεί η οικονομία”, η πλειοψηφία του δείγματος θεωρεί ότι η οικονομία της Π.Ε. Κοζάνης θα πρέπει να στηριχτεί σε όλους τους τομείς παραγωγής, με τον αγροτικό τομέα και την ενέργεια/ΑΠΕ να ξεχωρίζουν. (βλ. Σχήμα 13)

Σε ερώτηση “Ποιές πιστεύετε ότι πρέπει να είναι οι επεμβάσεις ώστε να υπάρξει βιώσιμη ανάπτυξη”, η πλειοψηφία απάντησε ότι πρέπει να γίνουν όλων των ειδών οι παρεμβάσεις, όπως οικονομικές, περιβαλλοντικές, διοικητικές, να υπάρξει βελτίωση των υποδομών και της τουριστικής εικόνας της περιοχής, και μέριμνα για την ενίσχυση της κοινωνικής στήριξης. Σημειώνεται ότι οι οικονομικές επεμβάσεις κρίθηκαν από το δείγμα και οι πιο αναγκαίες για τη βιωσιμότητα της περιοχής. (βλ. Σχήμα 14)

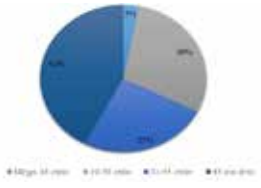
Σε ερώτηση “Ποιά πιστεύετε ότι πρέπει να είναι η νέα χρήση των εγκαταστάσεων ΑΗΣ” η πλειοφηφία του δείγματος απάντησε “τεχνολογικό πάρκο”, “άλλες παραγωγικές εγκαταστάσεις”, “ενέργεια/ΑΠΕ” και “γεωργική”. Από τις απαντήσεις συμπεραίνεται ότι το δείγμα επιθυμεί την παραγωγική επανάχρηση των χώρων που παλαιότερα χρησιμοποιούνταν για την παραγωγή και την καύση του λιγνίτη. (βλ. Σχήμα 15)

Στην ερώτηση “Είστε ικανοποιημένος από τις μέχρι τώρα ενέργειες των αρμόδιων αρχών”, το 49% των ερωτώμενων δήλωσε ότι δεν είναι καθόλου ικανοποιημένο από τις μέχρι τώρα ενέργειες των αρμόδιων αρχών, όσον αφορά στο σχεδιασμό της ομαλής μετάβασης στη μεταλιγνιτική εποχή. Μόλις το 1% δήλωσε ικανοποιημένο, ενώ το υπόλοιπο ποσοστό από μέτρια έως και καθόλου. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι μέχρι στιγμής οι κάτοικοι δεν έχουν δει κάποια έμπρακτη ενέργεια, και ότι οι αποφάσεις για την περιοχή ίσως δεν επικοινωνούνται και δεν λαμβάνουν υπόψη τη γνώμη των πολιτών. (βλ Σχήμα 16)

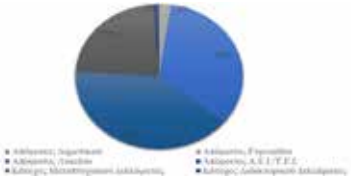
Στην ερώτηση “Σε ποιο βαθμό πιστεύετε ότι τα αντισταθμιστικά οφέλη είναι ικανοποιητικά” οι συμμετέχοντες θεωρούν ότι τα αντισταθμιστικά οφέλη για την περιοχή είναι από μέτρια (40%) έως λίγο (31%) και καθόλου ικανοποιητικά (20%), με ένα μικρό ποσοστό (9%) να τα θεωρούν πολύ ικανοποιητικά. (Σχήμα 17)

Τέλος, οι κάτοικοι ρωτήθηκαν “Σε ποιο βαθμό πιστεύουν ότι θα μπορέσει να ανακάμψει η Π.Ε. Κοζάνης”. Η πλειοψηφία των ερωτώμενων δήλωσε ότι η περιοχή θα επανέλθει από μέτρια (36%) έως πολύ (25%). Από τις απαντήσεις συμπεραίνουμε ότι οι ερωτώμενοι, είναι σχετικά αισιόδοξοι σχετικά με το μέλλον της περιοχής και είναι διατεθειμένοι να παραμείνουν σε αυτή, εφόσον όμως υπάρξει σωστή διαχείριση και αντιμετώπιση της κατάστασης. (βλ. Σχήμα 18)

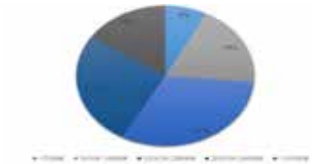
Σχήμα 1: Ηλικία



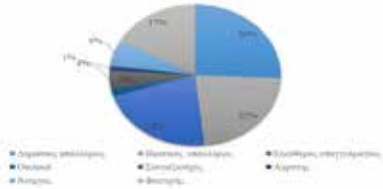
Σχήμα 2: Επίπεδο εκπαίδευσης



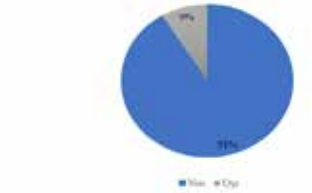
Σχήμα 3: Ετήσιο οικογενειακό εισόδημα



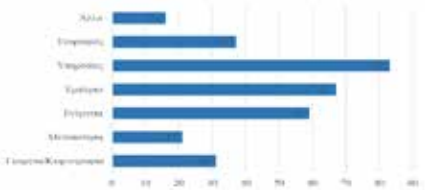
Σχήμα 4: Επάγγελμα



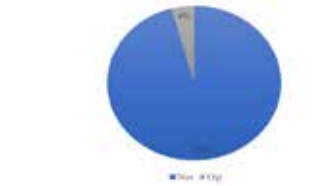
Σχήμα 5: Είστε μόνιμος κάτοικος Κοζάνης



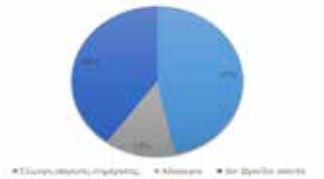
Σχήμα 6: Ποιος κλάδος απασχόλησης θα σας έκανε να παραμείνετε στην περιοχή;



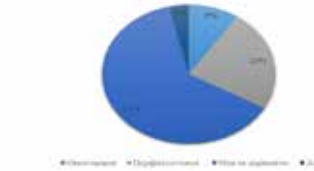
Σχήμα 7: Γνωρίζετε τι είναι μεταλιγνιτική εποχή;



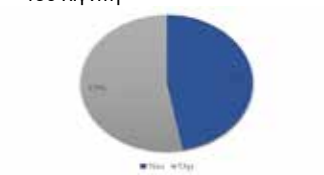
Σχήμα 8: Εάν όχι, γιατί;



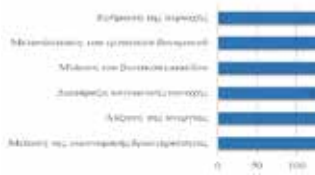
Σχήμα 9: Ποιοι πιστεύετε ότι είναι οι λόγοι μετάβασης στη μεταλιγνιτική εποχή



Σχήμα 10: Είστε σύμφωνοι με την παύση χρήσης του λιγνίτη

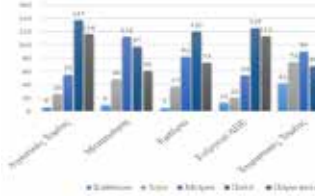


Σχήμα 11: Ποιές πιστεύετε ότι είναι οι αρνητικές συνέπειες από την παύση της χρήσης του λιγνίτη;

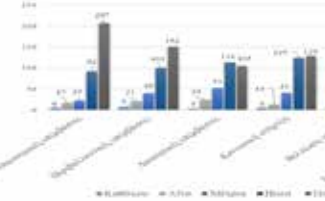


Σχήμα 12: Ποιές πιστεύετε ότι είναι οι θετικές συνέπειες από τη μετάβαση στη μεταλιγνιτική εποχή

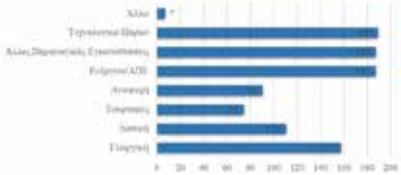
Σχήμα 13: Σε ποιον τομέα πιστεύετε ότι θα πρέπει να στηριχθεί η οικονομία



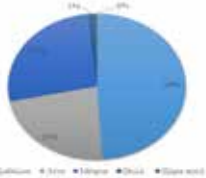
Σχήμα 14: Ποιές πιστευετε ότι πρέπει να είναι οι επεμβάσεις ώστε να υπάρξει βιώσιμη ανάπτυξη



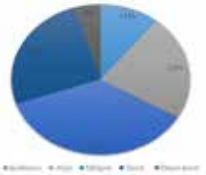
Σχήμα 15: Ποιά πιστεύετε ότι πρέπει να είναι η νέα χρήση των εγκαταστάσεων ΑΗΣ;



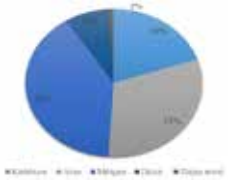
Σχήμα 16: Είστε ικανοποιημένος από τις μέχρι τώρα ενέργειες των αρμόδιων αρχών



Σχήμα 17: Σε ποιο βαθμό πιστεύετε ότι τα αντισταθμιστικά οφέλη είναι ικανοποιητικά



Σχήμα 18: Σε ποιο βαθμό πιστεύετε ότι θα μπορέσει να ανακάμψει η Π.Ε. Κοζάνης;



ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στόχος της παρούσας εργασίας ήταν να διερευνηθούν οι απόψεις των κατοίκων της Π.Ε. Κοζάνης, για τη μετάβαση της περιοχής στη μεταλιγνιτική εποχή. Η ανάγκη αυτή προέκυψε διότι ότι σύμφωνα με το Εθνικό Ταμείο Δίκαιης Μετάβασης η επιλογή των πολιτικών και δράσεων που θα πραγματοποιηθούν θα πρέπει να γίνεται με ανοιχτή διαβούλευση, όπου θα μπορούν να εκφέρουν γνώμη οι πολίτες, οι τοπικοί φορείς και οι παραγωγικοί κλάδοι.

Στα πλαίσια της έρευνας καταγράφηκαν οι Ευρωπαϊκοί στόχοι για την ενέργεια και το κλίμα. Ταυτόχρονα διερευνήθηκε η εθνική ενεργειακή πολιτική της χώρας, η οποία εντάσσεται στο Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα, αλλά και στα Περιφερειακά Προγράμματα, τα οποία είναι σε πλήρη συμφωνία με τις ευρωπαϊκές τάσεις. Από τη μελέτη των παραπάνω φαίνεται ότι στόχος, όλων των προγραμμάτων και οδηγιών είναι η μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, η εξασφάλιση ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές και η αύξηση της ενεργειακής απόδοσης, με απώτερο σκοπό, να μειωθεί το ενεργειακό και ανθρακικό αποτύπωμα.

Η Ελλάδα, για πολλά χρόνια στηρίχθηκε για την ενεργειακή της εξασφάλιση στο λιγνίτη. Οι περιοχές που διέθεταν το συγκεκριμένο πόρο καλούνται σήμερα να προσαρμοστούν στη νέα πραγματικότητα, είτε γιατί τα αποθέματα εξαντλήθηκαν, είτε γιατί είναι υποχρεωμένες να ευθυγραμμιστούν με τους διεθνείς, Ευρωπαϊκούς και εθνικούς στόχους για τη μείωση της χρήσης των ορυκτών καυσίμων. Στην Ελλάδα ως έτος έναρξης της μεταλιγνιτικής εποχής θεωρείται το 2002, χρονικό σημείο από το οποίο ξεκινά η πτώση της παραγωγής λιγνίτη.

Η Περιφερειακή Ενότητα Κοζάνης είχε συνδέσει σε μεγάλο βαθμό την οικονομία της με τη χρήση του λιγνίτη και ένα μεγάλο ποσοστό των κατοίκων της απασχολούνταν σε αυτόν τον τομέα. Καλείται λοιπόν σήμερα να περάσει στη μεταλιγνιτική εποχή, αξιοποιώντας τη βοήθεια που θα της δοθεί από τους Ευρωπαϊκούς και εθνικούς πόρους. Στο πλαίσιο της έρευνας του θέματος εξετάστηκαν τρία παραδείγματα περιοχών από την Ευρώπη που αντιμετώπισαν παρόμοια προβλήματα της μεταλιγνιτικής εποχής. Οι περιοχές αυτές παρά τις δυσκολίες κατάφεραν να ανταπεξέλθουν, να χαρακτηριστούν ως καλές πρακτικές και η εμπειρία τους θα πρέπει να αξιοποιηθεί για οποιαδήποτε δράση γίνει στην περιοχή έρευνας.

Η έρευνα τη Π.Ε.Κοζάνης έδειξε ότι η περιοχή διαθέτει περιορισμένη επιχειρηματική δραστηριότητα και το ανθρώπινο δυναμικό της είναι εξιδεικευμένο στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς για πολλά χρόνια η ΔΕΗ αποτελούσε σε μεγάλο ποσοστό τον επαγγελματικό προσανατολισμό των κατοίκων της περιοχής. Ωστόσο, από την ανάλυση των υπόλοιπων δυνατοτήτων της, προκύπτει ότι διαθέτει ένα σχετικά καλό επίπεδο κοινωνικών υποδομών και μία ισχυρή πολιτιστική και φυσική κληρονομιά, τα οποία δεν έχει ακόμη αναδείξει και αξιοποιήσει επαρκώς.

Από τα τρία παραδείγματα καλών πρακτικών στην Ευρώπη είδαμε ότι οι περιοχές αυτές αξιοποίησαν σε μεγάλο βαθμό παράλληλα με τις παραγωγικές δραστηριότητες και την πολιτιστική τους κληρονομιά. Τα αποτελέσματα της επιτόπιας έρευνας έδειξαν ότι οι κάτοικοι της Π.Ε.Κοζάνης προτιμούν την παραγωγική επανάχρηση των χώρων που παλαιότερα χρησιμοποιούνταν για την παραγωγή και

καύση του λιγνίτη. Δηλαδή την προώθηση των παραγωγικών εγκαταστάσεων της Ενέργειας/ΑΠΕ, καθώς και τη γεωργική χρήση.
Ζήτημα που προβληματίζει από τα αποτελέσματα της έρευνας είναι η έλλειψη ικανοποίησης από τις μέχρι τώρα ενέργειες των αρμόδιων αρχών για τη διαχείριση του ζητήματος της μεταλιγνιτικής εποχής. Αυτό, σε συνδυασμό με τη μη ικανοποίηση από τα αντισταθμιστικά οφέλη που δίνονται, είναι θέμα που θα πρέπει να απασχολήσει τους φορείς που θα διαμορφώσουν το στρατηγικό πρόγραμμα που θα οδηγήσει την Π.Ε.Κοζάνης στην επιτυχημένη μεταλιγνιτική εποχή. Όμως, η σχετική αισιοδοξία των κατοίκων της περιοχής, η οποία διαπιστώνεται από τα αποτελέσματα της τελευταίας ερώτησης, δίνει πολύ καλές προοπτικές για την επιτυχημένη μετάβαση στη νέα εποχή και στη βιώσιμη ανάπτυξη του τόπου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Mitoula R., Balerbas Ath. (2002) «Regional Development and Restoration of areas of Lignite Mining by the P.P.C.», Proceedings of the International Conference «PROTECTION AND RESTORATION OF THE ENVIRONMENT», Volume III, Skiathos, Greece, 1-5/7/2002.

[2] Στεφάνου Ι, Μητούλα Ρ. (2002) "Ο ρόλος της Ενέργειας στον περιβαλλοντικό σχεδιασμό και την περιφερειακή ανάπτυξη", εκδόσεις ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ ΠΟΛΕΟΔΟΜΙΚΗΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ Ε.Μ.Π., Αθήνα.

[3] Karasmanaki Ev., Ioannou K., Katsaounis K., Tsantopoulos G. (2020) "The attitude of the local community towards investments in lignite before transitioning to the post-lignite era: The case of Western Macedonia, Greece", Elselvier, Resources Policy, Volume 68, October 2020, https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101781

[4] Marinakis V., Flamos Al., Stamtsis G., Georgizas I., Maniatis Y., Doukas H. (2020) "The Efforts Towards and Challenges of Greece's Post-Lignite Era: The Case of Megalopolis", Sustainability (IF 2.576) Pub Date : 2020-12-17, DOI: 10.3390/su122410575

[5] Chatzitheodoridis F., Kolokontes Ar., Vasiliadis L. (2008) "Lignite mining and lignite-fired power generation in Western Macedonia of Greece: Economy and Environment", The Journal of Energy and Development, Vol. 33, No. 2 (Spring, 2008), pp. 267-282, https://www.jstor.org/stable/24812980

[6] Δακής Γ. (2009), «Ορυκτός πλούτος και τοπικές κοινωνίες: Λιγνίτης: Εθνικό καύσιμο– Κοζάνη: η ενεργειακή καρδιά της Ελλάδας». Νομαρχιακή αυτοδιοίκηση Κοζάνης.

[7] Αναπτυξιακή Δυτικής Μακεδονίας-ΑΝΚΟ (2015) «Επιχειρησιακό Σχέδιο Ανάπτυξης για τη Μεταλιγνιτική Περίοδο – Α' Φάση». www.pta.pdm.gr

[8] WWF Ελλάς, (2016), «Οδικός Χάρτης Μετάβασης στη Μεταλιγνιτική Περίοδο για την Περιφέρεια Δυτικής Μακεδονίας». www.wwf.gr/

[9] «Loos in Transition. Loos-en-Gohelle replacing coal-mining with renewable energy sources» www.renewables/networking.eu/documents/CaseStudyLoos-en-Gohelle-FR.pdf.

[10] Τεχνικό Επιμελητήριο, Τμήμα Δυτικής Μακεδονίας (2012), «Προσδιορισμός και Οριοθέτηση της Μεταλιγνιτικής Εποχής, για το Ενεργειακό Κέντρο της Δυτικής Μακεδονίας»

[11] "Περιφερειακή Ενότητα Κοζάνης" www.kozani.pdm.gov.gr/periferiaki-enotita kozanis/parousiasi-enotitas/

[12] Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο. Προτεραιότητες για την Κλιματική Αλλαγή. www.europarl.europa.eu /news/el/headlines/ priorities/klimatiki-allagi

[13] Σχέδιο Δίκαιης Αναπτυξιακής Μετάβασης. www.sdam.gr/el/node/143

[14] "Στην τελική ευθεία το πρώτο φωτοβολταϊκό πάρκο στην Κοζάνη" www.kathimerini.gr/economy/business/1079189/stin-teliki-eytheia-to-proto-fotovoltaiko-parko-stin-kozani/

[15] www.dei.gr/el Δημοσιευμένα Στοιχεία από τη ΔΕΗ. Τελευταία επίσκεψη 20/1/21

[16] Δημητριάδου Ζ. (2020). Αναπτυξιακές Προοπτικές της Περιφερειακής Ενότητας Κοζάνης τη Μεταλιγνιτική Εποχή. Διπλωματική Εργασία, Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών "Βιώσιμη Ανάπτυξη", Τμήμα Οικονομίας και Βιώσιμης Ανάπτυξης, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΥΓΕΙΑΣ ΣΕ ΣΧΕΔΟΝ ΜΗΔΕΝΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Αγγελική Παμπούκα*, Αργυρώ Δημούδη, Σταμάτης Ζώρας

Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνική Σχολή, Δημοκρίτειο Πανεπ. Θράκης
email: angepabo1@env.duth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια, η παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας αυξήθηκε δυσανάλογα σε σχέση με την αύξηση του πληθυσμού, κυρίως λόγω της οικονομικής ανάπτυξης και της έλλειψης κοινωνικής ευαισθητοποίησης στις πιο ανεπτυγμένες χώρες, όπου αυξάνεται η κατανάλωση ενέργειας από κάθε κάτοικο.

Ο κτιριακός τομέας καταναλώνει περίπου το 40 % της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας στις χώρες της Ε.Ε. και συνεπώς αποτελεί σημαντικό παράγοντα όσον αφορά στην εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου σε παγκόσμια κλίμακα. Έχει παρατηρηθεί πως τα νοσοκομεία έχουν μία από τις υψηλότερες καταναλώσεις ενέργειας στον τριτογενή τομέα. Οι βασικότεροι λόγοι, για τους οποίους η κατανάλωση ενέργειας των νοσοκομείων είναι τόσο υψηλή, είναι η συνεχής λειτουργία τους όλο το εικοσιτετράωρο καθ' όλη την διάρκεια του έτους και τα ειδικά επίπεδα άνεσης τα οποία απαιτούνται για την υγεία των ασθενών καθώς επίσης και οι ιδιαίτερες συνθήκες λειτουργίας διάφορων χώρων π.χ. χειρουργεία.

Στην παρούσα εργασία θα διερευνηθεί η ενεργειακή αναβάθμιση ενός Κέντρου Υγείας στην Περιφέρεια της Κεντρικής Μακεδονίας. Είναι ένα κτίριο κτισμένο από το 1954 και αντιμετωπίζει σημαντικά προβλήματα σχετικά με την αυξημένη κατανάλωση ενέργειας καθώς και με τις συνθήκες άνεσης των εργαζομένων και των επισκεπτών Για την προσομοίωση της υφιστάμενης κατάστασης του κτιρίου και για τα πιθανά βελτιωτικά σενάρια, χρησιμοποιήθηκε το ενεργειακό μοντέλο προσομοίωσης Design-Builder (Energy Plus). Μετά την ολοκλήρωση του σχεδιασμού, την εισαγωγή δεδομένων στο πρόγραμμα, εκτελέστηκαν προσομοιώσεις τόσο για την υφιστάμενη κατάσταση αλλά και για βελτιωτικά σενάρια. Τα αποτελέσματα αξιολογούνται και ιεραρχούνται τόσο ως προς την εξοικονόμηση ενέργειας αλλά και με οικονομικά κριτήρια και διερευνάται η δυνατότητα για μετατροπή του σε κτίριο σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας.

Λέξεις Κλειδιά: Κτίρια σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας, μονάδες υγείας, εξοικονόμηση ενέργειας στα κτίρια, ΑΠΕ σε κτίρια

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΚΤΙΡΙΟ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΕΝΤΡΟ ΥΓΕΙΑΣ

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται το Κέντρο Υγείας Ελευθερούπολης (Κ.Υ.Ε.). Το Κ.Υ.Ε. βρίσκεται στην περιοχή της Ελευθερούπολης και συγκεκριμένα στη διεύθυνση Εγνατίας 73, που είναι πρωτεύουσα του Δήμου Παγγαίου ο οποίος είναι από τους μεγαλύτερους σε έκταση Δήμους της Ελλάδας και ανήκει στον νομό Καβάλας με γεωμετρικό πλάτος 40° 54', γεωμετρικό μήκος 24° 36' και 5,4 m υψόμετρο βαρομέτρου. Η Ελευθερούπολη αποτελεί κωμόπολη του Δήμου Παγγαίου στον νομό Καβάλας. Βρίσκεται στο βόρειο σημείο της κοιλάδας του Μαρμαρά 16 χιλιόμετρα δυτικά της Καβάλας και έχει πληθυσμό 5.555 κατοίκους, σύμφωνα με απογραφή που έλαβε χώρα το 2011.

Το Κέντρο Υγείας Ελευθερούπολης (Κ.Υ.Ε.) είναι Φορέας Παροχής Υπηρεσιών Πρωτοβάθμιας Φροντίδας Υγείας του Πρωτοβάθμιου Εθνικού Δικτύου Υγείας (Π.Ε.Δ.Υ) και ανήκει στην Τέταρτη Υγειονομική Περιφέρεια (Υ.ΠΕ) Μακεδονίας και Θράκης. Η περιοχή ευθύνης του Κέντρου Υγείας Ελευθερούπολης είναι ολόκληρος ο δήμος Παγγαίου καθώς και ένα μέρος του δήμου Καβάλας.

Το κτίσμα του Κέντρου Υγείας Ελευθερούπολης ανήκει στην C κλιματική ζώνη της Ελλάδας σύμφωνα με τον κανονισμό ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων (ΚΕνΑΚ). Το κτίριο πέρα από κάποιες αλλαγές που υπέστη το 1984 λόγω της αλλαγής του από μαιευτήριο σε Κέντρο Υγείας και μια τελευταία προσθήκη ως τμήμα επειγόντων περιστατικών το 1986, δεν έχει υποστεί καμία αναβάθμιση από το 1954 όπου κατασκευάστηκε το κτίριο.

Αυτό έχει ως συνέπεια μεγάλων απωλειών ενέργειας λόγω έλλειψης μονώσεων και παλιών κουφωμάτων, τεράστια σπατάλη καυσίμων και ηλεκτρικού ρεύματος λόγω παλιών συστημάτων θέρμανσης και ψύξης καθώς και πολλά προβλήματα στις συνθήκες άνεσης για τους ασθενείς και το προσωπικό του Κέντρου Υγείας Ελευθερούπολης.

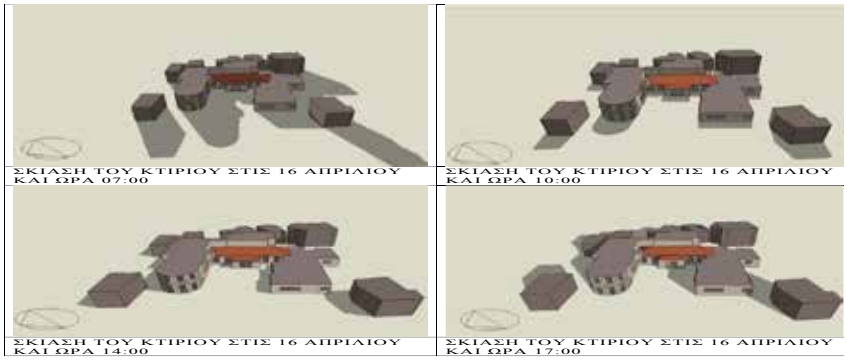
Το κτίριο αποτελείται από 2 ορόφους και ένα ημιυπόγειο τμήμα με συνολική επιφάνεια 1.753,76 m^2, το ύψος του ισογείου είναι 3,75 m και του τυπικού ορόφου 3,15 m. Το Κ.Υ.Ε. λειτουργεί 365 ημέρες τον χρόνο και 24 ώρες την ημέρα, καθώς λειτουργεί συνεχώς το τμήμα επειγόντων περιστατικών. Τα τελευταία χρόνια έχουν περιοριστεί όλες οι λειτουργίες του Κ.Υ.Ε. μόνο στο ισόγειο του κτιρίου, καθώς όλα τα ιατρεία που λειτουργούν πλέον έχουν συγκεντρωθεί σε αυτό τον χώρο. Πρέπει να σημειωθεί όμως ότι ενώ δεν χρησιμοποιούνται οι περισσότεροι χώροι, ψύχονται και θερμαίνονται άσκοπα, καταναλώνοντας μεγάλα ποσά ενέργειας. Το κτίριο χρησιμοποιεί δύο καυστήρες πετρελαίου για θέρμανση (16.000.000 kcal/h) και 40 κλιματιστικά σώματα που λειτουργούν με ηλεκτρικό ρεύμα και είναι διανεμημένα στο χώρο του κτιρίου (473.400,6 Btu/h ή 119.294,95 kcal/h) για ψύξη.

2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΤΙΡΙΟΥ

Το Design Builder είναι ένα λογισμικό ανάλυσης του κτιριακού περιβάλλοντος το οποίο συνδυάζει την ευκολία στη χρήση και τη μοντελοποίηση με τα αξιόπιστα αποτελέσματα των πλέον προηγμένων εφαρμογών ενεργειακής ανάλυσης, όπως είναι το λογισμικό δυναμικής θερμικής προσομοίωσης EnergyPlus, το οποίο χρησιμοποιεί ως μηχανή. Επιπλέον, επιτρέπει τον υπολογισμό παραγόντων όπως τα επίπεδα άνεσης, τα ηλεκτρομηχανολογικά συστήματα, τις εκπομπές CO_2 και τα επίπεδα φωτισμού, ενώ διαθέτει επιπλέον εργαλείο υπολογιστικής ρευστομηχανικής (CFD) .

Μέσω του προγράμματος Design Builder, σχεδιάστηκε το κτίριο μελέτης με ακριβή προσανατολισμό και διαστάσεις τοιχοποιίας και ανοιγμάτων. Δημιουργήθηκαν αρχικά 3 ζώνες, ο όροφος του κτιρίου, το ισόγειο και το υπόγειο. Έπειτα προστέθηκαν τα ανοίγματα, 26 παράθυρα στον όροφο, 50 παράθυρα στο ισόγειο και 4 θύρες. Το κτίριο χωρίστηκε σε υποζώνες για καλύτερη διαχείριση των χώρων και των αποτελεσμάτων. Στο ισόγειο δημιουργήθηκαν ζώνες για τους χώρους που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις, ώστε να γίνει η σύγκριση των μετρήσεων Το κτίριο περιβάλλεται από διάφορα κτίρια μέσου ύψους 6m και διάφορα τμήματα του κτιρίου σκιάζονται από τα γειτονικά κτίρια καθ΄ όλη την διάρκεια της ημέρας, όπως

απεικονίζεται στην Εικόνα 1 ο σχεδιασμός μέσω του προγράμματος και ο τρόπος που επηρεάζουν τα γειτονικά κτίρια την σκίαση σε 4 διαφορετικές ώρες την ημέρα.



Εικόνα 1. Σκίαση του κτιρίου σε τέσσερις διαφορετικές ώρες κατά την διάρκεια της ημέρας

Με την ολοκλήρωση του σχεδιασμού του κτιρίου μελέτης, ακολούθησε η εισαγωγή δεδομένων και πληροφοριών όσον αφορά τα υλικά κελύφους, θέρμανσης, ψύξης, ΖΝΧ και φωτισμού σύμφωνα με την υφιστάμενη κατάσταση του κτιρίου.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΠΡΩΤΟΓΕΝΟΥΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η συμμετοχή ενός συγκεκριμένου καυσίμου είναι ο λόγος μεταξύ της καταναλισκόμενης ενέργειας προερχόμενης από το εξεταζόμενο καύσιμο προς την συνολική πρωτογενή ενεργειακή κατανάλωση υπολογιζόμενων στην διάρκεια ενός ημερολογιακού έτους.

Σύμφωνα με τα δεδομένα και τις πληροφορίες που εισήχθησαν στο λογισμικό του Energy-Plus, η ετήσια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας του κτιρίου υπολογίστηκε από το πρόγραμμα 546,3 kWh/m^2 (Πίνακας 1).

Πίνακας 1. Πρωτογενής κατανάλωση ενέργειας μέσω του μοντέλου προσομοίωσης

ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΠΡΩΤΟΓΕΝΟΥΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ kWh/m^2	546,3

4. ΒΕΛΤΙΩΤΙΚΑ ΣΕΝΑΡΙΑ ΓΙΑ ΤΟ ΚΤΙΡΙΟ ΜΕΛΕΤΗΣ

Στο πρώτο βελτιωτικό σενάριο γίνεται προσθήκη θερμομόνωσης. Ο εξωτερικός τοίχος από απλό οπλισμένο σκυρόδεμα χωρίς θερμομόνωση και U-Value 3,40 W/m^2-K, μετατράπηκε σε τοίχο με θερμομόνωση και U-Value 0.614 W/m^2-K. Καθώς επίσης ικανοποιείται και η απαίτηση του ΚΕΝΑΚ που θέτει ως μέγιστο επιτρεπόμενο συντελεστή θερμοπερατότητας για εξωτερικούς τοίχους στην ζώνη Γ να είναι 0,70 W/m^2-K.

Στο δεύτερο βελτιωτικό σενάριο προστίθεται θερμομόνωση στην οροφή του κτιρίου. Η εξωτερική επίπεδη οροφή που είναι κατασκευασμένη από απλό οπλισμένο σκυρόδεμα και η κεκλιμένη με απλό σκυρόδεμα

και κεραμίδια χωρίς θερμομόνωση έχουν U-Value 3,70 W/m^2-K και 4,70 W/m^2-K αντίστοιχα. Σε αυτό το σενάριο μετατράπηκαν σε οροφές με θερμομόνωση και U-Value 0,553 W/m^2-K η επίπεδη και 0,547 W/m^2-K η κεκλιμένη. Καθώς επίσης, ικανοποιείται και η απαίτηση του ΚΕΝΑΚ που θέτει ως μέγιστο επιτρεπόμενο συντελεστή θερμοπερατότητας για εξωτερικές οροφές στην ζώνη Γ να είναι 0,75 W/m^2-K.

Στο τρίτο βελτιωτικό σενάριο χρησιμοποιείται ο συνδυασμός των δύο πρώτων σεναρίων δηλαδή γίνεται προσθήκη θερμομόνωσης στην τοιχοποιία και στην οροφή του κτιρίου.

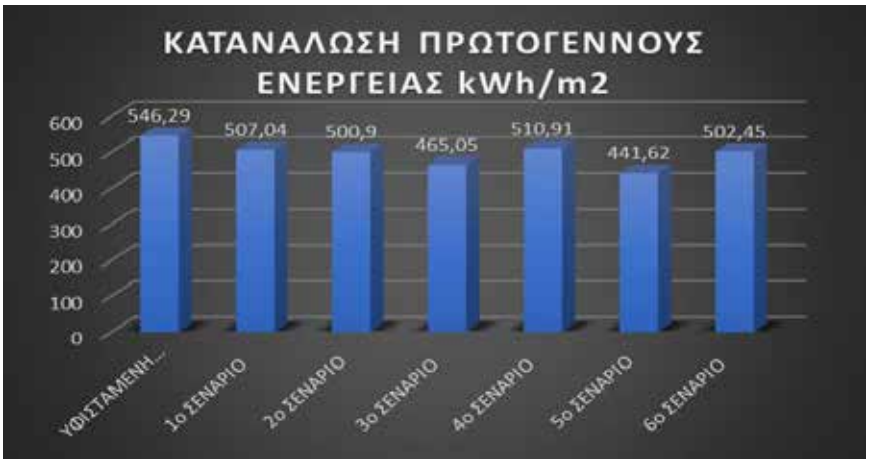
Στο τέταρτο σενάριο βελτιώθηκαν όλα τα ανοίγματα του κτιρίου μελέτης, αλλάζοντας όλα τα υλικά των κουφωμάτων και των υαλοπινάκων, μεταβάλλοντας τις τιμές θερμοπερατότητας και αεροπερατότητας με προκαθορισμένες τιμές από το energy plus. Τα πλαίσια των ανοιγμάτων από μεταλλικά πλαίσια χωρίς θερμομόνωση μετατράπηκαν σε μεταλλικά πλαίσια με θερμοδιακοπή 12mm και συντελεστή θερμοπερατότητας 3,50 W/m^2-K. Οι υαλοπίνακες από μονούς υαλοπίνακες αλλάχθηκαν σε δίδυμους με διάκενο αέρα 12mm και συντελεστή θερμοπερατότητας 2,80W/m^2-K. Όσον αφορά την αεροδιαπερατότητα από 'μη-ικανοποιητική' με συντελεστή ροής 0,003000 kg/s-m σε 1 Pa, μετατράπηκε σε 'καλή αεροδιαπερατότητα' με συντελεστή ροής 0,000060 kg/s-m σε 1 Pa.

Στο πέμπτο σενάριο γίνεται ο συνδυασμός όλων των προηγούμενων σεναρίων, δηλαδή θερμομόνωση του κελύφους (τοιχοποιία, οροφή) και αλλαγή κουφωμάτων.

Στο τελευταίο βελτιωτικό σενάριο σχεδιάζονται και εντάσσονται Φωτοβολταϊκά συστήματα στην επίπεδη οροφή του κτιρίου μελέτης.

Η εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών στο κτίριο μελέτης έγινε με κλίση 30^0 και στραμμένα στο νότο. Σχεδιάστηκαν 7 συστοιχίες από 7 φωτοβολταϊκές μονάδες, σύνολο 49 μονάδες, με διαστάσεις 1,5x1 m η κάθε μονάδα.

Σύμφωνα με τις αλλαγές που πραγματοποιήθηκαν στα παραπάνω σενάρια παρατηρείται πτώση της κατανάλωσης ενέργειας ανά m^2. Ο βαθμός μείωσης της κατανάλωσης ποικίλει από σενάριο σε σενάριο όπως παρατηρείται στο γράφημα 1.



Διάγραμμα 1. Πρωτογενής κατανάλωση ενέργειας μέσω του μοντέλου προσομοίωσης.

Για την επιλογή του βέλτιστου σεναρίου υπολογίστηκε το κόστος της επένδυσης για κάθε σενάριο και στην συνέχεια ο χρόνος αποπληρωμής του έργου (Πίνακας 2).

Πίνακας 2. Το κόστος επένδυσης και ο χρόνος αποπληρωμής των βελτιωτικών σεναρίων.

	ΣΕΝΑΡΙΟ 1	ΣΕΝΑΡΙΟ 2	ΣΕΝΑΡΙΟ 3	ΣΕΝΑΡΙΟ 4	ΣΕΝΑΡΙΟ 5	ΣΕΝΑΡΙΟ 6
Εξοικονόμηση ενέργειας, (kWh)	10.002,95	22.505,9	30.411,1	14.512,4	36.873,1	30.236,2
Εξοικονόμηση χρημάτων, (€)	946,2	3.701, 9	3.519,3	1.733,4	4.157,2	4.503,7
Κόστος επένδυσης, (€)	45.957,5	38.677,5	84.635,1	63.636,6	232.906,8	26.960
Χρόνος αποπληρωμής (έτη)	48,6	10,4	24,0	36,7	56,0	6,0

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα μελέτη στόχος μας ήταν η μείωση κατανάλωσης ενέργειας και η βελτίωση συνθηκών διαβίωσης στο Κέντρο Υγείας Ελευθερούπολης. Το κτίριο είναι κατασκευασμένο από το 1954, δεν έχει θερμομόνωση, με ελάχιστες παρεμβάσεις μέχρι και σήμερα, το οποίο επιφέρει πολλά προβλήματα και στις συνθήκες άνεσης στο εργατικό προσωπικό και στους επισκέπτες του Κ.Υ.Ε., καθώς επίσης δαπανούνται μεγάλα ποσά ενέργειας άσκοπα, λόγω απωλειών από το κέλυφος.

¨Εγινε χρήση του μοντέλου Design Builder (Energy-Plus), προσομοιώνοντας τις πραγματικές συνθήκες του κτιρίου και έπειτα ολοκληρώθηκε με την διεξαγωγή πιθανών βελτιωτικών σεναρίων, τροποποιώντας τα υλικά του κελύφους, συμπεραίνοντας ποιος παράγοντας επηρεάζει περισσότερο στην κατανάλωση ενέργειας και ποιο θα ήταν το βέλτιστο δυνατό σενάριο για το συγκεκριμένο κτίριο μελέτης.

Σε όλα τα βελτιωτικά σενάρια παρατηρήθηκε μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. Στα 5 πρώτα βελτιωτικά σενάρια έγινε παρέμβαση στο κέλυφος του κτιρίου, με τοποθέτηση θερμομονωτικών υλικών και ενεργειακά αποδοτικά κουφώματα. Συμπεραίνουμε πως είναι πολύ σημαντικός παράγοντας για την ενεργειακή απόδοση ενός κτιρίου, καθώς μειώνοντας την τιμή του ελαχιστοποιείται η απώλεια θερμότητας και υπάρχει περισσότερη μόνωση.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που διεξήγαγε το μοντέλο μετά την ολοκλήρωση των 6 βελτιωτικών σεναρίων, παρατηρήθηκε η μεγαλύτερη μείωση στην κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας της τάξεως 23,8% στο σενάριο 5, όπου είναι το συνδυαστικό σενάριο με την προσθήκη μόνωσης σε όλο το κέλυφος του Κ.Υ.Ε.. Η αμέσως επόμενη αισθητή μείωση παρατηρείται στο σενάριο 3, με μείωση 17,5 %, με την αλλαγή των υλικών τοιχοποιίας και οροφής. Συμπεριλαμβανομένου όμως και του κόστους επένδυσης το σενάριο 5 δεν είναι τόσο οικονομικό, καθώς ο χρόνος αποπληρωμής ξεπερνάει τα 50 χρόνια. Σε αντίθεση με το σενάριο 3 που αποσβένει μόλις στα 20 έτη.

Σε περίπτωση που επιλεχθεί να αλλαχθεί ένα μέρος του κελύφους για εξοικονόμηση ενέργειας, συνίσταται η αλλαγή της κεκλιμένης και επίπεδης οροφής, κάνοντας χρήση μονωτικών υλικών. Διότι είναι το πιο αποδοτικό μεμονωμένο σενάριο, καθώς μόνο με την τροποποίηση της οροφής μειώνεται η κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας κατά 9,1% και ο χρόνος αποπληρωμής είναι 10 έτη. Αυτό οφείλεται στην μεγάλη έκταση και έκθεση που έχει η οροφή με τους εξωτερικούς παράγοντες, όπως για παράδειγμα την συνεχή και ανεμπόδιστη έκθεση στον ήλιο. Αισθητή είναι και η μείωση πρωτογενούς κατανάλωσης ενέργειας με την εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών, κατά 8,8%. Η μικρότερη διαφορά παρατηρείται με την αλλαγή των κουφωμάτων και αυτό οφείλεται στην μικρότερη έκταση που καταλαμβάνουν στο κτίριο τα ανοίγματα.

Προτεραιότητα είναι να τοποθετηθεί θερμομόνωση στην τοιχοποιία και στην οροφή του κτιρίου και να γίνει αλλαγή των κουφωμάτων με νέα ενεργειακά αποδοτικά, καθώς έτσι θα εξοικονομηθούν σημαντικά ποσά ενέργειας. Σύμφωνα με την κατάσταση του κτιρίου, προέχει η ανάγκη βελτιστοποίησης του κελύφους και σε ακολουθεί η εφαρμογή συστημάτων εκμετάλλευσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ώστε να μειωθεί περαιτέρω η κατανάλωση συμβατικών πηγών ενέργειας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Ε. Ανδρεαδάκι, 2006, Βιοκλιματικός σχεδιασμός, Περιβάλλον και βιωσιμότητα, τόμ. 1, Θεσαλλονίκη: University Studio Press, pp. 9-10.

[2] C. De la Cruz-Lovera, A.-J. Perea-Moreno, J.-L. De la Cruz-Fernández, J. A. Alvarez-Bermejo και F. Manzano-Agugliaro, 2017, ¨Worldwide Research on Energy Efficiency and Sustainability in Public Buildings', Sustainability, τόμ. 9, αρ. 8.

[3] M. Panagiotidou και R. J. Fuller, 2013, 'Progress in ZEBs - A review of definitions, policies and construction activity', Energy Policy, τόμ. 62, pp.196-206.

[4] H. Lund, A. Marszal και P. Heiselberg, 2011, 'Zero energy buildings and mismatch compensation factors', Energy and Buildings, τόμ. 43, αρ. 7, pp.1646-1654.

[5] J. Laustsen, 2008, 'Energy efficiency requirements in building codes, energy efficiency policies for new buildings', Organization for Economic Co-operation and Development, International Energy Agency, Paris, France.

[6] P. Torcellini, S. Pless και M. Deru, 2006, 'Zero Energy Buildings: A Critical Look at the Definition', National Renewable Energy Laboratory, U.S. Department of Energy, Pacific Grove, California.

[7] Σωφρόνης, Η., Μαρκογιαννάκης, Γ.. ΚΑΠΕ, 'Κατανάλωση Ενέργειας στα Δημόσια Νοσοκομεία'.

[8] "https://el.wikipedia.org/wiki/Ελευθερούπολη," [Online].,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%95%CE%BB%CE%B5%CF%85%CE%B8%CE%B5%CF%81%CE%BF%CF%8D%CF%80%CE%BF%CE%BB%CE%B7.

[9] K. Maragkogiannis, D. Kolokotsa, E. Maravelakis and A. Konstantaras, 2014, 'Combining terrestrial laser scanning and computational fluid dynamics for the study of the urban thermal environment', Sustainable Cities and Society.

[10] «Symbion Αρχιτεκτονική-Περιβάλλον,» [Ηλεκτρονικό]. Available: http://www.symbion.gr/index.html.

[11] Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2017, 2017, Αναλυτικές Εθνικές Προδιαγραφές Παραμέτρων για τον Υπολογισμό της Ενεργειακής Απόδοσης Κτηρίων και την Έκδοση του Πιστοποιητικού Ενεργειακής Απόδοσης, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος (ΤΕΕ).

[12] Β. Πανούσης, 2017, ¨Ενεργειακές Τεχνολογίες & Αποδοτικότητα - Πρωτογενής Ενεργειακή Κατανάλωση. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.district-energy.gr/energy/energy-terms/πρωτογενής-ενεργειακή-κατανάλωση/.

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΥΚΛΟΥ ΨΥΞΗΣ ΜΕ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΕΝΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΠΡΟΒΛΕΠΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΚΤΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΟΓΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΟΡΓΑΝΙΚΟΥ ΡΕΥΣΤΟΥ

Αλέξιος-Σπυρίδων Κυριακίδης[1*], Θωμάς Προύσαλης[2], Αθανάσιος Παπαδόπουλος[1], Ibrahim Hassan[3], Πάνος Σεφερλής[2]

[1*] Ινστιτούτο Διεργασιών και Ενεργειακών Πόρων (ΕΚΕΤΑ/ΙΔΕΠ), Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης, Τ.Θ. 60361, Θέρμη, Θεσσαλονίκη, e-mail: alexkyr@certh.gr

[2] Εργαστήριο Δυναμικής Μηχανών, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

[3] Dept. of Mechanical Engineering, Texas A&M University at Qatar

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, και λόγω της επίδρασης εξωγενών παραγόντων, διαταραχών αλλά και λόγω της αλλαγής του σημείου λειτουργίας, η διεργασία του κύκλου ψύξης με απορρόφηση αποκλίνει από το βέλτιστα σχεδιασμένο σημείο λειτουργίας. Επιπλέον, η ολική ενεργειακή απόδοση του κύκλου εξαρτάται άμεσα από την επιλογή του εργαζόμενου ρευστού. Οι υπάρχουσες μελέτες για την επιλογή εργαζόμενου ρευστού λαμβάνουν υπόψιν τους την απόδοση του συστήματος σε μόνιμη κατάσταση. Παρόλα αυτά, είναι πιθανό εργαζόμενα ρευστά που παρουσιάζουν καλή συμπεριφορά σε μόνιμη κατάσταση να είναι πολύ ευαίσθητα σε διαταραχές και διακυμάνσεις των συνθηκών λειτουργίας. Σε μια τέτοια περίπτωση, το επιλεγμένο σύστημα ελέγχου θα χρειαζόταν να καταναλώσει μεγάλη ποσότητα θερμότητας ή βοηθητικών παροχών, ή ακόμα να μην καταφέρει να ελέγξει την διεργασία για την επίτευξη της απαιτούμενης ψυκτικής ισχύος. Ως αποτέλεσμα, είναι απαραίτητο η αξιολόγηση του συστήματος ψύξης, για την εκτίμηση διαφορετικών εργαζόμενων μέσων, να γίνεται με βάση τόσο την απόδοση σε μόνιμη κατάσταση όσο και τη δυναμική λειτουργία του συστήματος. Στην παρούσα εργασία, εξετάζεται η δυναμική συμπεριφορά ενός συστήματος ψύξης με απορρόφηση μονής πλήρωσης, στο οποίο εφαρμόζεται ένας βέλτιστος προβλεπτικός ελεγκτής καθώς ο κύκλος χρησιμοποιεί διαφορετικά οργανικά ρευστά ως εργαζόμενα μέσα, με σκοπό την επιλογή του πιο κατάλληλου ρευστού. Η δυναμική απόδοση του κλειστού βρόχου αξιολογείται με βάση την θερμότητα και τους πόρους που καταναλώνονται, την ταχύτητα απόκρισης του συστήματος και την απόκλιση από το επιθυμητό σημείο λειτουργίας καθώς το σύστημα υπόκειται σε ένα συγκεκριμένο σενάριο διαταραχών, το οποίο περιλαμβάνει την ημερήσια μεταβολή της απαιτούμενης ψυκτικής ισχύος. Τα διαφορετικά οργανικά ρευστά για τα οποία μελετάται η δυναμική συμπεριφορά τους έχουν επιλεγεί με βάση την απόδοση τους σε μόνιμη κατάσταση. Στην συνέχεια, η δυναμική απόδοση κάθε εργαζόμενου μέσου εξετάζεται σε συνδυασμό με την απόδοση τους σε μόνιμη κατάσταση για την επιλογή βέλτιστου εργαζόμενου μέσου. Το τελικό αποτέλεσμα της προτεινόμενης μεθοδολογίας είναι ο προσδιορισμός εργαζόμενων μέσων τα οποία επιδεικνύουν χαμηλή ευαισθησία σε διαταραχές ενώ ταυτόχρονα είναι οικονομικά ανταγωνιστικά κατά την λειτουργία σε μόνιμη κατάσταση. Το μείγμα ακεταλδεϋδης/ν,ν-διμεθυλφορμαμίδιου (acetaldehyde/DMF) παρουσιάζει την καλύτερη δυναμική συμπεριφορά, με το εμπορικά διαθέσιμο εργαζόμενο μείγμα αμμωνίας/νερού να ακολουθεί. Το τελευταίο παρουσιάζει και την δεύτερη καλύτερη απόδοση σε μόνιμη κατάσταση.

Λέξεις Κλειδιά: Κύκλος ψύξης με απορρόφηση, Δυναμική προσομοίωση κύκλου ψύξης με απορρόφηση, Βέλτιστος προβλεπτικός έλεγχος, Αξιολόγηση και επιλογή εργαζόμενου ρευστού

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η πλέον διαδεδομένη τεχνολογία παραγωγής ψύξης είναι η ψύξη με συμπίεση ατμού, η οποία όμως χρησιμοποιεί ηλεκτρική ενέργεια για τον συμπιεστή. Μια πολλά υποσχόμενη εναλλακτική διεργασία είναι η ψύξη με απορρόφηση (Absorption Refrigeration cycle, ABR), η οποία αξιοποιεί θερμική ενέργεια (π.χ. απορριπτόμενη ή ανανεώσιμη ενέργεια) ως κινητήρια δύναμη για παραγωγή ψύξης. Η διεργασία ψύξης με απορρόφηση αποτελείται από ένα αριθμό συσκευών (π.χ. εναλλάκτες θερμότητας, βαλβίδες εκτόνωσης, αντλίες), στις οποίες λαμβάνουν χώρα μεταβολές θερμοκρασίας και πίεσης καθώς και αλλαγές φάσεων του εργαζόμενου ρευστού, ώστε να μετατραπεί η εξωτερικά παρεχόμενη θερμική ενέργεια σε ψύξη. Έτσι λοιπόν, η ενεργειακή απόδοση του κύκλου εξαρτάται άμεσα από την επιλογή του εργαζόμενου ρευστού.

Σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, και λόγω της επίδρασης εξωγενών παραγόντων, διαταραχών (π.χ. μεταβολή συνθηκών περιβάλλοντος) αλλά και λόγω της αλλαγής του σημείου λειτουργίας (π.χ. λειτουργία μερικού φορτίου), η διεργασία του κύκλου ψύξης με απορρόφηση αποκλίνει από το βέλτιστα σχεδιασμένο σημείο λειτουργίας. Έτσι, χρειάζεται να εξεταστεί η δυναμική συμπεριφορά του συστήματος ώστε να αποκτηθεί πλήρης κατανόηση της επίδοσης του συστήματος και εν συνεχεία να σχεδιαστεί ένα κατάλληλο σύστημα ελέγχου. Είναι πιθανό, εργαζόμενα ρευστά που παρουσιάζουν καλή συμπεριφορά σε μόνιμη κατάσταση να είναι πολύ ευαίσθητα σε διαταραχές και διακυμάνσεις λειτουργίας. Σε μια τέτοια περίπτωση, το επιλεγμένο σύστημα ελέγχου θα χρειαζόταν να καταναλώσει μεγάλο ποσό θερμότητας, ή ενέργειας για άντληση του εργαζόμενου ρευστού ή ακόμα χειρότερα να μην καταφέρει να ελέγξει την διεργασία και να μην παραχθεί η απαιτούμενη ψυκτική ισχύς. Στην βιβλιογραφία παρουσιάζονται κατά κύριο λόγο μελέτες για κύκλους ψύξης με απορρόφηση που χρησιμοποιούν τα μείγματα νερού/βρωμιούχου λιθίου (H_2O/LiBr) και αμμωνίας/νερού (NH_3/H_2O). Επιπλέον, παρουσιάζονται εναλλακτικές επιλογές εργαζόμενων μέσων, με τις κυριότερες να αφορούν οργανικά, ανόργανα και ιοντικά ρευστά (ionic liquids). Μια βιβλιογραφική ανασκόπηση πάνω σε συστήματα ψύξης με απορρόφηση όταν αυτά χρησιμοποιούν διαφορετικά οργανικά μείγματα ως εργαζόμενα μέσα έχει δημοσιευτεί από τους Papadopoulos et al. [1]. Μεταξύ άλλων, παρατηρήθηκε πως οι υπάρχουσες μελέτες για την επιλογή εργαζόμενου ρευστού λαμβάνουν υπόψιν τους την απόδοση του συστήματος μόνο σε μόνιμη κατάσταση, ενώ αυτά αξιολογούνται κυρίως με βάση τον συντελεστή απόδοσης (Coefficient Of Performance-COP) και μερικούς ακόμα δείκτες, οι οποίοι αγνοούν την επίδραση που μπορεί να έχουν αναμενόμενες διαταραχές στην δυναμική απόδοση του συστήματος. Για αυτό τον λόγο, είναι απαραίτητο η αξιολόγηση του συστήματος ψύξης και η αξιολόγηση διαφορετικών εργαζόμενων μέσων, να γίνεται με βάση τόσο την απόδοση σε μόνιμη κατάσταση όσο και τη δυναμική λειτουργία του συστήματος.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η συστηματική αξιολόγηση οργανικών μειγμάτων ως εργαζόμενα μέσα σε συστήματα ψύξης με απορρόφηση με τη χρήση κριτηρίων που λαμβάνουν υπόψιν του την δυναμική επίδοση του συστήματος. Έτσι, εξετάζεται η δυναμική συμπεριφορά ενός συστήματος ψύξης με απορρόφηση μονής πλήρωσης (single effect ABR) στο οποίο εφαρμόζεται ένας βέλτιστος προβλεπτικός ελεγκτής (Model Predictive Controller-MPC) καθώς ο κύκλος χρησιμοποιεί διαφορετικά οργανικά ρευστά ως εργαζόμενα μέσα, με σκοπό την επιλογή του πιο κατάλληλου ρευστού. Η δυναμική απόδοση του κλειστού βρόχου αξιολογείται με βάση την ενέργεια και τους πόρους που καταναλώνονται, την ταχύτητα απόκρισης του συστήματος και την απόκλιση από το επιθυμητό σημείο λειτουργίας καθώς το σύστημα υπόκειται σε ένα συγκεκριμένο σενάριο διαταραχών, το οποίο περιλαμβάνει την ημερήσια διακύμανση της απαιτούμενης ψυκτικής ισχύος. Τα διαφορετικά οργανικά ρευστά έχουν επιλεγεί σε προηγούμενη μελέτη [2] με βάση την απόδοση τους σε μόνιμη κατάσταση. Στην συνέχεια, η δυναμική επίδοση κάθε εργαζόμενου μέσου εξετάζεται σε συνδυασμό με την απόδοση τους σε μόνιμη κατάσταση για την βέλτιστη επιλογή εργαζόμενου μέσου. Το τελικό αποτέλεσμα της προτεινόμενης μεθοδολογίας είναι ο προσδιορισμός εργαζόμενων μέσων τα οποία επιδεικνύουν χαμηλή ευαισθησία σε διαταραχές ενώ ταυτόχρονα είναι οικονομικά ανταγωνιστικά κατά την λειτουργία σε μόνιμη κατάσταση.

2. ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Με την προτεινόμενη μεθοδολογία πραγματοποιείται η συστηματική αξιολόγηση διαφορετικών ζευγών εργαζόμενου ρευστού-συστήματος ψύξη με απορρόφηση, όταν αυτά λειτουργούν κάτω από δυναμικά μεταβαλλόμενο περιβάλλον, με χρήση κριτηρίων που λαμβάνουν υπόψιν του την δυναμική επίδοση του συστήματος. Η μεθοδολογία αποτελείται από τα εξής βήματα:

1. Δημιουργία βάσης δεδομένων από οργανικά μείγματα (ψυκτικό και απορροφητικό μέσο).
2. Προσδιορισμός επιθυμητού σεναρίου διαταραχών και δεικτών αξιολόγησης δυναμικής συμπεριφοράς.
3. Εκτίμηση δυναμικής συμπεριφοράς για κάθε ζεύγος εργαζόμενου ρευστού-συστήματος ABR-σύστημα ελέγχου για κάθε υπό εξέταση μείγμα.
4. Προσδιορισμός βέλτιστου εργαζόμενου ρευστού με βάση τους δείκτες του βήματος 2, με τους οποίους πραγματοποιείται η ποσοτικοποίηση της δυναμικής συμπεριφοράς, καθώς και με βάση την επίδοση σε μόνιμη κατάσταση.

Τα υποψηφία εργαζόμενα ρευστά έχουν επιλεγεί από πηγές της βιβλιογραφίας, οι οποίες αναφέρουν είτε την πειραματική είτε τη θεωρητική απόδοση αυτών των μιγμάτων για τη διεργασία ψύξης με απορρόφηση [1]. Για κάθε ζεύγος εργαζόμενου ρευστού-συστήματος ABR, σχεδιάζετε ένας βέλτιστος προβλεπτικός ελεγκτής, προκειμένου να διατηρήσει τη λειτουργία του συστήματος εντός των προδιαγραφών παρά την επίδραση εξωγενών διαταραχών, αβεβαιοτήτων και διακυμάνσεων του φορτίου ψύξης. Στη συνέχεια αξιολογείται η δυναμική επίδοση του συστήματος κλειστού βρόχου με βάση τη χρήση πόρων για την αποκατάσταση των συνθηκών λειτουργίας, την ταχύτητα απόκρισης και την απόκλιση από το επιθυμητό σημείο αναφοράς, κάτω από την επίδραση ενός σεναρίου διαταραχής που περιλαμβάνει την ημερήσια διακύμανση της απαιτούμενης ψυκτικής ισχύος. Η δυναμική επίδοση περιγράφεται από δύο δείκτες, ο πρώτος περιγράφει την ικανότητα επίτευξης του επιθυμητού σημείου αναφοράς όπως αποτυπώνεται στην ταχύτητα απόκρισης και την συνολική απόκλιση από σημείο αναφοράς και ο δεύτερος περιγράφει την συνολική ποσότητα των πόρων που πρέπει να καταναλωθούν ώστε να επιτευχθεί ο στόχος ελέγχου. Το τελικό αποτέλεσμα της προτεινόμενης μεθοδολογίας είναι ο προσδιορισμός εργαζόμενων μέσων τα οποία επιδεικνύουν χαμηλή ευαισθησία σε διαταραχές ενώ ταυτόχρονα είναι οικονομικά ανταγωνιστικά κατά την λειτουργία σε μόνιμη κατάσταση. Το εμπορικά χρησιμοποιούμενο μείγμα NH_3/H_2O χρησιμοποιείται ως ρευστό αναφοράς για την αξιολόγηση των μειγμάτων.

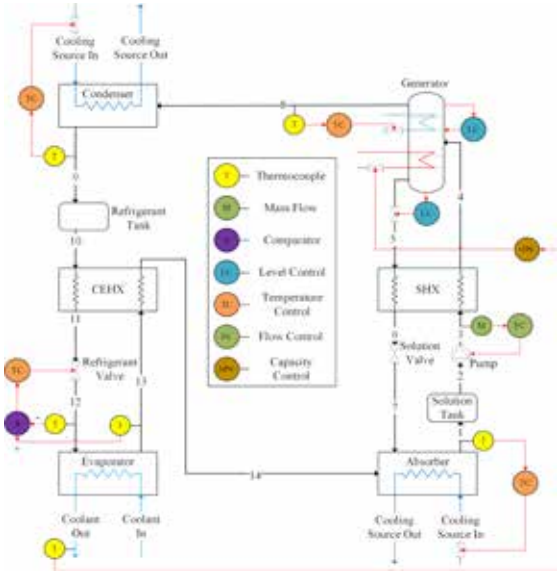
3. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΠΡΟΤΥΠΟΥ

Για την αξιολόγηση της δυναμικής συμπεριφοράς του συστήματος αναπτύχθηκε ένας αριθμός μαθηματικών προτύπων στο λογισμικό ASPEN Plus (προσομοίωση μόνιμης κατάστασης) και στο λογισμικό ASPEN Plus Dynamics (προσομοίωση δυναμικής συμπεριφοράς) [3]. Το συγκεκριμένο λογισμικό θεωρείται κατάλληλο για την προσομοίωση του συστήματος ABR με διαφορετικά ρευστά, καθώς περιέχει βάση δεδομένων με ένα πολύ μεγάλο αριθμό ρευστών καθώς και τις μεθόδους που απαιτούνται για τον υπολογισμό ιδιοτήτων τους. Όσον αφορά το μείγμα NH_3/H_2O, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ENRTL-HG, που χρησιμοποιεί την Redlich-Kwong [4] ως εξίσωση κατάστασης (ιδιότητες αέριας φάσης) και το μοντέλο NRTL (ιδιότητες υγρής φάσης) καθώς και το μοντέλο Helgeson [5] για τον ακριβή προσδιορισμό πρότυπων ιδιοτήτων (ενθαλπία, εντροπία, ενέργεια Gibbs, όγκος) του εκάστοτε μείγματος. Λαμβάνοντας υπόψιν την ανάλυση των Gkouletsos et al. [6], η συγκεκριμένη μέθοδος είναι η πλέον κατάλληλη επιλογή. Όσον αφορά τα οργανικά ρευστά, χρησιμοποιείται η μέθοδος UNIFAC [7] για τις ιδιότητες της υγρής φάσης και η εξίσωση κατάστασης Redlich-Kwong για τις ιδιότητες της αέριας φάσης.

3.1. Πρότυπο κύκλου απορρόφησης μονής πλήρωσης

Στην Εικόνα 1 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του κύκλου ABR μονής πλήρωσης μαζί με τη διάταξη ελέγχου. Ο κύκλος ABR αποτελείται από τέσσερα κύρια υποσυστήματα, έναν εξατμιστή (evaporator), έναν συμπυκνωτή (condenser), έναν απορροφητή (absorber) και έναν αναγεννητή (generator), καθώς και αρκετές βοηθητικές λειτουργικές μονάδες (αντλίες, βαλβίδες εκτόνωσης, εναλλάκτες θερμότητας και ανορθωτές/rectifiers). Στην παρούσα εργασία και για την προσομοίωση τόσο της διεργασίας αναγέννησης όσο και της διεργασίας ανόρθωσης, γίνετε χρήση μιας μόνο λειτουργικής μονάδας, της στήλης εκρόφησης. Σε αυτή, η βαθμίδα του αναβραστήρα (reboiler, παροχή εξωτερικής θερμότητας) λειτουργεί ως αναγεννητής, ενώ η βαθμίδα του συμπυκνωτή (condenser) μαζί με τις ενδιάμεσες βαθμίδες (column stages) λειτουργούν ως ανορθωτής. Οι ενδιάμεσες βαθμίδες επηρεάζουν την συμπεριφορά της διεργασία με δύο τρόπους. Πρώτον, καθώς ο αριθμός βαθμίδων αυξάνεται, αυξάνεται και η καθαρότητα του παραγόμενου ψυκτικού. Ωστόσο, η αύξηση των σταδίων σημαίνει και μεγαλύτερος εξοπλισμός, το οποίο ισοδυναμεί με υψηλότερο κόστος εξοπλισμού, και ταυτόχρονα αυξημένο χρόνο παραμονής και άρα με πιο αργή δυναμική απόκριση του συστήματος.

Από την άλλη πλευρά, επιπρόσθετα στάδια προσδίδουν ευελιξία στο σύστημα ελέγχου της διεργασίας.



Εικόνα 1: Διάγραμμα ροής και συνδεσμολογία συστήματος ελέγχου στο σύστημα ψύξης με απορρόφηση μονής πλήρωσης.

Οι βαλβίδες εκτόνωσης περιγράφονται από το μπλοκ Valve, όπου υπολογίζεται η πτώση πίεσης (αδιαβατική εκτόνωση). Η αντλία περιγράφεται από το μπλοκ Pump, όπου υπολογίζεται η απαιτούμενη ισχύς για μια προκαθορισμένη τιμή πίεσης εξόδου. Οι εναλλάκτες θερμότητας περιγράφονται από το μπλοκ MHeatX, ενναλάκτης απλής διέλευσης σε καθεστώς αντιρροής, το οποίο επιλέγεται λόγω της δυνατότητας που παρέχει στην ανάλυση ζωνών και της δυνατότητα να υπολογίζει την απαιτούμενη ενέργεια και τον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας. Ο αναγεννητής περιγράφεται από το μπλοκ στήλης εκρόφησης RadFrac, το οποίο χρησιμοποιεί ένα μοντέλο ισορροπίας (equilibrium model) για τον υπολογισμό της διφασικής (υγρού-αερίου) διεργασίας απόσταξης πολλαπλών σταδίων (multistage, two-phase vapor-liquid distillation operation).

Αναφορικά με τους εναλλάκτες θερμότητας, για την προσομοίωση της μόνιμης κατάστασης, χρησιμοποιούνται εξισώσεις ισοζυγίου ενέργειας για κάθε πλευρά (ζεστό, κρύο), ενώ για τη δυναμική προσομοίωση λαμβάνεται υπόψη η συσσώρευση (hold up) κάθε ροής. Αναφορικά με τη στήλη εκρόφησης, για τη δυναμική προσομοίωση λαμβάνονται υπόψη οι συσσωρεύσεις μάζας και ενέργειας και η θερμοδυναμική ισορροπία.

Κατά την εξαγωγή του μοντέλου δυναμικής λειτουργίας (ASPEN Plus Dynamics) από αυτό της μόνιμης κατάστασης (ASPEN Plus), χρησιμοποιείται η πιο ακριβής Pressure Driven προσέγγιση δυναμικής προσομοίωσης. Σε αυτή την προσέγγιση, η πίεση καθορίζεται στις ροές τροφοδοσίας και προϊόντων του διαγράμματος ροής, ενώ οι ενδιάμεσες ροές σχετίζονται με την πτώση πίεσης σε κάθε λειτουργική μονάδα.

Η επαλήθευση του δυναμικού μαθηματικού προτύπου που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία και παρουσιάζεται από τους Kyriakides et al. [8], έχει πραγματοποιηθεί έναντι πειραματικών αποτελεσμάτων που παρουσίασαν οι Goyal και Garimella [9]. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν, το μοντέλο παρουσιάζει εξαιρετική ικανότητα πρόβλεψης τόσο πολλαπλών νέων συνθηκών μόνιμης κατάστασης όσο και της δυναμικής απόκρισης του κύκλου.

3.2. Διάταξη ελέγχου: Διατήρηση απόδοσης κύκλου και έλεγχος ψυκτικής ισχύος

Στην παρούσα εργασία, η στρατηγική ελέγχου διαχωρίζεται σε δύο κατηγορίες, την διατήρηση της απόδοσης του κύκλου (performance optimization) και τον έλεγχο της ψυκτικής ισχύος (cooling

capacity). Η στρατηγική αποτελείται από πολλαπλούς βρόχους ανάδρασης εξοπλισμένους με ελεγκτές PI (proportional-integral) για την ρύθμιση της απόδοσης του συστήματος, καθώς και ένα βρόχο ανάδρασης με έναν βέλτιστο προβλεπτικό ελεγκτή (MPC) για την ρύθμιση της ψυκτικής ισχύος. Η πρώτη κατηγορία χρησιμεύει στην παρακολούθηση και ρύθμιση μεταβλητών που σχετίζονται άμεσα με την απόδοση αρκετών υποδιεργασιών του κύκλου και κατά συνέπεια με την βέλτιστη και ασφαλή λειτουργία του (διατήρηση βέλτιστα υπολογισμένων συνθηκών αναφοράς), ενώ η δεύτερη κατηγορία χρησιμεύει στην ρύθμιση της παρεχόμενης ψυκτικής ισχύος του κύκλου. Πιο συγκεκριμένα, η κατηγορία διατήρησης απόδοσης κύκλου αποτελείται από τρεις υποκατηγορίες ελεγκτών, συμπεριλαμβανομένων των ελεγκτών για την ρύθμιση θερμοκρασίας (είτε πρωτεύοντος ρευστού είτε διαφοράς θερμοκρασίας εισόδου-εξόδου), στάθμης (στην αναγεννητή, δοχεία drum και sump) και ροής (παροχή πυκνού διαλύματος). Η κατηγορία ελέγχου ψυκτική ισχύος, έχει ως χειραγωγούμενη μεταβλητή την εξωτερική παροχή θερμικής ενέργειας στον αναγεννητή. Η σχηματική απεικόνιση της προαναφερθείσας μεθοδολογίας ελέγχου παρουσιάζεται μαζί με το διάγραμμα ροής της διεργασίας στην Εικόνα 1.

Όσον αφορά τους ελεγκτές PI της κατηγορίας διατήρησης απόδοσης κύκλου, η δομή εισόδου-εξόδου καθορίστηκε με βάση την μέθοδο relative gain array (RGA) [10]. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν βηματικές μεταβολές σε κάθε χειραγωγούμενη μεταβλητή ξεχωριστά, ώστε να προσδιοριστούν τα χαρακτηριστικά του ανοικτού βρόχου και να προσδιοριστεί η συνάρτηση μεταφοράς πρώτης τάξης με καθυστέρηση χρόνου. Η ρύθμιση κάθε ελεγκτή πραγματοποιήθηκε με την μέθοδο direct synthesis approach, που δίνει προτεραιότητα στους αργούς βρόχους έναντι των γρήγορων [11], και θέτοντας τις απαιτήσεις στις χρονικές σταθερές του κλειστού βρόχου (μείωση 50 % στη σταθερά χρόνου του ανοιχτού βρόχου).

Ο βέλτιστος προβλεπτικός ελεγκτής υπολογίζει μια βέλτιστη δράση ελέγχου σε κάθε χρονικό διάστημα, με βάση μια αντικειμενική συνάρτηση που περιέχει όρους σχετικούς με την απόκλιση από το επιθυμητό σημείο αναφοράς και με την διαφοροποίηση των χειραγωγούμενων μεταβλητών. Ο MPC χρησιμοποιεί ένα γραμμικοποιημένο μαθηματικό μοντέλο της διεργασίας, που απαιτεί σημαντικά μικρότερο υπολογιστικό χρόνο για την επίλυση του, για την πρόβλεψη της απόκρισης του συστήματος. Η μαθηματική απεικόνιση του προβλήματος βελτιστοποίησης του ελεγκτή παρουσιάζεται στις εξισώσεις 1-4:

$$\min_{\Delta U}\left(\sum_{i=1}^{Np}\left(y_{sp}(k+i)-y(k+i)\right)^{T} Q\left(y_{sp}(k+i)-y(k+i)\right)+\sum_{i=1}^{Nc}\Delta u(k+i-1)^{T} R\Delta u(k+i-1)\right) \quad (1)$$

$$\overbrace{\begin{bmatrix}\Delta x_m(k+1)\\ y(k+1)\end{bmatrix}}^{x(k+1)}=\overbrace{\begin{bmatrix}A_m & 0_m\\ C_m A_m & 1\end{bmatrix}}^{A}\overbrace{\begin{bmatrix}\Delta x_m(k)\\ y(k)\end{bmatrix}}^{x(k)}+\overbrace{\begin{bmatrix}B_m\\ C_m B_m\end{bmatrix}}^{B}\Delta u_m(k) \quad (2)$$

$$y(k)=\overbrace{\begin{bmatrix}0_m & 1\end{bmatrix}}^{C}\overbrace{\begin{bmatrix}\Delta x_m(k)\\ y(k)\end{bmatrix}}^{x(k)} \quad (3)$$

$$\Delta u^{\min}\le\Delta u(k)\le\Delta u^{\max}, u^{\min}\le u(k)\le u^{\max}, y^{\min}\le y(k)\le y^{\max} \quad (4)$$

Όπου, y_{sp} είναι το επιθυμητό σημείο αναφοράς, Δu είναι το διάνυσμα του ρυθμού μεταβολής των χειραγωγούμενων μεταβλητών (παροχή θερμού δευτερεύοντος ρευστού στον αναβραστήρα της στήλης εκρόφησης), y είναι το διάνυσμα των ρυθμιζόμενων μεταβλητών (ψυκτική ισχύς κύκλου ABR) και x είναι το διάνυσμα των ανοιγμένων καταστάσεων του συστήματος. Np και Nc είναι το μέγεθος του ορίζοντα πρόβλεψης και ελέγχου, αντίστοιχα, και Q και R είναι κατάλληλα επιλεγμένοι πίνακες βαρύτητας. Επίσης, το χρονικό βήμα είναι ίσο με Ts=30 s. Ο MPC χρησιμοποιεί δυναμικό μοντέλο στον χώρο των καταστάσεων, όπως περιγράφεται από τον Wang [12], όπου το σύστημα περιγράφεται από ένα γραμμικό, διακριτό, χρονικά μη-μεταβαλλόμενο δυναμικό μοντέλο.

4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ

4.1. Εργαζόμενα ρευστά υπό διερεύνηση

Το σύνολο των εργαζόμενων ρευστών που αξιολογούνται στην παρούσα εργασία για την διεργασία ABR παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Τα ρευστά που έχουν επιλεγεί ως ψυκτικά είναι η ακεταλδεΰδη, η προπιοναλδεΰδη και το μεθυλεστέρας. Επιπλέον, τα ρευστά που έχουν επιλεγεί ως απορροφητικά μέσα είναι δύο αλειφατικοί υδρογονάνθρακες από την ομάδα των αμιδίων (DMF, N,N-διμεθυλφορμαμίδιο; NMP, N-μεθυλ-2-πυρρολιδόνη), δημιουργώντας έτσι ένα συνολικό αριθμό πέντε υπό μελέτη διαφορετικών εργαζόμενων μέσων. Τα υποψηφία μείγματα έχουν επιλεγεί από πηγές της βιβλιογραφίας, οι οποίες αναφέρουν είτε την πειραματική είτε τη θεωρητική απόδοση αυτών για τη διαδικασία ψύξης με απορρόφηση [1].

Πίνακας 1: Υποψήφια μείγματα εργαζόμενων ρευστών.

Α/Α εργαζόμενου ρευστού	Ψυκτικό	Απορροφητικό
1	NH_3	H_2O
2	Ακεταλδεΰδη	DMF
3	Προπιοναλδεΰδη	NMP
4	Ακεταλδεΰδη	NMP
5	Μεθυλεστέρας	NMP

Τα υποψήφια ρευστά έχουν υποβληθεί σε ανάλυση ευαισθησίας σε προηγούμενη μελέτη [2] και αξιολογήθηκαν με βάση την απόδοση τους σε μόνιμη κατάσταση (COP και n_{stage}-αριθμός βαθμίδων αναγεννητή, μεταξύ άλλων). Ένας σημαντικός αριθμός λειτουργικών και σχεδιαστικών παραμέτρων (π.χ. μεγάλη πίεση, συγκέντρωση και παροχή πυκνού διαλείμματος, λόγος αποστάγματος προς τροφοδοσία, κ.α.) μεταβλήθηκαν, για μια περίπτωση σταθερής παροχής ενέργειας στον αναγεννητή (4530,05 kW) και επιθυμητής θερμοκρασίας ψύξης ίση με 10 ^oC. Οι τιμές των δύο κριτηρίων (COP και n_{stage}) για κάθε ένα από τα υποψήφια μείγματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.

4.2. Σενάριο διαταραχών και δείκτες αξιολόγησης δυναμικής συμπεριφοράς

Η αξιολόγηση κάθε μείγματος πραγματοποιείται μέσα από την δυναμική προσομοίωση του συστήματος ABR καθώς σε αυτό εφαρμόζεται ένα σενάριο ημερήσιας διαφοροποίησης της απαιτούμενης ψυκτικής ισχύος. Στην Εικόνα 2α, παρουσιάζεται η απόκριση του κλειστού βρόχου του συστήματος ABR με NH_3/H_2O ως εργαζόμενο ρευστό. Το σενάριο διαφοροποίησης της απαιτούμενης ψυκτικής ισχύος αποτελείται από ένα αριθμό τόσο θετικών όσο και αρνητικών μεταβολών (5 %), αρχής γενομένης από την ονομαστική μέγιστη ψυκτική ισχύ του κύκλου, ενώ η κατώτατη τιμή της απαίτηση φτάνει το 75 % της ονομαστικής. Για όλα τα μείγματα, η παροχή ενέργειας στον αναγεννητή (κόκκινη συνεχής γραμμή, αριστερός άξονας) είναι η χειραγωγούμενη μεταβλητή (έμμεσα μέσω της παροχής του δευτερεύοντος ρευστού), η ψυκτική ισχύς (μπλε συνεχόμενη γραμμή, δεξιός άξονας) είναι η ελεγχόμενη μεταβλητή, ενώ το επιθυμητό σημείο αναφοράς ψυκτικής ισχύος παρουσιάζεται με μαύρη διακεκομμένη γραμμή (δεξιός άξονας). Το ίδιο σενάριο προσομοιώνεται για όλα τα υποψήφια μείγματα και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις Εικόνες 2β-2ε, αντίστοιχα.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι δύο διαφορετικοί δείκτες με βάση τους οποίους πραγματοποιήθηκε η αξιολόγηση της δυναμικής συμπεριφοράς των υποψήφιων μειγμάτων. Ο πρώτος δείκτης, που αφορά στην δυναμική ικανότητα επίτευξης του επιθυμητού σημείου αναφοράς, περιγράφεται από την εξίσωση 5:

$$Index1 = \sum_{i=1}^{Nt} abs\left(Q_{evap,i} - Q_{evap,\mathrm{sp},i}\right) \tag{5}$$

όπου: *Nt* είναι ο αριθμός διακριτών χρονικών διαστημάτων της προσομοίωσης, $Q_{evap,i}$ είναι η τιμή της ψυκτικής ισχύος, και $Q_{evap,sp,i}$ είναι η τιμή του επιθυμητού σημείου αναφοράς. Πιο συγκεκριμένα, ο πρώτος δείκτης ποσοτικοποιεί την ταχύτητα απόκρισης αλλά και την απόκλιση της απόκρισης του συστήματος από το επιθυμητό σημείο αναφοράς. Όσο μικρότερη η τιμή του δείκτη, τόσο πιο γρήγορη η απόκριση του συστήματος ενώ αναμένεται να παρουσιάζει και μικρότερες διακυμάνσεις. Το δεύτερο κριτήριο, που αφορά την χρήση πόρων, περιγράφεται από την εξίσωση 6:

$$Index2 = \sum_{i=1}^{Nt} abs\left(Q_{\text{gen},i} - Q_{\text{gen,sp},i}\right) + \sum_{j=1}^{Nhx}\sum_{i=1}^{Nt} abs\left(F_{\text{aux},i,j} - F_{\text{aux,sp},i,j}\right) \quad (6)$$

όπου: $Q_{gen,i}$ είναι η τιμή της εξωτερικά παρεχόμενης ενέργειας στον αναγεννητή, $Q_{gen,sp,i}$ είναι η τιμή της αναμενόμενης εξωτερικά παρεχόμενης ενέργειας στον αναγεννητή για την εκάστοτε απαιτούμενη ψυκτική ισχύ, *Nhx* είναι ο αριθμός των εναλλακτών θερμότητας που χρησιμοποιούν βοηθητικές παροχές (απορροφητής, συμπυκνωτής και συμπυκνωτής στη στήλη εκρόφησης), $F_{aux,i,j}$ είναι η παροχή δευτερεύοντος ρευστού, $F_{aux,i,j}$ είναι η αναμενόμενη παροχή δευτερεύοντος ρευστού για την εκάστοτε απαιτούμενη ψυκτική ισχύ. Πιο συγκεκριμένα, ο δεύτερος δείκτης ποσοτικοποιεί την απόκλιση των βοηθητικών παροχών από την αναμενόμενη τιμή τους με βάση την εκάστοτε νέα απαιτούμενη ψυκτική ισχύ. Η παροχή ενέργεια στον αναγεννητή τροποποιείται μέσω της παροχής του δευτερεύοντος ρευστού (πραγματικά χειραγωγούμενη μεταβλητή στον βρόχο ελέγχου ψυκτικής ισχύος), ενώ η παροχή δευτερευόντων ρευστών στους εναλλάκτες θερμότητας είναι οι χειραγωγούμενες μεταβλητές στην κατηγορία διατήρησης απόδοσης. Έτσι, ο δεύτερος δείκτης λαμβάνει υπόψη του την προσπάθεια που πρέπει να καταβάλουν οι ελεγκτές ώστε να διατηρήσουν το σύστημα στο βέλτιστα σχεδιασμένο σημείο λειτουργίας του καθώς προσπαθούν να ικανοποιήσουν την επιθυμητή απαιτούμενη ψυκτική ισχύ.

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Οι τιμές των δύο δεικτών δυναμικής επίδοσης όπως υπολογίστηκαν για κάθε ένα εξεταζόμενο εργαζόμενο ρευστό παρουσιάζονται στον Πίνακα 2, μαζί με το COP και n_{stage}, δύο αποτελέσματα από την ανάλυση μόνιμης κατάστασης. Συνολικά, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η στρατηγική ελέγχου που χρησιμοποιήθηκε έχει την ικανότητα να αντισταθμίζει τις διαταραχές, παρουσιάζοντας ικανοποιητικά αποτελέσματα στην ικανότητα επίτευξης του επιθυμητού σημείου αναφοράς (Index 1) για όλα τα μείγματα, αν και μια μικρή απόκλιση εμφανίζεται κυρίως στην περιοχή μακριά από την ονομαστική, μέγιστη ψυκτική ισχύ.

Πίνακας 2: Υποψήφια εργαζόμενα ρευστά και τιμές δεικτών αξιολόγησης δυναμικής συμπεριφοράς, αριθμός βαθμίδων (n_{stage}) στον ανορθωτή και COP από τις προσομοιώσεις μόνιμης κατάστασης.

Α/Α εργαζόμενου ρευστού	Index 1	Index 2	Μόνιμη κατάσταση	
			COP	n_{stage}
1	109.77	197.78	0.74	3
2	104.77	115.00	0.68	2
3	239.28	1303.52	0.69	3
4	154.53	598.24	0.83	5
5	214.59	207.25	0.62	4

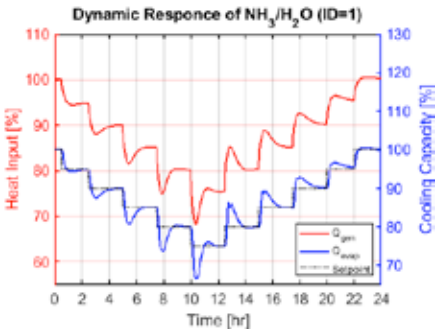
Στον Πίνακα 3 απεικονίζεται η ταξινόμηση των ρευστών με βάση τους δύο δείκτες δυναμικής επίδοσης και με βάση το COP (βασικό κριτήριο επιλογής ρευστού στην ανάλυση μόνιμης κατάστασης). Το μείγμα αναφοράς NH_3/H_2O (ID=1) παρουσιάζει καλή δυναμική συμπεριφορά. Πιο συγκεκριμένα, φαίνεται πως έχει τη δεύτερη μικρότερη τιμή Index 1, η οποία σχετίζεται με την ικανότητα επίτευξης του επιθυμητού σημείου αναφοράς, αλλά η τιμή του δείκτη είναι πολύ κοντά σε αυτή του ρευστού με την καλύτερη τιμή (ακεταλδεϋδη/DMF, ID=2). Ταυτόχρονα, το μείγμα NH_3/H_2O παρουσιάζει τη δεύτερη μικρότερη τιμή Index 2, η οποία σχετίζεται με τη χρήση πόρων. Από την άλλη πλευρά, το ρευστό ακεταλδεϋδη/DMF (ID=2), παρουσιάζει την καλύτερη ικανότητα επίτευξης του επιθυμητού σημείου αναφοράς, ενώ το ρευστό προπιοναλδεϋδη/NMP (ID=3) παρουσιάζει τη χειρότερη επίδοση στον πρώτο δείκτη. Το ρευστό προπιοναλδεϋδη/NMP (ID=3) παρουσιάζει επίσης τη χειρότερη επίδοση στη χρήση ενεργειακών πόρων. Τέλος, το μείγμα NH_3/H_2O (ID=1) είναι η δεύτερη καλύτερη επιλογή από άποψη COP, μετά το μείγμα ακεταλδεϋδη/NMP (ID=4) που παρουσιάζει όμως, την τρίτη και τέταρτη καλύτερη δυναμική επίδοση στους δύο δείκτες δυναμικής επίδοσης, αντίστοιχα.

Πίνακας 3: Κατάταξη υποψήφιων μειγμάτων με βάση τον πρώτο δείκτη (Index 1), τον δεύτερο δείκτη (Index 2) και με βάση το COP. Το καλύτερο ρευστό παρουσιάζεται πρώτο.

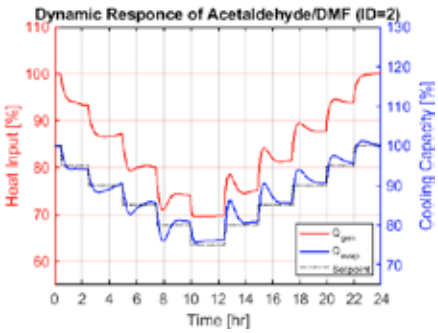
Index 1	Index 2	COP (μόνιμη κατάσταση)
Ακεταλδεΰδη/DMF	Ακεταλδεΰδη/DMF	Ακεταλδεΰδη/NMP
NH_3/H_2O	NH_3/H_2O	NH_3/H_2O
Ακεταλδεΰδη/NMP	Μεθυλεστέρας/NMP	Προπιοναλδεΰδη/NMP
Μεθυλεστέρας/NMP	Ακεταλδεΰδη/NMP	Ακεταλδεΰδη/DMF
Προπιοναλδεΰδη/NMP	Προπιοναλδεΰδη/NMP	Μεθυλεστέρας/NMP

Η αξιολόγηση κάθε εργαζόμενου μέσου πραγματοποιήθηκε μέσω της δυναμικής προσομοίωσης του ζεύγους ρευστού-συστήματος ABR υπό την επίδραση ενός σεναρίου ημερήσιας διακύμανσης της ζήτησης σε ψυκτική ισχύ. Στην Εικόνα 2, παρουσιάζεται η απόκριση κλειστού βρόχου του κάθε ζεύγους, για όλα τα υπό εξέταση μείγματα. Όπως αναμενόταν, με βάση τις τιμές του Index 1 (βλ. Πίνακα 2), τα μείγματα 1 και 2 παρουσιάζουν καλύτερη ικανότητα επίτευξης επιθυμητού σημείου αναφοράς σε σύγκριση με το 4 και πολύ καλύτερη σε σύγκριση με τα 3 και 5. Η νέα ζήτηση σε ψυκτική ισχύ (δεξιός άξονας) ικανοποιείται σχετικά γρήγορα ενώ ταυτόχρονα παρατηρούνται μόνο μικρές αποκλίσεις. Από την άλλη πλευρά, τα εργαζόμενα μέσα 3 και 5 (οι χειρότερες περιπτώσεις με βάση το Index 1) φαίνεται να παρουσιάζουν υψηλότερη υπερύψωση και μεγαλύτερο χρόνο αποκατάστασης. Παρομοίως, και με βάση τον Index 2, στο εργαζόμενο μέσο 3 η χειραγωγούμενη μεταβλητή (αριστερός άξονας) παρουσιάζει ταλαντωτική συμπεριφορά και ως αποτέλεσμα η δυναμική απόκριση του συστήματος έχει χαρακτηριστεί ως μη αποδεκτή αναφορικά με τη χρήση πόρων.

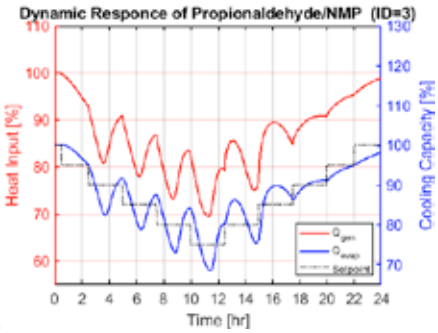
α)



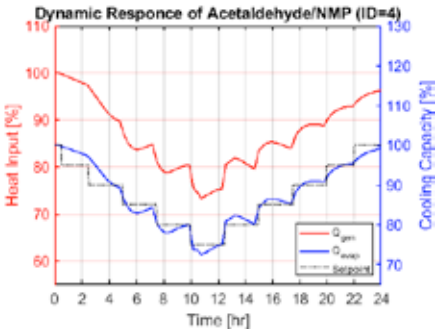
β)



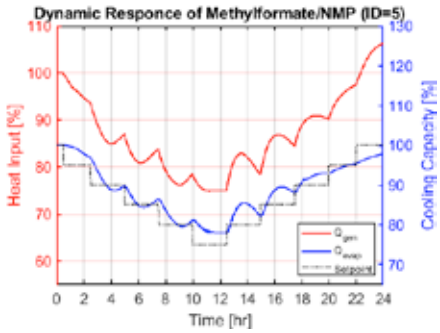
γ)



δ)



ε)



Εικόνα 2: Δυναμική απόκριση του συστήματος ABR για τα εργαζόμενα μέσα 1 έως 5, αντίστοιχα. Προδιδόμενη ενέργεια στον αναγεννητή (άμεσα επηρεαζόμενη από την χειραγωγούμενη μεταβλητή, παροχή θερμού δευτερευόντως ρευστού), ψυκτική ισχύς (ρυθμιζόμενη μεταβλητή) και επιθυμητό σημείο αναφοράς.

Με βάση τα αποτελέσματα των δύο δεικτών αξιολόγησης δυναμικής συμπεριφοράς (ικανότητα επίτευξης σημείου αναφοράς και χρήση πόρων), το εργαζόμενο μέσο με την καλύτερη επίδοση είναι το μείγμα ακεταλδεϋδης/ν,ν-διμεθυλφορμαμίδιου (acetaldehyde/DMF). Το μείγμα αναφοράς, NH_3/H_2O, το οποίο διατίθεται στο εμπόριο, παρουσιάζει καλή επίδοση και στους δύο δείκτες. Πιο συγκεκριμένα, είναι το δεύτερο καλύτερο στην ικανότητα επίτευξης επιθυμητού σημείου αναφοράς και το δεύτερο καλύτερο στη χρήση πόρων. Ωστόσο, όταν πρόκειται για λειτουργία σε μόνιμη κατάσταση, το μείγμα NH_3/H_2O είναι δεύτερο μετά από το μείγμα ακεταλδεϋδης/NMP.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία, πραγματοποιήθηκε η αξιολόγηση εναλλακτικών μειγμάτων για χρήση ως εργαζόμενα μέσα στο σύστημα ψύξης με απορρόφηση. Η αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε μέσω μιας συστηματικής προσέγγισης που αξιοποιεί τη δυναμική προσομοίωση του κλειστού βρόχου του συστήματος για κάθε ένα από τα υπό μελέτη μείγματα. Οι διεργασίες αναγέννησης και ανόρθωσης (generation και rectification) μοντελοποιήθηκαν ως μια λειτουργική μονάδα, την στήλη εκρόφησης, που αναφέρεται ως η κατάλληλη επιλογή σε προηγούμενες εργασίες. Κατά την δυναμική προσομοίωση, στο σύστημα υποβάλλεται σε ένα σενάριο ημερήσιας διακύμανσης της απαίτησης σε ψυκτική ισχύ, ενώ για τον έλεγχο της διεργασίας υλοποιήθηκε μια στρατηγική ελέγχου που χωρίζεται σε δύο κατηγορίες και περιλαμβάνει πολλαπλούς PI και έναν MPC για την αντιστάθμιση των επιπτώσεων των διαταραχών. Στη συνέχεια αξιολογήθηκε η δυναμική επίδοση του συστήματος κλειστού βρόχου με βάση τη χρήση πόρων, την ταχύτητα απόκρισης, την απόκλιση από το επιθυμητό σημείο αναφοράς και την τιμή COP (ανάλυση μόνιμης κατάστασης). Το τελικό αποτέλεσμα της προτεινόμενης μεθοδολογίας είναι ο προσδιορισμός των εργαζόμενων μέσων που παρουσιάζουν χαμηλή ευαισθησία στη δυναμική μεταβλητότητα σε σύγκριση με το εμπορικά διαθέσιμο μείγμα αναφοράς (NH_3/H_2O). Παρατηρήθηκε ότι το μείγμα ακεταλδεϋδης/ν,ν-διμεθυλφορμαμίδιου (acetaldehyde/DMF) παρουσιάζει καλές δυναμικές επιδόσεις, καθώς αποδίδει καλύτερα τόσο στον δείκτη ικανότητας επίτευξης επιθυμητού σημείου αναφοράς όσο και στον δείκτη χρησιμοποίησης πόρων.

Πιθανή προέκταση της παρούσας εργασίας είναι η ολιστική αξιολόγηση τόσο της επίδοσης σε μόνιμη κατάσταση όσο και της δυναμικής συμπεριφοράς κάτω από ένα ενιαίο πλαίσιο, καθώς και η διεύρυνση των πιθανών υπό μελέτη σεναρίων διαταραχών και της βάσης δεδομένων ενναλακτικών εργαζόμενων μέσων. Η ολιστική αξιολόγηση περισσότερων εργαζόμενων μέσων, εναλλακτικών ψυκτικών κύκλων και διατάξεων ελέγχου, κάτω από την επίδραση ενός πιο ρεαλιστικού σεναρίου ψυκτικής απαίτησης, καθώς και η πιο αναλυτική απεικόνιση των οικονομικών δεδομένων της λειτουργία τόσο σε μόνιμη κατάσταση (πάγιο κόστος) όσο και σε δυναμική λειτουργία (optimal scheduling - λειτουργικό κόστος) του συστήματος, είναι το επόμενο βήμα της παρούσας εργασίας.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

This paper was made possible by an NPRP award [#NPRP10-1215-160030] from the Qatar National Research Fund (a member of The Qatar Foundation). The statements made herein are solely the responsibility of the authors.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Papadopoulos, A. I., Kyriakides, A.-S., Seferlis, P., and Hassan, I., 2019, "Absorption refrigeration processes with organic working fluid mixtures- a review," Renew. Sustain. Energy Rev., 109, pp. 239–270.

[2] Papadopoulos, A. I., Gkouletsos, D., Champilomatis, V., Giannakakis, A., Hassan, I., and Seferlis, P., 2020, "Systematic assessment of working fluid mixtures for absorption refrigeration based on techno-economic, environmental, health and safety performance," Energy Convers. Manag., 223, p. 113262.

[3] "AspenTech, AspenPlus Software," 2019. [Online]. Available: https://www.aspentech.com/.

[4] Redlich, O., and Kwong, J. N. S., 1949, "On the Thermodynamics of Solutions. V. An Equation of State. Fugacities of Gaseous Solutions," Chem. Rev., 44, pp. 233–244.

[5] Helgeson, H. C., and Kirkham, D. H., 1974, "Theoretical prediction of the thermodynamic behavior of aqueous electrolytes at high pressures and temperatures: I. Summary of the thermodynamic/electrostatic properties of the solvent," American Journal of Science, 274, pp. 1089–1198.

[6] Gkouletsos, D., Papadopoulos, A. I., Seferlis, P., and Hassan, I., 2019, "Systematic modeling under uncertainty of single, double and triple effect absorption refrigeration processes," Energy, 183, pp. 262–278.

[7] Fredenslund, A., Jones, R. L., and Prausnitz, J. M., 1975, "Group-contribution estimation of activity coefficients in nonideal liquid mixtures," AIChE J., 21, pp. 1086–1099.

[8] Kyriakides, A.-S., Papadopoulos, A. I., Seferlis, P., and Hassan, I., 2020, "Dynamic modelling and control of single, double and triple effect absorption refrigeration cycles," Energy, 210, p. 118529.

[9] Goyal, A., and Garimella, S., 2018, "Multivariable feedback control of small-capacity ammonia-water absorption systems," Energy Convers. Manag., 191, pp. 159–173.

[10] Bristol, E. H., 1966, "On a new measure of interaction for multivariable process control," IEEE Trans. Automat. Contr., 11, pp. 133–134.

[11] Smith, C. A., and Corripio, A. B., 2005, Principles and practices of automatic process control, 3rd Edition. John Wiley & Sons.

[12] Wang, L., 2009, Model Predictive Control System Design and Implementation using MATLAB®, Springer Science & Business Media, London, UK.

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΕΥΕΛΙΞΙΑΣ ΤΩΝ ΚΤΙΡΙΩΝ

Γεώργιος Χαντζής [1*], Παναγιώτα Αντωνιάδου [1], Μαρία Συμεωνίδου [1] Ευφροσύνη Γιαμά [1], Συμεών Οξυζίδης [1], Διονυσία Κολοκοτσά [2], Άγις Μ. Παπαδόπουλος [1]

[1] Εργαστήριο Κατασκευής Συσκευών Διεργασιών, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη,
[2] Εργαστήριο Δομημένου Περιβάλλοντος και Διαχείρισης Ενέργειας, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά,
e-mail: chantzis@auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο μεγάλος ρυθμός διείσδυσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας οδηγεί σε προκλήσεις στον σχεδιασμό και τον έλεγχο της παραγωγής, μετάδοσης και διανομής ενέργειας. Μια πιθανή λύση βρίσκεται στην αλλαγή από την παραδοσιακή διαχείριση της προσφοράς, στην διαχείριση της ζήτησης. Τα κτίρια αποτελούν καλούς υποψηφίους για την εφαρμογή ενός μοντέλου ελέγχου της ζήτησης, αφού αντιπροσωπεύουν περίπου το 39% της χρήσης τελικής ενέργειας στον κόσμο, ενώ επιπροσθέτως είναι σταθερά συνδεδεμένα με όλα τα δίκτυα υποδομών, σε αντιδιαστολή με τα οχήματα. Αντιλαμβανόμαστε λοιπόν τις δυνατότητες που απορρέουν από την χρήση των κτιρίων ως «παικτών» για παροχή ενεργειακής ευελιξίας στα δίκτυα.

Τις τελευταίες δεκαετίες, σημειώθηκε σημαντική βελτίωση της θερμικής απόδοσης του κελύφους και της ενεργειακής απόδοσης των συστημάτων θέρμανσης-ψύξης-κλιματισμού σε νεόκτιστα και ανακαινισμένα κτίρια. Ωστόσο, παρά την μείωση των ενεργειακών απαιτήσεων για τον κλιματισμό τους, τα κτίρια συνεχίζουν να αποτελούν παθητικούς τελικούς χρήστες του ενεργειακού συστήματος. Προκειμένου να βεβαιωθούμε ότι θα μπορούν να παρέχουν την απαραίτητη ενεργειακή ευελιξία για την εξισορρόπηση της διαλείπουσας παραγωγής ενέργειας, ένα πρώτο βήμα αποτελεί η εδραίωση ενός επίσημου, με βάση πρότυπα, και ισχυρού, ως προς την εφαρμογή, χαρακτηρισμού της ενεργειακής ευελιξίας από την πλευρά της ζήτησης.

Η ενεργειακή ευελιξία μπορεί να συνεισφέρει στην αποφυγή της ανάγκης υπερβολικής παραγωγής ενέργειας, την αύξηση της σταθερότητας των δικτύων, την ελαχιστοποίηση των προβλημάτων συμφόρησής τους και την ενίσχυση της ενεργειακής και οικονομικής αποδοτικότητας της χρήσης τους. Τα κτίρια μπορούν να παρέχουν υπηρεσίες ευελιξίας με διάφορους τρόπους όπως, αξιοποίηση της θερμικής μάζας, προσαρμογή της χρήσης του συστήματος Θέρμανσης-Αερισμού-Κλιματισμού, φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων και μετατόπιση φορτίων, μέσω τοπικής αποθήκευσης ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας. Ωστόσο, προς το παρόν δεν υπάρχει ποσοτικοποιημένη εικόνα του μεγέθους της ευελιξίας που μπορεί να προσφέρει ένα κτίριο στα μελλοντικά ενεργειακά συστήματα.

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας, θα παρουσιαστεί μια επισκόπηση της βιβλιογραφίας που σχετίζεται με την ενεργειακή ευελιξία των κτιρίων του τριτογενούς τομέα. Γίνεται μια εισαγωγή στην έννοια της ενεργειακής ευελιξίας των κτιρίων και παρουσιάζονται μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό και την αξιολόγησή της.

Λέξεις Κλειδιά: *Διαδραστικά κτίρια, Ενεργειακή ευελιξία, Διαχείριση της ζήτησης, Ενεργειακή απόδοση κτιρίων, Συστήματα ενεργειακής διαχείρισης*

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αυξανόμενη παγκόσμια ζήτηση ενέργειας τις τελευταίες δεκαετίες, οι προβλέψεις για μείωση των διαθέσιμων ορυκτών καυσίμων και η ένδειξη για αύξηση της υπερθέρμανσης του πλανήτη, έχουν οδηγήσει στην αύξηση του ερευνητικού ενδιαφέροντος προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ).

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή επιθυμεί η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) να ηγηθεί της μετάβασης στην καθαρή ενέργεια και όχι απλά να προσαρμοστεί σε αυτήν [1], [2]. Για τον λόγο αυτό, έχει δεσμευτεί να μειώσει τις εκπομπές CO_2 κατά τουλάχιστον 40% έως το 2030, εκσυγχρονίζοντας την οικονομία της και δημιουργώντας ευκαιρίες ανάπτυξης για όλους τους ευρωπαίους πολίτες [1]. Κύριοι στόχοι προς αυτήν την κατεύθυνση είναι, η συνεχής βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης, η επίτευξη παγκόσμιας ηγεσίας στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας [2] και η παροχή δίκαιων όρων προμήθειας ενέργειας στους καταναλωτές [1].

Οι καταναλωτές αναμένεται να αποτελέσουν ενεργούς «παίκτες» στις μελλοντικές αγορές ενέργειας καθώς θα μπορούν να επιλέξουν από μία πληθώρα ενεργειακών παρόχων, θα έχουν πρόσβαση σε αξιόπιστα εργαλεία σύγκρισης τιμών ενέργειας και την δυνατότητα παραγωγής και πώλησης της δικής τους ηλεκτρικής ενέργειας. Η αναθεώρηση της Ευρωπαϊκής οδηγίας που σχετίζεται με την Ενεργειακή Απόδοση των Κτιρίων το 2018, στοχεύει στην περαιτέρω προώθηση τεχνολογιών έξυπνων κτιρίων [3]. Στην επίτευξη αυτού του στόχου σημαντικό ρόλο αναμένεται να διαδραματίσει η καθιέρωση ενός Δείκτη Ευφυούς Ετοιμότητας (SRI) για τα κτίρια [3].

Ο δείκτης θα επιτρέψει την αξιολόγηση της ευφυούς ετοιμότητας των κτιρίων, δηλαδή τη δυνατότητα των κτιρίων να προσαρμόζουν τη λειτουργία τους ανάλογα με τις ανάγκες των χρηστών, φροντίζοντας ταυτόχρονα να βελτιστοποιείται η ενεργειακή, αλλά και η συνολική τους απόδοση. Τα κτίρια πλέον θα μπορούν να μεταβάλλουν τη λειτουργία τους παίρνοντας ερεθίσματα από το δίκτυο. Η δυνατότητα αυτή των κτιρίων να προσαρμόζουν τη λειτουργία τους σύμφωνα με τις ανάγκες τόσο των χρηστών ενός κτιρίου (πλευρά της ζήτησης), όσο και με τις ανάγκες και το δυναμικό του δικτύου (πλευρά της παραγωγής), θέτουν τη βάση για τη δημιουργία και την εξέλιξη των ενεργειακά ευέλικτων κτιρίων. Για την εδραίωση τεχνολογιών αυτοματισμού και ενεργειακής παρακολούθησης πρέπει να δοθεί έμφαση στην ενημέρωση των χρηστών σχετικά με την εξοικονόμηση ενέργειας και την συνεπαγόμενη μείωση του κόστους λειτουργίας, που απορρέουν από την εγκατάσταση τους.

Τον Αύγουστο του 2018 διεξήχθη μία πρώτη τεχνική μελέτη που είχε σκοπό την υποστήριξη της προώθησης και εδραίωσης αυτού του δείκτη. Η έρευνα προσπάθησε να ερευνήσει τον σκοπό και τα χαρακτηριστικά που πρέπει να έχει ένας τέτοιος δείκτης [4]. Μία δεύτερη μελέτη που ξεκίνησε τον Ιανουάριο του 2019, είχε ως στόχο να παρέχει περισσότερες τεχνικές πληροφορίες για την οριστική περιγραφή του. Η μελέτη αυτή βασίστηκε στα αποτελέσματα της πρώτης και προσπάθησε να δώσει έναν σαφή ορισμό του δείκτη, καθώς και της μεθοδολογίας υπολογισμού του. Ταυτόχρονα έγιναν τα πρώτα βήματα, όσον αφορά τον καθορισμό των τεχνικών που θα χρησιμοποιηθούν για την ενσωμάτωση του, την εγκατάσταση των απαιτούμενων συστημάτων και την αξιολόγηση της λειτουργίας τους [5].

Πηγές ενέργειας όπως η αιολική και η ηλιακή, χαρακτηρίζονται από υψηλή μεταβλητότητα. Η μεταβλητότητα αυτή είναι σε θέση να επηρεάσει τη σταθερότητα των ενεργειακών δικτύων, σε περίπτωση που οι ΑΠΕ αποκτήσουν ηγετικό ρόλο στην κάλυψη της ζήτησης φορτίου [6]. Ως εκ τούτου, η μελλοντικά υψηλή διείσδυση ΑΠΕ, προάγει τη μετάβαση από την παραδοσιακή διαχείριση της παραγωγής, στην διαχείριση της ζήτησης. Πρακτικά, λοιπόν, η κατανάλωση ενέργειας πρέπει να γίνει ευέλικτη για την διατήρηση της σταθερότητας των δικτύων. Τα κτίρια αναμένεται να παίξουν σημαντικό ρόλο σε αυτήν τη μετάβαση. Οι καταναλωτές (μεμονωμένα κτίρια ή συστάδες κτιρίων) γίνονται ενεργειακά ευέλικτοι για να ικανοποιήσουν τις ανάγκες των ενεργειακών δικτύων. Προς αυτήν την κατεύθυνση καθοριστικό ρόλο αναμένεται να κατέχει η ενεργειακή ευελιξία που μπορούν να προσφέρουν [6].

Η ενεργειακή ευελιξία ενός κτιρίου είναι η ικανότητα του να διαχειρίζεται την ζήτηση και την παραγωγή του σύμφωνα με τις τοπικές κλιματικές συνθήκες, τις ανάγκες των χρηστών και τις απαιτήσεις του δικτύου [7].

Γενικότερα το δυναμικό της ευελιξίας χρησιμοποιείται κυρίως με σκοπό τη μείωση του κόστους ενέργειας ή του κόστους αγοράς ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας από τα δίκτυα ενέργειας, την αύξηση της διείσδυσης των ΑΠΕ στα δίκτυα διανομής, ή την ανάπτυξη της ικανότητας σε πραγματικό χρόνο εξίσωσης της παραγωγής και της ζήτησης με σκοπό την διατήρηση της σταθερότητας του

δικτύου [8]. Γι' αυτό τον λόγο η ενεργειακή ευελιξία μπορεί να εκφραστεί ως η ισχύς ή/και η ενέργεια που μπορεί να μεταβληθεί σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, ως αντίδραση σε κάποιο εξωτερικό ερέθισμα, χωρίς να καταστρατηγείται η άνεση του εσωτερικού περιβάλλοντος [9]. Η βασική πρόκληση κατά τον χαρακτηρισμό της ευελιξίας είναι η εύρεση ενός πρότυπου τρόπου περιγραφής της μορφής που μπορούν να πάρουν αυτές οι μεταβολές ενέργειας ή/και ισχύος [9]. Κατά την περιγραφή πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι βασικοί στόχοι, οι περιορισμοί, καθώς και οι βέλτιστες στρατηγικές ελέγχου. Η ευελιξία μπορεί να οριστεί ως η μεταβολή ισχύος που πραγματοποιείται για ορισμένο χρονικό διάστημα και έχει ως στόχο την εξισορρόπηση παραγωγής και ζήτησης [10].

Η ενεργειακή ευελιξία των κτιρίων επιτυγχάνεται συνήθως χρησιμοποιώντας κάποιο είδος αποθήκευσης στο κτίριο ή με έξυπνη διαχείριση της λειτουργίας των συστημάτων θέρμανσης, ψύξης, κλιματισμού και φωτισμού, και στόχος είναι η μετατόπιση της χρήσης ενέργειας από περιόδους με υψηλή τιμή της ενέργειας (π.χ. χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ, που συνεπάγεται και υψηλά ποσά CO_2 στο ενεργειακό δίκτυο) σε περιόδους με χαμηλή τιμή (π.χ. υψηλή διείσδυση ΑΠΕ) [6].

Πραγματική πρόκληση αποτελεί η ποσοτικοποίηση της ενεργειακής ευελιξίας που τα κτίρια είναι σε θέση να παρέχουν, αφού σε σύγκριση με την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων, το θέμα της ευελιξίας των κτιρίων αντιπροσωπεύει έναν σχετικά νέο τομέα έρευνας.

2. Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΕΥΕΛΙΞΙΑΣ

Υπάρχουν διάφοροι ορισμοί για την ενεργειακή ευελιξία στη βιβλιογραφία. Ο απλούστερος ίσως ορισμός, αναφέρει την ευελιξία ως την ικανότητα ενός κτιρίου ή συστήματος να αποκλίνει από τα φορτία σχεδιασμού [11].

Ο πληρέστερος ορισμός δίνεται από το Annex 67 της IEA [6], όπου μετά από ανάλυση διαφόρων χαρακτηρισμών της, ορίζεται ως ενεργειακή ευελιξία ενός κτιρίου η ικανότητα διαχείρισης της ζήτησης και της παραγωγής ενέργειας σε αυτό, σύμφωνα με τις τοπικές κλιματικές συνθήκες, τις ανάγκες των χρηστών και τις απαιτήσεις του δικτύου.

Προκειμένου να είναι εφικτή η επίτευξη ενεργειακής ευελιξίας, πρέπει αρχικά να αναγνωριστούν οι πηγές της, να γίνει διαχωρισμός των φορτίων ενός κτιρίου σε περισσότερο και λιγότερο «ευέλικτα», να καθορισθούν οι μεθοδολογίες που μπορούν να επιτρέψουν ευέλικτο έλεγχο των συστημάτων και τελικά να οριστούν και να ταξινομηθούν οι δείκτες που θα επιτρέψουν τη βέλτιστη αξιολόγηση της παρεχόμενης ευελιξίας.

2.1. «Πάροχοι» ενεργειακής ευελιξίας κτιρίων

Η ενεργειακή ευελιξία των κτιρίων επιτυγχάνεται συνήθως αποσυνδέοντας τη ζήτηση ενέργειας από την παροχή ενέργειας, με τη χρήση κάποιας μορφής αποθήκευσης, και μετατοπίζοντας έτσι την χρήση ενέργειας από περιόδους υψηλής ζήτησης σε περιόδους χαμηλής ζήτησης. Μια άλλη μέθοδος για την επίτευξη της, αποτελεί η αποκοπή των λιγότερο κρίσιμων φορτίων, χωρίς να απαιτείται η αποκατάσταση τους σε δεύτερο χρόνο [7].

Σύμφωνα με το Annex 67 οι βασικοί «πάροχοι» ενεργειακής ευελιξίας στα πλαίσια ενός κτιρίου, είναι οι εξής [6]:

- Θερμική μάζα κτιρίων: Αφορά στην αξιοποίηση της θερμοχωρητικότητας των στοιχείων ενός κτιρίου (τοίχοι, δάπεδα, οροφές και έπιπλα). Σε περιόδους όπου παρατηρείται έλλειψη ενέργειας, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η αποθηκευμένη ενέργεια και το σύστημα θέρμανσης ή ψύξης μπορεί να απενεργοποιηθεί. Η διάρκεια της αποθήκευσης μπορεί να είναι από μερικές ώρες έως και μερικές ημέρες, ωστόσο απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή, ώστε σε κάθε περίπτωση να μην καταστρατηγείται η εσωτερική άνεση του κτιρίου [6].
- Αποθήκευση θερμικής ενέργειας: Αφορά σε συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Τέτοια μπορεί να είναι δοχεία αποθήκευσης ζεστού νερού χρήσης (ZNX), δοχεία αποθήκευσης ζεστού νερού θέρμανσης ή άλλες δεξαμενές νερού. Προς αυτή την κατεύθυνση μπορεί αντί του νερού να πραγματοποιηθεί αποθήκευση σε υλικά αλλαγής φάσης (phase change materials-PCM) [6], [12].

- Εναλλαγή καυσίμου: Σε κτίρια που υπάρχουν εγκατεστημένα συστήματα με περισσότερες από μία πηγές ενέργειας, παρέχεται ευελιξία επιλέγοντας κάθε φορά τη χρήση διαφορετικού συστήματος ανάλογα με την τιμή και τη διαθεσιμότητα του κάθε καυσίμου [6].
- Μπαταρίες: Κατά τη διάρκεια περιόδων όπου υπάρχει πλεόνασμα ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο οι μπαταρίες αποθηκεύουν ηλεκτρική ενέργεια, ώστε να χρησιμοποιηθεί σε περιόδους έλλειψης της. Αποτελούν ιδανική λύση για εφαρμογή στρατηγικών μετατόπισης φορτίου [6], [13].
- Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας: Ορισμένα κτίρια γίνονται παραγωγοί, δηλαδή παράγουν τοπικά ενέργεια, μέσω φωτοβολταϊκών συστημάτων, μικροανεμογεννητριών ή μονάδων Συμπαραγωγής Ηλεκτρισμού Θερμότητας Υψηλής Απόδοσης (ΣΗΘΥΑ) [6].
- Δίκτυα ενέργειας: Αφορά στη σύνδεση ενός κτιρίου με περισσότερα του ενός ενεργειακά δίκτυα (π.χ. ηλεκτρικό δίκτυο, δίκτυο αερίου, δίκτυο τηλεθέρμανσης) [6].

2.2. Χαρακτηριστικά ενεργειακής ευελιξίας κτιρίων γραφείου

Μεταξύ των διαφόρων τύπων κτιρίων, τα κτίρια γραφείων θεωρούνται ως η πιο ελκυστική επιλογή για την εφαρμογή προγραμμάτων απόκρισης ζήτησης (Demand Response - DR), αφού συνήθως χαρακτηρίζονται από υψηλή κατανάλωση ενέργειας, και στην πλειονότητα των περιπτώσεων είναι καλύτερα εξοπλισμένα σε σχέση με τα κτίρια κατοικιών όσον αφορά τις υποδομές αυτοματισμών [14].

Στα κτίρια γραφείων τα συστήματα θέρμανσης, αερισμού και κλιματισμού (Heating, Ventilation and Air conditioning - HVAC), τα συστήματα φωτισμού και τα διάφορα άλλα συστήματα, με τη μεταβολή του προφίλ λειτουργίας τους μπορούν να παρέχουν υπηρεσίες υποστήριξης του δικτύου ενέργειας. Τα σύγχρονα συστήματα θέρμανσης, ψύξης, κλιματισμού και αερισμού έχουν την ικανότητα μεταβολής της ισχύος τους και είναι σε θέση μέσω της μεταβολής του φορτίου τους να παρέχουν άμεση υποστήριξη του δικτύου. Επιπλέον, τα κτίρια γραφείων έχουν συχνά υψηλή θερμική μάζα, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αποθήκη ενέργειας για σύντομα χρονικά διαστήματα, επιτρέποντας έτσι την διενέργεια «κινήσεων ευελιξίας». Τέλος, η πλειονότητα των κτιρίων γραφείων είναι ήδη εξοπλισμένα με κάποιο σύστημα διαχείρισης ενέργειας, διευκολύνοντας έτσι την εφαρμογή νέων στρατηγικών ελέγχου [15].

3. ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ

Με στόχο την αξιοποίηση των προαναφερθέντων πηγών για παροχή ενεργειακής ευελιξίας υπάρχει ανάγκη εφαρμογής κατάλληλων στρατηγικών ελέγχου. Οι διαφορετικοί τύποι ελέγχου κυμαίνονται από πολύ απλό έλεγχο, όπως η απενεργοποίηση της λειτουργίας του συστήματος θέρμανσης ή ψύξης για προκαθορισμένο χρόνο, έως πιο περίπλοκο έλεγχο με βάση κάποιο κανόνα ή/και διάφορους περιορισμούς. Άλλες μέθοδοι ελέγχου βασίζουν τη λειτουργία τους σε προβλέψεις σχετικά με παράγοντες που επηρεάζουν τη λειτουργία του συστήματος, όπως προβλέψεις σχετικά με τις συνθήκες εξωτερικού και εσωτερικού περιβάλλοντος, προβλέψεις της ζήτησης και της παραγωγής φορτίου και των τιμών ενέργειας [16].

3.1. Προγράμματα διαχείρισης της ζήτησης

Προκειμένου να καταστεί δυνατή η εφαρμογή της διαχείρισης της ζήτησης, υπάρχουν δύο βασικοί τύποι προγραμμάτων που εφαρμόζονται. Αυτά είναι τα Βασισμένα σε Κίνητρα Προγράμματα (Incentives Based Programs-IBP) και τα Βασισμένα στην Τιμή Προγράμματα (Price Based Programs-PBP) [17,18].

Τα IBP διακρίνονται σε κλασσικά και βασισμένα στην αγορά προγράμματα. Στα κλασσικά προγράμματα, οι συμμετέχοντες (πελάτες) λαμβάνουν ανταμοιβές για τη συμμετοχή τους, συνήθως με τη μορφή πόντων ή έκπτωσης. Στα βασισμένα στην αγορά προγράμματα, οι συμμετέχοντες επιβραβεύονται χρηματικά για την απόδοσή τους, ανάλογα με τη μείωση του φορτίου που επιτυγχάνουν σε κρίσιμες περιόδους (υψηλή ζήτηση ή χαμηλή παραγωγή) [17,18].

Τα PBP βασίζονται στη λογική της δυναμικής τιμολόγησης, όπου το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας δεν είναι σταθερό, αλλά μεταβάλλεται ακολουθώντας το πραγματικό κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Κύριος στόχος αυτών των προγραμμάτων είναι η εξισορρόπηση μεταξύ παραγωγής και ζήτησης, παρέχοντας υψηλές τιμές κατά τις περιόδους υψηλής ζήτησης και χαμηλές τιμές κατά τις περιόδους χαμηλότερης ζήτησης [17,18].

3.2. Στρατηγικές ελέγχου ενεργειακών συστημάτων

Προκειμένου να μπορέσει να επιτευχθεί ο έλεγχος που θα επιτρέψει στους καταναλωτές, αλλά και στις Υπηρεσίες Κοινής Ωφέλειας να επωφεληθούν από τη διαχείριση της ζήτησης, πρέπει να εφαρμοστεί η κατάλληλη στρατηγική ελέγχου των συστημάτων ενός κτιρίου [19].

Οι στρατηγικές ελέγχου μπορούν να χωριστούν σε δύο μεγάλες βασικές κατηγορίες, σε έλεγχο βάσει κανόνων (Rule-Based Control-RBC) και σε έλεγχο βάσει μοντέλων πρόβλεψης (Model Predictive Control-MPC). Ο έλεγχος βάσει κανόνων αποτελεί μια πολύ απλή στρατηγική, κατά την οποία ελέγχεται η κατάσταση κάποιας μεταβλητής και το σύστημα αποκρίνεται πυροδοτώντας κάποια δράση. Ο έλεγχος RBC βασίζεται συνήθως στην παρακολούθηση μιας συγκεκριμένης παραμέτρου (π.χ. θερμοκρασία) για την οποία καθορίζεται μία ελάχιστη τιμή. Όταν η τιμή αυτή ξεπεραστεί, τότε η λειτουργία του συστήματος μεταβάλλεται σύμφωνα με την προκαθορισμένη στρατηγική [19].

Ο έλεγχος βάσει μοντέλων πρόβλεψης, στηρίζει τη λειτουργία του στην πρόβλεψη της ενεργειακής συμπεριφοράς ενός κτιρίου. Σε αυτήν την περίπτωση η βέλτιστη στρατηγική ελέγχου προκύπτει συνήθως από την επίλυση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης, με προκαθορισμένους περιορισμούς και συγκεκριμένο χρονικό ορίζοντα [19].

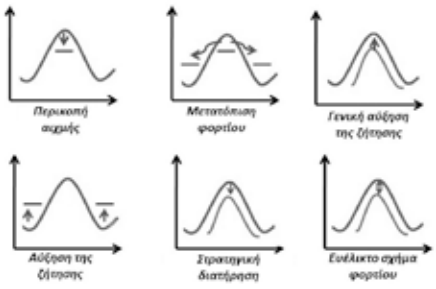
3.3. Τεχνική εφαρμογή της απόκρισης ζήτησης

Όσον αφορά την τεχνική εφαρμογή της απόκρισης ζήτησης (Demand Response) στα ενεργειακά συστήματα κτηρίου, διακρίνονται δύο διαφορετικοί τύποι ελέγχου, ο άμεσος και ο έμμεσος έλεγχος [18], [20].

Κατά τον έμμεσο έλεγχο, κάποιος «αθροιστής» (aggregator) ή μία υπηρεσία κοινής ωφέλειας, αναλαμβάνει να μεταδώσει πληροφορίες σχετικά με τις μεταβλητές τιμές της ενέργειας, στους καταναλωτές. Η επικοινωνία γίνεται αποκλειστικά προς τη μια κατεύθυνση, οι καταναλωτές αποφασίζουν για το αν θα προσαρμόσουν το φορτίο τους με στόχο την εξοικονόμηση κόστους και ο «αθροιστής» μπορεί απλά να παρατηρήσει τις αλλαγές στη ζήτηση φορτίου [18], [20].

Κατά τον άμεσο έλεγχο, ο «αθροιστής» ή η υπηρεσία κοινής ωφέλειας, μπορεί είτε να έχει απευθείας έλεγχο μεμονωμένων φορτίων ή να αιτηθεί την αύξηση ή τη μείωση του φορτίου σε συγκεκριμένες χρονικές περιόδους. Σε αυτή την περίπτωση η επικοινωνία είναι αμφίδρομη και οι καταναλωτές γνωστοποιούν στον «αθροιστή» τις αποφάσεις τους σχετικά με την προσαρμογή του φορτίου τους, ώστε ο «αθροιστής» να μπορέσει να εκτιμήσει την κατάσταση και να προβλέψει την κατάσταση του δικτύου σε μεταγενέστερο χρόνο [18], [20].

3.4. Μέθοδοι διαμόρφωσης φορτίου



Εικόνα 1: Τρόποι μεταβολής της καμπύλης φορτίου [21]

Όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία [21], [22], υπάρχουν έξι βασικές μέθοδοι διαμόρφωσης φορτίου, η περικοπή αιχμής, η αύξηση της ζήτησης, η μετατόπιση φορτίου, η στρατηγική διατήρηση, η γενική αύξηση φορτίου και το ευέλικτο σχήμα φορτίου (Εικόνα 1). Η περικοπή αιχμής και η αύξηση της ζήτησης, κατατάσσονται στις μεθόδους άμεσου ελέγχου φορτίου. Η μετατόπιση φορτίου αποτελεί συνδυασμό των μεθόδων περικοπής αιχμής και αύξησης της ζήτησης. Η μετατόπιση φορτίου εφαρμόζεται στην περίπτωση ύπαρξης ελεγχόμενων φορτίων και προτιμάται ως μέθοδος, καθώς κάθε φορτίο που αποκόπτεται, αποκαθίσταται σε μεταγενέστερο χρόνο, διατηρώντας έτσι το συνολικό

ενεργειακό ισοζύγιο με μικρές συνέπειες για την άνεση και ευεξία του χρήστη κατά την παραμονή του στο εσωτερικό περιβάλλον του κτιρίου. Οι υπόλοιπες τρεις μέθοδοι αφορούν σε ανώτερο επίπεδο ελέγχου, καθώς περιλαμβάνουν μεταβολές στο σύνολο της μορφής της καμπύλης ζήτησης και μπορούν να πραγματοποιηθούν αποκλειστικά με την εφαρμογή έξυπνων αλγορίθμων ελέγχου [21], [22]. Πιο συγκεκριμένα η στρατηγική διατήρηση είναι η μεταβολή της καμπύλης φορτίου, που προκύπτει από προγράμματα παρακινούμενα από κάποιον «αθροιστή» και αφορούν την κατανάλωση τελικής χρήσης. Η μεταβολή αντικατοπτρίζει μια τροποποίηση του φορτίο που περιλαμβάνει μείωση των πωλήσεων και σε αρκετές περιπτώσεις αλλαγή στον μοτίβο χρήσης ενέργειας. Η γενική αύξηση της ζήτησης, αφορά την μεταβολή του σχήματος φορτίου που οφείλεται σε μια γενική αύξηση των πωλήσεων και τέλος το ευέλικτο σχήμα φορτίου, είναι μια μέθοδος που βασίζεται στην χρήση της αξιοπιστίας ως περιορισμό προγραμματισμού, καθώς ο σχεδιασμός του προγραμματισμού της προσφοράς, πραγματοποιείται λαμβάνοντας υπόψη τις προβλέψεις σχετικά με το αναμενόμενο φορτίο και τις δράσεις από την πλευρά της ζήτησης [23].

4. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΑΡΕΧΟΜΕΝΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΕΥΕΛΙΞΙΑΣ

Τα βασικά χαρακτηριστικά της ενεργειακής ευελιξίας αφορούν τρεις κυρίως διαστάσεις, τον χρόνο, το μέγεθος και την απόδοση [6,24]. Ωστόσο, λόγω των πολλών παραγόντων που επηρεάζουν την ενεργειακή ευελιξία, είναι περισσότερα τα χαρακτηριστικά που πρέπει να μελετηθούν ώστε να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα για το μέγεθος της ενεργειακής ευελιξίας που μπορεί ένα κτίριο να προσφέρει. Σημαντικό είναι να τονιστεί η μεταβλητή φύση της, η οποία δεν επιτρέπει τη μελέτη της ως ένα σταθερό χρονικά φαινόμενο. Η κατάσταση του κτιρίου, οι συνθήκες του εξωτερικού περιβάλλοντος η τιμή της ενέργειας, η κατάσταση του δικτύου και η συμπεριφορά των χρηστών, είναι μόνο λίγοι από τους παράγοντες που την επηρεάζουν [6,24].

Ο κύριος στόχος της ενεργειακής ευελιξίας είναι να επιτρέψει την ομαλή μετάβαση προς τις ΑΠΕ. Ωστόσο, μπορεί επίσης να βοηθήσει στην ενίσχυση της γενικότερης σταθερότητας των δικτύων, τη μείωση του κόστους ενέργειας και των εκπομπών CO_2 και τη βελτιστοποίηση της αυτοκατανάλωσης τοπικά παραγόμενης ενέργειας και της ενεργειακής διαχείρισης σε επίπεδο κοινότητας (microgrid) [25]. Επομένως κατανοούμε, ότι οι δείκτες και οι μέθοδοι για την αξιολόγηση της πρέπει να είναι σαφώς ορισμένοι προκειμένου να μπορέσουν να υπηρετήσουν ικανοποιητικά τον ρόλο τους, που δεν είναι άλλος από το να προσφέρουν τις κατάλληλες πληροφορίες, τόσο στην πλευρά της ζήτησης όσο και της παραγωγής.

Στην υποστήριξη του στόχου για ορθό προσδιορισμό των δεικτών, παρουσιάζεται ένα διαφορετικό πλαίσιο για την ανάλυση των έξυπνων κτιρίων που περιλαμβάνει περισσότερες πτυχές και που θα επιτρέψει την προσέγγιση της ευελιξίας και γενικότερα της απόδοσης από μια περισσότερο ολιστική σκοπιά [26]. Οι βασικές πτυχές που καλύπτει το πλαίσιο και αφορούν τη διαχείριση της ζήτησης, είναι [26]:

- η τεχνική απόδοση (π.χ. στοιχεία απόδοσης ΑΠΕ, κατανάλωση ενέργειας, ικανότητα μετατόπισης φορτίου)
- η περιβαλλοντική απόδοση (π.χ. μείωση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO_2))
- η οικονομική απόδοση (π.χ. μείωση κόστους κατανάλωσης ενέργειας)
- η κοινωνική απόδοση (π.χ. άνεση εσωτερικού περιβάλλοντος)

Η ανασκόπηση της βιβλιογραφίας ανέδειξε ορισμένους δείκτες που προτάθηκαν την τελευταία δεκαετία και αφορούν τις πτυχές της ενεργειακής ευελιξίας που προαναφέρθηκαν. Οι περισσότερες μελέτες παρουσιάζουν δείκτες που σχετίζονται κάθε φορά με ένα ή δύο από τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά. Σε κάποιες μελέτες έχει γίνει προσπάθεια να προταθεί ένας ολιστικός δείκτης για την αξιολόγηση της ευελιξίας, χωρίς ωστόσο να υπάρχουν αδιάσειστα στοιχεία σχετικά με την ποιότητα και την ακρίβεια των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την εφαρμογή τους.

Πίνακας 1: Ανασκόπηση δεικτών ενεργειακής ευελιξίας

Μέθοδος	Εξίσωση μεθόδου	Μονάδα	Πηγή
Ευελιξία καθυστερημένης λειτουργίας	$A_{Delayed,t} = t^* - t$	h	[27]
Ευελιξία εξαναγκασμένης λειτουργίας	$A_{Forced,t} = t^* - t$	h	[27]
Δείκτης απόδοσης ευελιξίας	$FPI = \frac{1}{4}\left(p_1 \cdot t^*_{res} + p_2 \cdot P^{*}_{res} - p_3 \cdot t^*_{rec} + p_4 \cdot \eta_{DR}\right)$	-	[28]
Σταθμισμένη απόκλιση θερμοκρασίας	$WTD_L = \int_{T_{oo}<T_{min}} \lvert T_{op} - T_{min} \rvert dt$ $WTD_H = \int_{T_{op}>T_{max}} \lvert T_{op} - T_{max} \rvert dt$	K·h	[29]
Συντελεστής κάλυψης ζήτησης & Συντελεστής κάλυψης προσφοράς	$\gamma_d = \frac{\int_{t_1}^{t_2} min(P_{PV}, P_d)dt}{\int_{t_1}^{t_2} P_d\, dt}$ and $\gamma_s = \frac{\int_{t_1}^{t_2} min(P_{PV}, P_d)dt}{\int_{t_1}^{t_2} P_{PV}\, dt}$	%	[29]
Κατάσταση φόρτισης	$TL_1 = \frac{(T_{avg,s2} - T_{fw})}{(T_{sh,d} - T_{fw})}$ $TL_2 = \frac{(T_{avg,s3} - T_{fw})}{(T_{dhw\,set} - T_{fw})}$ $SOC = \frac{(T_1 + T_2)}{2}$	%	[30]
Καμπύλες κόστους	*Ευελιξία [kWh] στον οριζόντιο άξονα, Κόστος [€] στον κατακόρυφο άξονα*	€/kWh	[31]
Απόδοση Μεταβολής Ισχύος	$\overline{PSE}(i) := \frac{\Delta P(s_{-i})}{\Delta E_T(s_{-i})}$ $\underline{PSE}(i): = \frac{\Delta P(s_i)}{\Delta E_T(s_i)}$	%	[32]
Δυναμικό Μεταβολής Ισχύος	$\Delta P(s_i) := P_i(s_i) - P_i(s_0)$	kW	[32]
Συντελεστής ευελιξίας (συνάρτηση της απόκλισης μεταξύ μέγιστου και ελάχιστου κόστους προμήθειας)	$ff = \frac{C_{el,max} - C_{el,avg}}{C_{el,max} - C_{el,min}}$	-	[33]
Συντελεστής Ευελιξίας	$FF_s = \frac{\int_{DT} l(t)dt - \int_{NT} l(t)dt}{\int_{DT} l(t)dt + \int_{NT} l(t)dt}$	-	[34], [35]
Εξοικονόμηση Ενέργειας	$Energy\ Savings = \int_0^{24} P(t) - P_{ref}(t)dt$	kWh	[35]
Περιβαλλοντική Εξοικονόμηση	$Environmental\ Savings = \int_0^{24} \left(P(t) - P_{ref}(t)\right) * Mix\ (t)dt.$	kg CO_2	[35]
Εξοικονόμηση Κόστους	$Cost\ Savings = E_{Flex} \cdot \epsilon_{use} + E_{FlexMap} \cdot \epsilon_{cap} + \int_0^{24} \left(P(t) - P_{ref}(t)\right) \cdot PVPC\ (t)dt$	€	[35]
Δείκτης Ενεργειακής Ευελιξίας Κτιρίου	$BEFI(Duration) = \pm x(kW)$	kW	[36]

Πίνακας 1: Ανασκόπηση δεικτών ενεργειακής ευελιξίας (συνέχεια)

Μέθοδος	Εξίσωση μεθόδου	Μονάδα	Πηγή
Δείκτης Ευελιξίας Συστήματος	$P_{wt}^{s} = (1 \pm \alpha_i) \cdot P_{wt}^{0}, s = \pm, i = 1,2,\dots,n$ $TC \le (1+\xi) \cdot TC_b$	-	[37]
Αντίστροφη ροή ισχύος	$RPF = \begin{cases} 0, gen(t_n) - con(t_n) < 0 \\ \sum_{n\in\{1..N\}} [P_{gen}(t_n) - P_{con}(t_n)] \frac{t_{step}}{3600}, gen(t_n) - con(t_n) \ge 0 \end{cases}$	kWh	[38]
Αυτάρκεια Δικτύου	$Ss = \frac{E_{tot,\,RES} - RPF}{E_{cons}} \cdot 100$	%	[38]
Αυτοκατανάλωση Δικτύου	$Sc = \frac{E_{tot,\,RES} - RPF}{E_{tot,\,RES}} \cdot 100$	%	[38]
Δείκτης Θερμικής Δυσφορίας	$TDI = \begin{cases} \sum_{n\in\{1..N\}} \left[(T_{BC}(t_n) - T_{OC}(t_n)) \frac{t_{step}}{3600} \right], T_{OC}(t_n) - T_{BC}(t_n) < 0 \\ \sum_{n\in\{1..N\}} \left[(T_{OC}(t_n) - T_{BC}(t_n)) \frac{t_{step}}{3600} \right], T_{OC}(t_n) - T_{BC}(t_n) \ge 0 \end{cases}$	ºC·h	[38]
Χωρητικότητα αποθήκευσης	$C_{ADR} = \int_0^{i_{ADR}} (Q_{ADR} - Q_{Ref}) dt$	kWh	[39], [24]
Απόδοση αποθήκευσης	$\eta_{ADR} = 1 - \frac{\int_0^{\infty} (Q_{ADR} - Q_{Ref}) dt}{\left\lvert \int_0^{i_{ADR}} (Q_{ADR} - Q_{Ref}) dt \right\rvert}$	%	[39], [24]
Ημερήσια απόκλιση κόστους ευελιξίας	$\delta C_{Flex} = C_{Daily}^{\alpha} - C_{Daily}^{ref}$	€	[40]
Διακύμανση της κατανάλωσης ενέργειας της αντλίας θερμότητας λόγω απόκρισης στη ζήτηση	$c = \frac{\delta C_{Flex}}{\delta E_{DR}}$	kWh	[40]
Διακύμανση της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας λόγω απόκρισης στη ζήτηση	$\delta PE = PE_{DR} - PE^{ref}$	kWh	[40]
Δείκτης ευελιξίας (μεταβολή στο φορτίο θέρμανσης)	$F = \left[\left(1 - \frac{\%\ High}{\%\ High_{\ ref}} \right) + \left(1 - \frac{\%\ Medium}{\%\ Medium_{\ ref}} \right) \right] \times \frac{100}{2}$	-	[41]
Δυναμικό απόκρισης ζήτησης	$DR_i^p = \frac{\hat{P}_{i,h}^{base} - \hat{P}_{i,h}^{DR}}{\hat{P}_{i,h}^{base}}$	%	[42]
Ευέλικτη Ζήτηση	$P_{k,w}(t) = p_k(t) - \Delta p_{k,w}$ $0 \le (P_{max} - P_{min})_{k,w}(t) \le p_k(t) - P_{min,k}(t)$	kW	[16]
Χρόνος διακύμανσης μέγιστης-ελάχιστης ισχύος	$\frac{T}{2} = \frac{C_r}{B} \frac{TT}{T_{ref} - TT}$	h	[43]
Αύξηση κατανάλωσης ισχύος	$P_{inc} = P - P_{ref}$	kW	[9]
Μείωση κατανάλωσης ισχύος	$P_{dec} = P_{ref} - P$	kW	[9]
Δείκτης αλληλεπίδρασης δικτύου	$PE_{grid} = STD\left(\frac{Pow_{mis,i}}{max[\lvert Pow_{mis,1} \rvert, \lvert Pow_{mis,2} \rvert, \dots, \lvert Pow_{mis,8760} \rvert]} \right)$	-	[44]

Πίνακας 1: Ανασκόπηση δεικτών ενεργειακής ευελιξίας (συνέχεια)

Μέθοδος	Εξίσωση μεθόδου	Μονάδα	Πηγή
Δείκτης Άνεσης	$PE_{comfort} = \sum \tau_i \begin{cases} \tau_i = 1, \ if CAP_{AC} < CL_i \\ \tau_i = 0, \ if CAP_{AC} \geq CL_i \end{cases}$	h	[44]
Δείκτης Έξυπνα Δομημένου Περιβάλλοντος	$SBEI$	-	[45]
Μεταβολή Ισχύος	$Q_\delta = Q_{ADR} - Q_{Ref}$	kW	[24]

Οι δείκτες κατατάσσονται σε κατηγορίες ανάλογα με τις πτυχές της ενεργειακής ευελιξίας τις οποίες καλύπτουν (Πίνακας 2).

Πίνακας 2: Βιβλιογραφική ταξινόμηση δεικτών ενεργειακής ευελιξίας βάσει των χαρακτηριστικών τους

Χαρακτηριστικά	Αναφορές
Χρόνος	[27], [37], [43]
Χωρητικότητα/ Μέγεθος	[24], [30], [37], [39]
Τεχνική απόδοση	[29], [32], [34], [35], [36], [38], [40], [9], [41], [42], [16], [44]
Περιβαλλοντική απόδοση	[35]
Κοινωνική απόδοση	[29], [38], [44]
Οικονομική απόδοση	[31], [33], [34], [35], [37], [40]
Ολιστική προσέγγιση	[28], [45]

Παρατηρείται πως η πλειονότητα των δεικτών αφορούν την τεχνική και την οικονομική απόδοση, ενώ αρκετές είναι οι περιπτώσεις στις οποίες μελετάται η κοινωνική απόδοση και ιδίως οι επιπτώσεις στην άνεση του εσωτερικού περιβάλλοντος. Από τις έρευνες που μελετήθηκαν, αναγνωρίσθηκαν μόνο δύο στις οποίες παρουσιάζεται κάποιος δείκτης ολιστικής προσέγγισης και ο οποίος ορίζεται ως ο σταθμισμένος μέρος όρος επιμέρους δεικτών ευελιξίας.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Για την καθιέρωση της υψηλής διείσδυσης των ΑΠΕ στα ενεργειακά συστήματα, κρίνεται ως επιτακτική η ανάγκη για βελτιστοποίηση της εξισορρόπησης μεταξύ παραγωγής και ζήτησης. Τα κτίρια έχουν το δυναμικό που απαιτείται για τη μετάβαση στην καθαρή ενέργεια και είναι σε θέση να ηγηθούν αυτής της μετάβασης.

Βασική προϋπόθεση είναι να καταφέρουμε να καθορίσουμε το βαθμό, ή καλύτερα το ποσό, ενεργειακής ευελιξίας που μπορούν να παρέχουν. Πότε όμως ένα κτίριο μπορεί να χαρακτηριστεί ως ευέλικτο; Μπορούμε να πούμε ότι ένα σύστημα, το οποίο μπορεί να «μεταβάλλει» υψηλά ποσά ενέργειας ή/και για μεγάλο χρονικό διάστημα είναι περισσότερο «ευέλικτο» από ένα σύστημα που «μεταβάλλει» μικρότερα ποσά ενέργειας ή/και για μικρότερο χρονικό διάστημα [9]. Ωστόσο, δεν υπάρχει ακόμα κάποια γενικώς αποδεκτή μέθοδος ποσοτικοποίησης της ενεργειακής ευελιξίας, λόγω του πλήθους των παραγόντων που μπορούν να την επηρεάσουν, ούτε κάποιος ξεκάθαρος δείκτης που να την ορίζει πλήρως.

Η ανασκόπηση της βιβλιογραφίας σχετικά με τους δείκτες που χρησιμοποιούνται για ποσοτικοποίηση της ενεργειακής ευελιξίας, που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας ερευνητικής εργασίας, κατέδειξε την ύπαρξη μίας πληθώρας δεικτών οι οποίοι στην πλειονότητα των περιπτώσεων παρουσιάζουν αρκετές ομοιότητες μεταξύ τους, κυρίως όσον αφορά τις βασικές πτυχές τις οποίες αφορούν. Οι δείκτες ταξινομήθηκαν σε εφτά βασικές κατηγορίες, όσες και οι διαφορετικές πτυχές που μπορεί να αφορούν. Η ταξινόμηση κατέδειξε την ισχυρά ενεργοκεντρική τάση κατά την αξιολόγηση της

ευελιξίας. Άλλες πτυχές στις οποίες δίνεται βάση είναι η οικονομική απόδοση και σε μικρότερο βαθμό η κοινωνική απόδοση. Για σκοπούς διασφάλισης της κοινωνικής απόδοσης, θεωρούμε ότι είναι σημαντικό να κατοχυρώνεται τουλάχιστον με τη μορφή περιορισμών η άνεση του εσωτερικού περιβάλλοντος, κατά τη διενέργεια οποιασδήποτε ενεργειακά ευέλικτης δράσης, ώστε να εξασφαλίζεται η ευημερία των χρηστών και κατά συνέπεια η επιθυμία τους για συμμετοχή σε προγράμματα διαχείρισης της ζήτησης.

Τέλος, όσον αφορά τους δείκτες ολιστικής προσέγγισης, με την επιλογή κατάλληλων κριτηρίων και την ορθή διαστασιολόγηση των συντελεστών βαρύτητας για κάθε κριτήριο, θα μπορούσαν να παραχθούν δείκτες που να δίνουν μία έγκυρη «εικόνα» του ποσού της ευελιξίας που παρέχεται.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς θέλουν να ευχαριστήσουν το Ελληνικό Ίδρυμα Έρευνας και Καινοτομίας, καθώς η ερευνητική εργασία υποστηρίχτηκε από το Ελληνικό Ίδρυμα Έρευνας και Καινοτομίας (ΕΛ.ΙΔ.Ε.Κ.), στο πλαίσιο της Δράσης «1η Προκήρυξη ερευνητικών έργων ΕΛ.ΙΔ.Ε.Κ. για την ενίσχυση των μελών ΔΕΠ και Ερευνητών/τριών και την προμήθεια εξοπλισμού μεγάλης αξίας» (Αριθμός Έργου:4104).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] "Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on Energy Efficiency," Off. J. Eur. Union, L 315(November 2012), pp. 1–56.

[2] "Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council on the Promotion of the Use of Energy from Renewable Sources," Off. J. Eur. Union, L 328(December 2018), pp. 82–209.

[3] "Directive 2018/2002/EU of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 Amending Directive 2012/27/EU on Energy Efficiency," Off. J. Eur. Union, L 328(December 2018), pp. 210–230.

[4] Tichelen, P. Van, and Bogaert, S., 2018, "Support for Setting Up a Smart Readiness Indicator for Buildings and Related Impact Assessment Final Report," (August).

[5] Verbeke, S., Aerts, D., Reynders, G., Ma, Y., and Waide, P., 2020, *Final Report on the Technical Support To the Development of a Smart Readiness Indicator for Buildings*.

[6] Jensen, S. Ø., Marszal-Pomianowska, A., Lollini, R., Pasut, W., Knotzer, A., Engelmann, P., Stafford, A., and Reynders, G., 2017, "IEA EBC Annex 67 Energy Flexible Buildings," Energy Build., 155, pp. 25–34.

[7] Marszal, A. J., Pernetti Roberta, I., and Søren Østergaard Jensen, D., 2019, *Characterization of Energy Flexibility in Buildings Energy in Buildings and Communities Programme Annex 67 Energy Flexible Buildings*.

[8] Clauß, J., Stinner, S., Solli, C., Lindberg, K. B., Madsen, H., and Georges, L., 2018, "A Generic Methodology to Evaluate Hourly Average CO2eq. Intensities of the Electricity Mix to Deploy the Energy Flexibility Potential of Norwegian Buildings The Future Norwegian Energy System in a European Context View Project IEA EBC Annex 67 Energy Flex," 10th Int. Conf. Syst. Simul. Build. Liege, Dec. 10-12, 2018, (December).

[9] D'hulst, R., Labeeuw, W., Beusen, B., Claessens, S., Deconinck, G., and Vanthournout, K., 2015, "Demand Response Flexibility and Flexibility Potential of Residential Smart Appliances: Experiences from Large Pilot Test in Belgium," Appl. Energy, 155, pp. 79–90.

[10] Eid, C., Codani, P., Chen, Y., Perez, Y., and Hakvoort, R., 2015, "Aggregation of Demand Side Flexibility in a Smart Grid: A Review for European Market Design," Int. Conf. Eur. Energy Mark. EEM, 2015-Augus(May), pp. 10–14.

[11] Petersen, M. K., Edlund, K., Hansen, L. H., Bendtsen, J., and Stoustrup, J., 2013, "A Taxonomy for Modeling Flexibility and a Computationally Efficient Algorithm for Dispatch in Smart Grids," Proc. Am. Control Conf., pp. 1150–1156.

[12] Arteconi, A., Xu, J., Ciarrocchi, E., Paciello, L., Comodi, G., Polonara, F., and Wang, R., 2015, "Demand Side Management of a Building Summer Cooling Load by Means of a Thermal

Energy Storage," *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, pp. 3277–3283.

[13] Groppi, D., Pfeifer, A., Garcia, D. A., Krajačić, G., and Duić, N., 2021, "A Review on Energy Storage and Demand Side Management Solutions in Smart Energy Islands," Renew. Sustain. Energy Rev., 135, p. 110183.

[14] Khorram, M., Faria, P., Abrishambaf, O., and Vale, Z., 2020, "Consumption Optimization in an Office Building Considering Flexible Loads and User Comfort," Sensors (Switzerland), 20(3), pp. 1–20.

[15] Aduda, K. O., Labeodan, T., and Zeiler, W., 2018, "Towards Critical Performance Considerations for Using Office Buildings as a Power Flexibility Resource-a Survey," Energy Build., 159, pp. 164–178.

[16] Aduda, K. O., Labeodan, T., Zeiler, W., Boxem, G., and Zhao, Y., 2016, "Demand Side Flexibility: Potentials and Building Performance Implications," Sustain. Cities Soc., 22, pp. 146–163.

[17] Chen, C., 2018, "Demand Response: An Enabling Technology to Achieve Energy Efficiency in a Smart Grid," *Application of Smart Grid Technologies: Case Studies in Saving Electricity in Different Parts of the World*, Elsevier, pp. 143–171.

[18] Albadi, M. H., and El-Saadany, E. F., 2008, "A Summary of Demand Response in Electricity Markets," Electr. Power Syst. Res., 78(11), pp. 1989–1996.

[19] Clauß, J., Finck, C., Vogler-finck, P., and Beagon, P., 2017, "Control Strategies for Building Energy Systems to Unlock Demand Side Flexibility – A Review Norwegian University of Science and Technology , Trondheim , Norway Eindhoven University of Technology , Eindhoven , Netherlands Neogrid Technologies ApS / Aalborg," 15th Int. Conf. Int. Build. Perform., (May 2018), pp. 611–620.

[20] Madsen, H., Parvizi, J., Halvgaard, R., Sokoler, L. E., Jørgensen, J. B., Hansen, L. H., and Hilger, K. B., 2015, "Control of Electricity Loads in Future Electric Energy Systems," *Handbook of Clean Energy Systems*, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, pp. 1–26.

[21] Lokeshgupta, B., Sadhukhan, A., and Sivasubramani, S., 2017, "Multi-Objective Optimization for Demand Side Management in a Smart Grid Environment," *2017 7th International Conference on Power Systems (ICPS)*, IEEE, Pune, pp. 200–205.

[22] Logenthiran, T., Srinivasan, D., and Shun, T. Z., 2012, "Demand Side Management in Smart Grid Using Heuristic Optimization," IEEE Trans. Smart Grid, 3(3), pp. 1244–1252.

[23] Gellings, C. W., 1985, "The Concept of Demand-Side Management for Electric Utilities," Proc. IEEE, 73(10), pp. 1468–1470.

[24] Reynders, G., Diriken, J., and Saelens, D., 2017, "Generic Characterization Method for Energy Flexibility: Applied to Structural Thermal Storage in Residential Buildings," Appl. Energy, 198, pp. 192–202.

[25] Shayeghi, H., Shahryari, E., Moradzadeh, M., and Siano, P., 2019, "A Survey on Microgrid Energy Management Considering Flexible Energy Sources," Energies, 12(11), pp. 1–26.

[26] Angelakoglou, K., Nikolopoulos, N., Giourka, P., Svensson, I.-L., Tsarchopoulos, P., Tryferidis, A., and Tzovaras, D., 2019, "A Methodological Framework for the Selection of Key Performance Indicators to Assess Smart City Solutions," Smart Cities, 2(2), pp. 269–306.

[27] Nuytten, T., Claessens, B., Paredis, K., Van Bael, J., and Six, D., 2013, "Flexibility of a Combined Heat and Power System with Thermal Energy Storage for District Heating," Appl. Energy, 104, pp. 583–591.

[28] Arteconi, A., Mugnini, A., and Polonara, F., 2019, "Energy Flexible Buildings: A Methodology for Rating the Flexibility Performance of Buildings with Electric Heating and Cooling Systems," Appl. Energy, 251.

[29] Reynders, G., Nuytten, T., and Saelens, D., 2013, "Potential of Structural Thermal Mass for Demand-Side Management in Dwellings," Build. Environ., 64, pp. 187–199.

[30] Dar, U. I., Sartori, I., Georges, L., and Novakovic, V., 2014, "Advanced Control of Heat Pumps for Improved Flexibility of Net-ZEB towards the Grid," Energy Build., 69, pp. 74–84.

[31] De Coninck, R., and Helsen, L., 2016, "Quantification of Flexibility in Buildings by Cost Curves - Methodology and Application," Appl. Energy, 162, pp. 653–665.

[32] Oldewurtel, F., Sturzenegger, D., Andersson, G., Morari, M., and Smith, R. S., 2013, *Towards a Standardized Building Assessment for Demand Response*.

[33] Li, R., and You, S., 2018, "Exploring Potential of Energy Flexibility in Buildings for Energy System Services," CSEE J. Power Energy Syst., 4(4), pp. 434–443.

[34] Le Dréau, J., and Heiselberg, P., 2016, "Energy Flexibility of Residential Buildings Using Short Term Heat Storage in the Thermal Mass," Energy, 111, pp. 991–1002.

[35] Taddeo, P., Colet, A., Carrillo, R. E., Canals, L. C., Schubnel, B., Stauffer, Y., Bellanco, I., Garcia, C. C., and Salom, J., 2020, "Management and Activation of Energy Flexibility at Building and Market Level: A Residential Case Study," Energies, 13(5), pp. 1–18.

[36] Athienitis, A. K., Dumont, E., and De, T., 2020, "Development of a Dynamic Energy Flexibility Index for Buildings and Their Interaction with Smart Grids," 2020 ACEEE Summer Study Energy Effic. Build., (August), pp. 31–43.

[37] Nikoobakht, A., Aghaei, J., Shafie-Khah, M., and Catalão, J. P. S., 2019, "Assessing Increased Flexibility of Energy Storage and Demand Response to Accommodate a High Penetration of Renewable Energy Sources," IEEE Trans. Sustain. Energy, 10(2), pp. 659–669.

[38] Fambri, G., Badami, M., Tsagkrasoulis, D., Katsiki, V., Giannakis, G., and Papanikolaou, A., 2020, "Demand Flexibility Enabled by Virtual Energy Storage to Improve Renewable Energy Penetration," Energies, 13(19), pp. 1–20.

[39] Péan, T., Torres, B., Salom, J., and Ortiz, J., 2018, "Representation of Daily Profiles of Building Energy Flexibility," eSim 2018, 10th Conf. IBPSA-Canada, (May), pp. 153–162.

[40] D'Ettorre, F., De Rosa, M., Conti, P., Testi, D., and Finn, D., 2019, "Mapping the Energy Flexibility Potential of Single Buildings Equipped with Optimally-Controlled Heat Pump, Gas Boilers and Thermal Storage," Sustain. Cities Soc., 50.

[41] Johra, H., Heiselberg, P., and Dréau, J. Le, 2019, "Influence of Envelope, Structural Thermal Mass and Indoor Content on the Building Heating Energy Flexibility," Energy Build., 183, pp. 325–339.

[42] Yin, R., Kara, E. C., Li, Y., DeForest, N., Wang, K., Yong, T., and Stadler, M., 2016, "Quantifying Flexibility of Commercial and Residential Loads for Demand Response Using Setpoint Changes," Appl. Energy, 177, pp. 149–164.

[43] Tahersima, F., Madsen, P. P., and Andersen, P., 2013, "An Intuitive Definition of Demand Flexibility in Direct Load Control," *Proceedings of the IEEE International Conference on Control Applications*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 521–526.

[44] Shen, L., and Sun, Y., 2016, "Performance Comparisons of Two System Sizing Approaches for Net Zero Energy Building Clusters under Uncertainties," Energy Build., 127, pp. 10–21.

[45] De Groote, M., Volt, J., and Bean, F., 2017, *Is Europe Ready for the Smart Buildings Revolution? Mapping Smart-Readiness and Innovative Case Studies*.

Η ΣΥΜΒΟΛΗ ΜΟΝΑΔΑΣ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΥΨΗΛΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΜΕΤΑΒΑΣΗ ΓΙΑ ΕΝΑ ΠΡΑΣΙΝΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

Εμ. Κωστόπουλος[1], Κλ. Καλδέλλης[1], Μ. Καλούτσα[2], Αιμ. Κονδύλη[3], Ι. Καλδέλλης[1*]

[1]Εργαστήριο Ήπιων Μορφών Ενέργειας & Προστασίας Περιβάλλοντος,
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής
[2]Τεχνική Υπηρεσία, Παν. Δυτικής Αττικής
[3]Εργαστήριο Αριστοποίησης Παραγωγικών Συστημάτων, Παν. Δυτικής Αττικής
Τ.Θ. 41046, Αθήνα 12201, jkald@uniwa.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η τεχνολογία συμπαραγωγής προκρίνεται ως μία εκ των κορυφαίων τεχνολογικών επιλογών στα πλαίσια της στρατηγικής της Ευρωπαϊκής Ένωσης, που έχει ως στόχο την εξοικονόμηση και την ορθολογική χρήση της ενέργειας. Με τον τρόπο αυτό οι μονάδες συμπαραγωγής συνδυάζουν την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με την ταυτόχρονη παραγωγή θερμότητας ή ψύξης, αξιοποιώντας την ίδια πρωτογενή πηγή ενέργειας, περιορίζοντας τις εκπομπές αέριων ρυπαντών και αερίων του θερμοκηπίου σε ποσοστό έως και 80%, ανάλογα και με το εγχώριο ενεργειακό μίγμα του τομέα της ηλεκτροπαραγωγής.

Το Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής αποτελείται στην παρούσα φάση από τρεις διακριτές πανεπιστημιουπόλεις με συνολική ηλεκτρική κατανάλωση που υπερβαίνει τις 7500 MWh_e ετησίως, ενώ τα αντίστοιχα θερμικά φορτία είναι ελαφρώς μεγαλύτερα των αντίστοιχων ηλεκτρικών κατά τους χειμερινούς μήνες. Κατά τη θερινή περίοδο τα ψυκτικά φορτία καλύπτονται είτε με κεντρικές μονάδες κλιματισμού είτε με αυτόνομες κλιματιστικές μονάδες επιβαρύνοντας σημαντικά τη ζήτηση ηλεκτρικού φορτίου. Σαν οικονομικό αποτέλεσμα, ο συνολικός προϋπολογισμός του πανεπιστημίου επιβαρύνεται ετησίως με περίπου ένα εκατομμύριο ευρώ για κάλυψη των ενεργειακών του αναγκών.

Για την περιβαλλοντικά ορθή και οικονομικά αποδεκτή αντιμετώπιση του ενεργειακού προβλήματος το Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής (Πα.Δ.Α.) έχει υιοθετήσει τη σταδιακή μετάβαση προς ένα πράσινο πανεπιστήμιο, αξιοποιώντας υφιστάμενες υποδομές και επενδύοντας σε νέες καθαρές τεχνολογίες. Στο πλαίσιο αυτό από τον Ιούνιο του 2016 έχει εγκατασταθεί σύγχρονη μονάδα Συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας-θερμότητας και ψύξης, η οποία λειτουργεί περιοδικά (έως σήμερα δεν έχει υπερβεί τις 12000 ώρες λειτουργίας) με χρήση φυσικού αερίου υπό το νομικό καθεστώς της αυτοπαραγωγής, για την κάλυψη αποκλειστικά των αναγκών της Πανεπιστημιούπολης του Αρχαίου Ελαιώνα (τ. ΑΕΙ Πειραιά ΤΤ). Η συγκεκριμένη μονάδα υψηλής ενεργειακής απόδοσης (38% ηλεκτρική απόδοση και 50% θερμική) έχει ηλεκτρική ισχύ 600kW_p και αντίστοιχη θερμική ισχύ, εξαρτώμενη από διάφορες παραμέτρους.

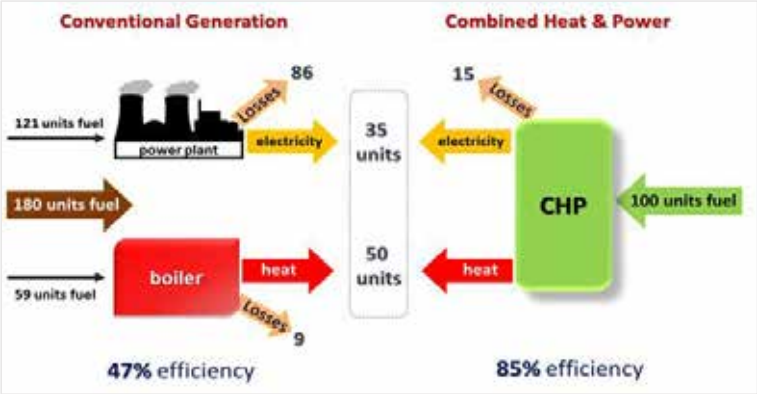
Η παρούσα εργασία διερευνά μια δυναμική αξιοποίηση της μονάδας συμπαραγωγής με την υιοθέτηση της στρατηγικής του εικονικού συμψηφισμού (virtual metering), ώστε αφενός να αυξηθεί ο χρόνος πλήρους λειτουργίας της υφιστάμενης εγκατάστασης (αύξηση του συντελεστή φορτίου "CF") με παράλληλη κάλυψη θερμικών και ψυκτικών φορτίων αφετέρου να ομαλοποιηθεί η καμπύλη παραγωγής της θερμικής μηχανής με μεγιστοποίηση της συνολικής της ενεργειακής απόδοσης. Με τον τρόπο αυτό εκτιμάται ότι η εν λόγω μονάδα μπορεί να καλύψει έως και το 70% των ηλεκτρικών αναγκών των τριών πανεπιστημιουπόλεων του Πα.Δ.Α., ενώ το υπόλοιπο φορτίο -τις περιόδους χαμηλών θερμικών/ψυκτικών φορτίων- μπορεί να καλυφθεί από νέους φωτοβολταϊκούς σταθμούς, αφού προηγηθεί μια συστηματική προσπάθεια εξοικονόμηση ενέργειας στο σύνολο των κτηρίων του Πα.Δ.Α.

Λέξεις Κλειδιά: *Αέρια Θερμοκηπίου, Φυσικό Αέριο, Φωτοβολταϊκά Πλαίσια, Εξοικονόμηση Ενέργειας*

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η τεχνολογία της συμπαραγωγής θεωρείται ως μία από τις κορυφαίες τεχνολογικές επιλογές στα πλαίσια της στρατηγικής της Ευρωπαϊκής Ένωσης, που έχει ως στόχο την εξοικονόμηση και την ορθολογική χρήση της ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, οι μονάδες συμπαραγωγής συνδυάζουν την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, με την ταυτόχρονη παραγωγή θερμότητας ή ψύξης, αξιοποιώντας την ίδια πρωτογενή πηγή ενέργειας [1,2]. Με αυτό τον τρόπο, περιορίζεται η απόρριψη ενέργειας στο περιβάλλον και αξιοποιείται, στο μέγιστο δυνατό βαθμό, η παραγόμενη θερμότητα μέσης ή/και χαμηλής θερμοκρασίας κατά τη διαδικασία ηλεκτροπαραγωγής (Σχήμα 1) [3,4]. Επιπλέον, η αξιοποίηση της συμπαραγωγής περιορίζει τις εκπομπές αέριων ρυπαντών και αερίων του θερμοκηπίου σε ποσοστό έως και 80%, ανάλογα και με το εγχώριο ενεργειακό μίγμα του τομέα της ηλεκτροπαραγωγής [5]. Ωστόσο, καθοριστικό στοιχείο της αποδοτικής λειτουργίας των μονάδων συμπαραγωγής είναι ο ταυτοχρονισμός στη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας και θερμικού ή ψυκτικού φορτίου (PHR).

Ο Δημόσιος τομέας αποτελεί έναν από τους πλέον ενεργοβόρους τομείς με υψηλή κατά κεφαλήν ενεργειακή (ηλεκτρισμός, θέρμανση-ψύξη χώρων) κατανάλωση [6]. Πιο συγκεκριμένα, στα Δημόσια κτίρια όπως οι πανεπιστημιουπόλεις αντιστοιχεί αξιοσημείωτο ποσοστό της εθνικής ενεργειακής κατανάλωσης κυρίως λόγω έλλειψης στρατηγικής εξοικονόμησης ενέργειας [7] ή/και απουσίας ορθής ενεργειακής διαχείρισης. Το γεγονός αυτό έρχεται σε πλήρη αντίθεση με τη δυναμική πολλών πανεπιστημίων, τα οποία υποστηρίζονται από εκπαιδευτικό και ερευνητικό προσωπικό υψηλής επιστημονικής κατάρτισης στον τομέα της ενέργειας και θα έπρεπε να αποτελούν όχι μόνο ένα πρότυπο βέλτιστης ενεργειακής διαχείρισης, αλλά και ζωντανό παράδειγμα τόσο για το σύνολο των φοιτητών τους όσο και για την τοπική κοινωνία. Δυστυχώς όμως, αυτό δεν αντικατοπτρίζει την πλειονότητα των ελληνικών πανεπιστημίων όπου η έλλειψη ενεργειακής και περιβαλλοντικής πολιτικής οδηγεί σε ασυνήθιστα υψηλή κατανάλωση ενέργειας. Εν κατακλείδι, κατά κανόνα τα πανεπιστήμια αγοράζουν ενέργεια από το εθνικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας και καταναλώνουν πετρέλαιο ή φυσικό αέριο για θέρμανση, ενώ παράλληλα χρησιμοποιούν μονάδες κλιματισμού, κυρίως, για ψύξη εσωτερικών χώρων.



***Σχήμα 1**: Γενικό Σχήμα Λειτουργίας Μονάδας Συμπαραγωγής*

Σε αντίθεση με την ανωτέρω γενική συμπεριφορά, το 2014, η τότε Διοίκηση του ΑΕΙ Πειραιά ΤΤ (ένα εκ των δύο Τεχνολογικών Ιδρυμάτων που συμμετείχαν στη δημιουργία του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής) προχώρησε στην κατασκευή μονάδας συμπαραγωγής (ΣΗΘ) αξιοποιώντας τη διαθεσιμότητα του φυσικού αερίου και εντάσσοντας την στις Δημόσιες Επενδύσεις του Υπουργείου Παιδείας. Ακολούθησε η σταδιακή προμήθεια και η εγκατάσταση του βασικού εξοπλισμού και η μονάδα ξεκίνησε τη δοκιμαστική της λειτουργία το καλοκαίρι του 2016, αρχικά συμμετέχοντας με μεγάλο ποσοστό στην κάλυψη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας του Ιδρύματος, και στη συνέχεια στην κάλυψη των αναγκών θέρμανσης των χώρων του. Το 2018, με την ολοκλήρωση των απαραίτητων υποδομών (δίκτυο, συστήματα ελέγχου, σύστημα ψύξης με απορρόφηση κ.λπ.), δόθηκε η δυνατότητα αξιοποίησης της μονάδας και κατά τους θερινούς μήνες, μέσω της κάλυψης σημαντικού μέρους των ψυκτικών φορτίων του Ιδρύματος. Στο πλαίσιο αυτό η παρούσα εργασία εξετάζει αρχικά την υφιστάμενη ενεργειακή κατάσταση του Πα.Δ.Α. και ακολούθως τις προοπτικές συστηματικής αξιοποίησης της μονάδας ΣΗΘ για τη σταδιακή μετάβαση σε ένα πράσινο ενεργειακά πανεπιστήμιο.

2. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΕΙΣ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

Το Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής (Πα.Δ.Α.) αποτελείται στην παρούσα φάση από τρεις διακριτές πανεπιστημιουπόλεις, δηλαδή τον Αρχαίο Ελαιώνα, το Άλσος Αιγάλεω και την πανεπιστημιούπολη Αθηνών.

2.1. Γενική περιγραφή κτηριακών υποδομών

Η Πανεπιστημιούπολη "Αρχαίος Ελαιώνας" (Π-2 ή Campus-2) του Πα.Δ.Α. βρίσκεται στο οικοδομικό τετράγωνο που περικλείεται από τις οδούς Πέτρου Ράλλη και Θηβών και καταλαμβάνει οικόπεδο περίπου 55.000m^2 επί των οποίων υπάρχει οικοδομημένη επιφάνεια περίπου 30.000m^2. Αντίστοιχα, η Πανεπιστημιούπολη Άλσος Αιγάλεω (Π-1) του Πα.Δ.Α. βρίσκεται στο οικοδομικό τετράγωνο που περικλείεται από τις οδούς Δημητσάνας, Αγίου Σπυρίδωνος, Μήλου και Εδέσσης, ενώ συνορεύει με αθλητικές εγκαταστάσεις του Δήμου Αιγάλεω. Η εν λόγω Πανεπιστημιούπολη καταλαμβάνει οικόπεδο περίπου 65.500m^2 επί των οποίων επί του παρόντος υπάρχει οικοδομημένη επιφάνεια περίπου 22.500m^2. Τέλος, η Πανεπιστημιούπολη Αθηνών (Π-3) βρίσκεται επί της Λεωφόρου Αλεξάνδρας, στην περιοχή των Αμπελοκήπων και συνορεύει με τη Γενική Διεύθυνση Δημόσιας Υγείας της Περιφέρειας Αττικής και την Ευρωκλινική Αθηνών. Η Πανεπιστημιούπολη, συνολικής έκτασης 6.000m^2, αποτελείται από ένα, διατηρητέο, κατασκευασμένο το 1931 κεντρικό κτίριο στους χώρους του οποίου στεγάζεται η Σχολή Δημόσιας Υγείας.

Συνοπτικά μπορεί να αναφερθεί ότι η συνολική ηλεκτρική κατανάλωση του Πα.Δ.Α. (πριν την πανδημία) υπερέβαινε τις 7500 MWh_e ετησίως, ενώ τα αντίστοιχα θερμικά φορτία είναι ελαφρώς μεγαλύτερα των αντίστοιχων ηλεκτρικών κατά τους χειμερινούς μήνες. Κατά τη θερινή περίοδο τα ψυκτικά φορτία καλύπτονται είτε με κεντρικές μονάδες κλιματισμού είτε με αυτόνομες κλιματιστικές μονάδες επιβαρύνοντας σημαντικά τη ζήτηση ηλεκτρικού φορτίου. Σαν οικονομικό αποτέλεσμα, ο συνολικός προϋπολογισμός του πανεπιστημίου επιβαρύνεται ετησίως με περισσότερο από ένα εκατομμύριο ευρώ (περίπου 1.250.000 € για το 2019) για κάλυψη των ενεργειακών του αναγκών. Στη συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά στοιχεία σχετικά με την τρέχουσα ενεργειακή κατάσταση του πανεπιστημίου.

2.2. Ηλεκτρικές καταναλώσεις Πα.Δ.Α.

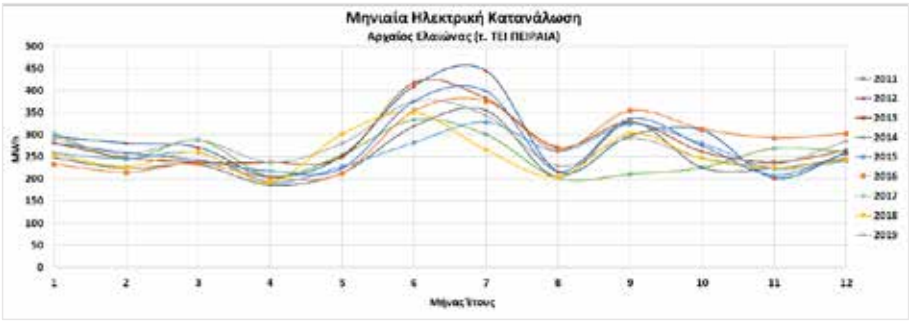
Από τα στοιχεία των αρμόδιων υπηρεσιών του τέως ΑΕΙ Πειραιά ΤΤ και νυν Πα.Δ.Α. έγινε συστηματική προσπάθεια για την καταγραφή των καταναλώσεων ηλεκτρικής ενέργειας της Πανεπιστημιούπολης, οπότε και παρουσιάζονται τα σχετικά στοιχεία κατά την τελευταία δεκαετία (2011-2019). Ειδικότερα στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται η συνολική κατανάλωση του Αρχαίου Ελαιώνα, λαμβάνοντας υπόψιν ότι από τον Ιούλιο 2016 έως και τον Σεπτέμβριο 2017 λειτούργησε συστηματικά η μονάδα Συμπαραγωγής (ΣΗΘ) της Πανεπιστημιούπολης ονομαστικής ηλεκτρικής ισχύος 600kW_e υπό την εποπτεία της εταιρείας εγκατάστασης της ΣΗΘ. Στο επόμενο χρονικό διάστημα, απουσία ειδικευμένου στελέχους εποπτείας και λειτουργίας της ΣΗΘ, η αξιοποίηση της εγκατάστασης είναι περιορισμένη.

***Σχήμα 2**: Διαχρονική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας Πανεπιστημιούπολης Αρχαίου Ελαιώνα (Π-2) για το χρονικό διάστημα 2011-2019.*

Από τα στοιχεία του Σχήματος 2 προκύπτει ότι κατά την τελευταία δεκαετία η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας παρουσιάζει μικρές διακυμάνσεις (3000-3450 MWh_e) γύρω από την τιμή των 3250MWh_e, με μια μικρή μείωση το 2018, πιθανόν λόγω της διαδικασίας απορρόφησης του ΑΕΙ Πειραιά ΤΤ στο νεοσύστατο Πα.Δ.Α. και τις αλλαγές που αυτή επέφερε. Από τα διαθέσιμα στοιχεία η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας φαίνεται να μεταβάλλεται υπό κανονικές συνθήκες μεταξύ των 3000 και των

3450MWh$_e$. Αντίθετα το 2020, λόγω της περιορισμένης χρήσης της πανεπιστημιούπολης εξαιτίας της πανδημίας, η συνολική κατανάλωση ισούται με μόλις 2350MWh$_e$, μειωμένη κατά 30% σε σχέση με αυτή της προηγούμενης χρονιάς.

Ακολούθως, παρουσιάζεται στο Σχήμα 3 η τυπική μηνιαία διανομή ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στις εγκαταστάσεις της Π-2 βάσει των δεδομένων της τελευταίας δεκαετίας. Από τα διαθέσιμα στοιχεία προκύπτει ότι η μέση μηνιαία κατανάλωση ακολουθεί για όλα τα έτη ομοιόμορφη διανομή, με μέση μηνιαία ζήτηση περίπου 280MWh$_e$. Αντίστοιχα, η μηνιαία ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας είναι σχετικά χαμηλή του χειμερινούς μήνες (στα επίπεδα των 200-250MWh$_e$) και αρκετά αυξημένη τους θερινούς μήνες (Ιούνιος-Σεπτέμβριος) που σε ορισμένες περιπτώσεις πλησιάζει ή και υπερβαίνει τις 400MWh$_e$, λόγω της σημαντικής χρήσης κλιματιστικών και υπογραμμίζοντας την ανάγκη της ενεργοποίησης της επιλογής για ψύξη της ΣΗΘ [8], ενώ αναμενόμενη είναι η μείωση της ζήτησης κατά τον Αύγουστο (*περίοδος επίσημων θερινών διακοπών για το προσωπικό του Πανεπιστημίου*).

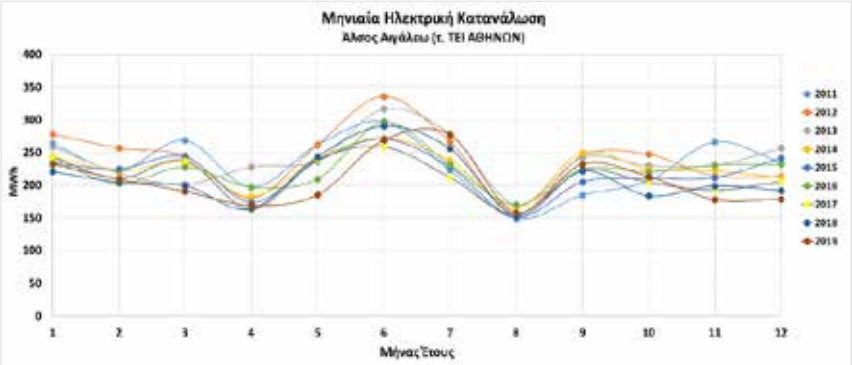


Σχήμα 3*: Μηνιαία διανομή κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στην Π-2 για την τελευταία δεκαετία.*

Από τα αντίστοιχα στοιχεία των αρμόδιων υπηρεσιών του τέως ΤΕΙ Αθηνών και νυν Πα.Δ.Α. έγινε συστηματική προσπάθεια για την καταγραφή των καταναλώσεων ηλεκτρικής ενέργειας της Πανεπιστημιούπολης, οπότε και παρουσιάζονται τα σχετικά στοιχεία κατά την τελευταία δεκαετία (2011-2019). Να σημειωθεί ότι λόγω της μη ύπαρξης μονάδας ΣΗΘ (και του αντίστοιχου ηλεκτρονικού συστήματος καταγραφής) στην Π-1 δεν υπάρχουν αναλυτικότερα στοιχεία για τα επιμέρους κτήρια της Πανεπιστημιούπολης "Άλσος Αιγάλεω".

Σχήμα 4*: Διαχρονική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας Πανεπιστημιούπολης Άλσος Αιγάλεω (Π-1) για το χρονικό διάστημα 2011-2019.*

Από τα στοιχεία του Σχήματος 4 προκύπτει ότι κατά την τελευταία δεκαετία η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας παρουσιάζει μικρές διακυμάνσεις γύρω από την τιμή των 2680MWh$_e$, ενώ καταγράφεται μικρή μείωση τα τελευταία τέσσερα χρόνια (2016-2019), κατά περίπου 7%. Από τα διαθέσιμα στοιχεία η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας φαίνεται να μεταβάλλεται μεταξύ των 2500 και των 2900MWh$_e$. Ειδικότερα για το 2020 η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας δεν υπερβαίνει τα 2050MWh$_e$.

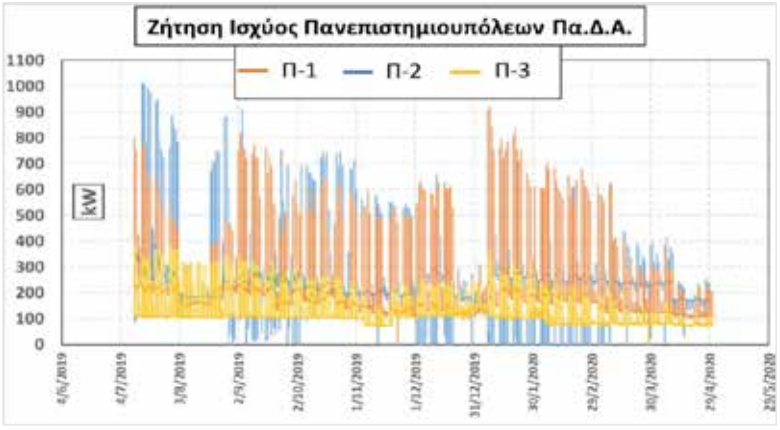


***Σχήμα** 5: Μηνιαία διανομή κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στην Π-1 για την τελευταία δεκαετία.*

Ολοκληρώνοντας, παρουσιάζεται στο Σχήμα 5 η τυπική μηνιαία διανομή ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στις εγκαταστάσεις της Π-1 βάσει των δεδομένων της τελευταίας δεκαετίας. Βάσει των διαθέσιμων στοιχείων προκύπτει ότι η μέση μηνιαία κατανάλωση ακολουθεί για όλα τα έτη ομοιόμορφη διανομή, με μέση μηνιαία ζήτηση περίπου 225MWh$_e$. Αντίστοιχα, η μηνιαία ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας είναι σχετικά σταθερή για τους περισσότερους μήνες (στα επίπεδα των 160-250MWh$_e$) και αρκετά αυξημένη τους μήνες Ιανουάριο και Ιούνιο.

Λαμβάνοντας υπόψιν ότι η Εθνική Σχολή Δημόσιας Υγείας (Π-3) έχει πρόσφατα ενταχθεί στο Πα.Δ.Α. (οπότε δεν υφίστανται προς το παρόν διαθέσιμα μακροχρόνια ιστορικά στοιχεία) και αξιοποιώντας τα πρόσφατα δεδομένα προκύπτει ότι η (Π-3) έχει σαφώς μικρότερη συμμετοχή στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας (περίπου 1500 MWh$_e$ για το 2019). Από τη σύνθεση των διαθέσιμων στοιχείων προκύπτει ότι η συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας του Πα.Δ.Α. κυμαίνεται στις 7000-7800 MWh$_e$, ενώ για το 2020 η συνολική κατανάλωση υποχώρησε στις 5300 MWh$_e$, λόγω της πανδημίας.

Για την πλέον αντιπροσωπευτική ανάλυση των φορτίων του Πα.Δ.Α., ειδικότερα μετά τη συνένωση των επιμέρους Ιδρυμάτων και τη δημιουργία του νέου Πανεπιστημίου, αξιοποιούνται τα επίσημα στοιχεία μετρήσεων στους αντίστοιχους μετασχηματιστές των Π-1, Π-2 και Π-3, οπότε είναι διαθέσιμη και η στιγμιαία ζήτηση φορτίου. Στο Σχήμα 6 παρουσιάζονται οι εισροές ενεργού ισχύος από τους μετασχηματιστές του ηλεκτρικού δικτύου (πάροχος η ΔΕΗ) από τη στιγμή έναρξης ταυτόχρονης καταγραφής καταναλώσεων των τριών Πανεπιστημιουπόλεων, μετά την ένταξη τους στο Πα.Δ.Α.



***Σχήμα 6:** Συγκριτική παρουσίαση ζήτησης φορτίου των Π-1, Π-2 και Π-3 για το χρονικό διάστημα Ιούλιος 2019 έως Απρίλιος 2020 ως συνιστώσες του Πα.Δ.Α.*

Άξια προσοχής είναι η διαφοροποίηση στη ζήτηση ηλεκτρικού φορτίου μεταξύ των δύο πανεπιστημιουπόλεων, όπου είναι εμφανής η συμμετοχή της ΣΗΘ στην Π-2 έναντι της Π-1, η οποία λειτουργεί μόνο με την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας από το εθνικό ηλεκτρικό δίκτυο. Από τα στοιχεία του Σχήματος 6 παρατηρούμε ότι τα μέγιστα των τριών πανεπιστημιουπόλεων έχουν αρκετές κοινές χρονικές περιόδους αν και τα μέγιστα της Π-1 εντοπίζονται και τους χειμερινούς μήνες λόγω αυξημένων αναγκών θέρμανσης. Αντίστοιχα, τα μέγιστα της Π-2 καταγράφονται κυρίως το καλοκαίρι λόγω αυξημένης ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας από τη λειτουργία των κλιματιστικών καθώς την περίοδο του Ιουλίου 2019 δεν είχε τεθεί σε λειτουργία η μονάδα ψύξης της ΣΗΘ. Επιπλέον, τα καταγεγραμμένα μέγιστα των Π-1, Π-2 και Π-3 ισούνται με 920 kW, 1000kW και 420kW αντίστοιχα.

2.3. Θερμικές καταναλώσεις Πα.Δ.Α.

Η Πανεπιστημιούπολη Άλσος Αιγάλεω (Π-1) καλύπτει τις ανάγκες της σε θέρμανση και ζεστό νερό με τη χρήση λεβήτων φυσικού αερίου καθώς και με μικρές αυτόνομες κλιματιστικές μονάδες. Αντίστοιχα, για τη ψύξη των κτηρίων της Π-1 χρησιμοποιούνται ορισμένες κεντρικές κλιματιστικές μονάδες και αρκετές μικρές αυτόνομες κλιματιστικές συσκευές. Αναφερόμενοι στις καταναλώσεις φυσικού αερίου της Π-1 τη δεκαετία 2010-2019, αυτές κυμαίνονται μεταξύ 100,000 και 170,000 Nm^3, με πρόσφατη κατανάλωση για το 2019 ίση περίπου με 120,000 Nm^3. Αντίστοιχα, το ισοδύναμο ενεργειακό φορτίο του καταναλισκόμενου φυσικού αερίου, Σχήμα 7, μεταβάλλεται μεταξύ των 1.1 και 2.0 GWh_{th}.

***Σχήμα 7**: Ετήσια ενεργειακή κατανάλωση φυσικού αερίου στην Π-1 του Πα.Δ.Α.*

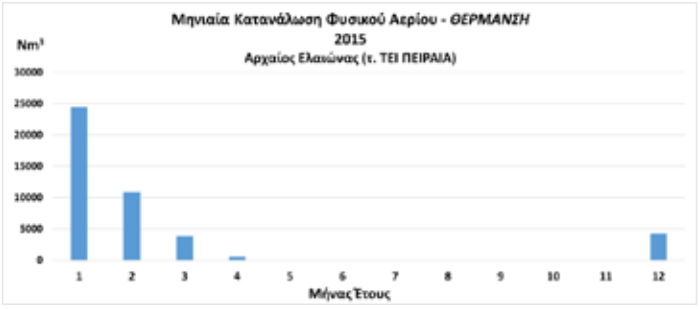
***Σχήμα 8**: Μηναία κατανάλωση φυσικού αερίου στην Π-1 του Πα.Δ.Α. για το 2019.*

Στο Σχήμα 8 παρουσιάζεται και η μηνιαία κατανάλωση φυσικού αερίου της Π-1 για το 2019.

Αντίστοιχα, η Πανεπιστημιούπολη Αρχαίος Ελαιώνας (Π-2) καλύπτει από τις αρχές της τρέχουσας δεκαετίας τις ανάγκες της σε θέρμανση και ζεστό νερό με τη χρήση λεβήτων φυσικού αερίου καθώς και με μικρές αυτόνομες κλιματιστικές μονάδες. Παράλληλα, για τη ψύξη των κτηρίων της Π-2 χρησιμοποιούνται ορισμένες κεντρικές κλιματιστικές μονάδες και αρκετές μικρές αυτόνομες κλιματιστικές συσκευές. Τα τελευταία τρία χρόνια γίνονται συστηματικές προσπάθειες για κάλυψη των αναγκών της Π-2 με την απορριπτόμενη θερμότητα της ΣΗΘ, ενώ εδώ και ένα χρόνο έχει εγκατασταθεί και ο εξοπλισμός για την κάλυψη των αναγκών σε ψύξη των κτηρίων της Π-2 [9].

***Σχήμα 9**: Ετήσια ενεργειακή κατανάλωση φυσικού αερίου στην Π-2 του Πα.Δ.Α., συμπεριλαμβανομένης και της κατανάλωσης της ΣΗΘ.*

Αναφερόμενοι τώρα στις καταναλώσεις φυσικού αερίου της Π-2 τη δεκαετία 2010-2019 αυτές κυμαίνονται για αποκλειστική χρήση θέρμανσης μεταξύ 50,000 και 100,000 Nm^3, ενώ η λειτουργία της ΣΗΘ προσθέτει κατανάλωση έως και 500,000 Nm^3, για τη λειτουργία της ΣΗΘ για το μισό περίπου έτος (2016 ή 2017). Η πρόσφατη κατανάλωση για το 2019 είναι ίση περίπου με 200,000 Nm^3, κατανεμημένη σε αναλογία 110-90 σε κεντρική θέρμανση και περιορισμένη λειτουργία ΣΗΘ Αντίστοιχα, το ισοδύναμο ενεργειακό φορτίο του καταναλισκόμενου φυσικού αερίου (Σχήμα 9) μεταβάλλεται μεταξύ των 0.5 και 1.5 GWh_{th} για τη θέρμανση και έως 5 GW_{th} για τη λειτουργία της ΣΗΘ (περίπου έξι μήνες ανά έτος).

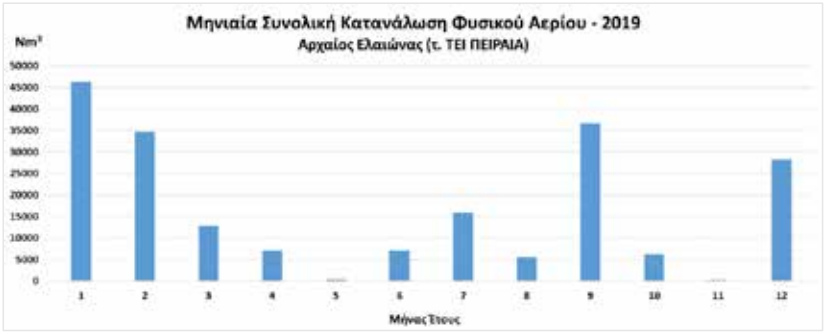


***Σχήμα 10**: Μηνιαία κατανάλωση φυσικού αερίου στην Π-2 του Πα.Δ.Α. για το 2015.*

***Σχήμα 11**: Μηνιαία κατανάλωση φυσικού αερίου στην Π-2 του Πα.Δ.Α. από Ιούλιος 2016 έως Ιούνιος 2017.*

Στο Σχήμα 10, παρουσιάζεται η μηνιαία κατανάλωση φυσικού αερίου της Π-2 για το 2015, όπου το 2015 είναι το πλέον πρόσφατο έτος χωρίς τη λειτουργία της ΣΗΘ. Από τα διαθέσιμα στοιχεία (πιθανόν λόγω και των μετεωρολογικών δεδομένων) η κατανάλωση φυσικού αερίου κατά το 2015 εντοπίζεται κυρίως

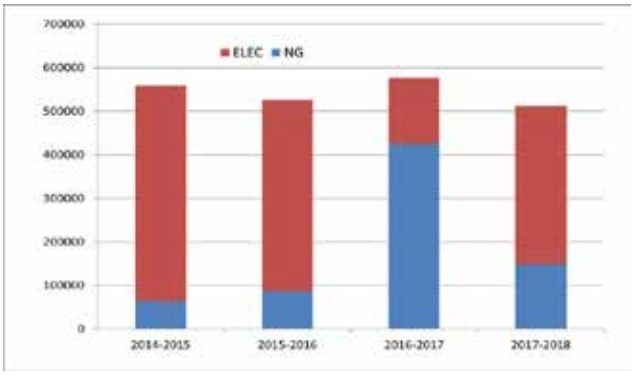
το μήνα Ιανουάριο 2015, ενώ κατά τους μήνες Απρίλιος έως και Νοέμβριος του 2015 η κατανάλωση είναι μηδενική. Αντίστοιχα στο Σχήμα 11 δίνεται η μηνιαία κατανάλωση φυσικού αερίου το χρονικό διάστημα Ιούλιος 2016-Ιούνιος 2017, όποτε λειτούργησε συστηματικά η μονάδα ΣΗΘ, ενώ στο Σχήμα 12 δίνεται η μηνιαία κατανάλωση φυσικού αερίου της Π-2 για το 2019. Όπως παρατηρείται για ένα συνολικό έτος λειτουργίας της ΣΗΘ η ετήσια κατανάλωση φυσικού αερίου, Σχήμα 11, πλησιάζει τα 800,000Nm^3 και είναι περίπου σταθερή με εξαίρεση τον Αύγουστο του 2016. Αντιθέτως, κατά το 2019 η περιορισμένη και σποραδική χρήση της ΣΗΘ δίνει μια τελείως μεταβαλλόμενη κατανάλωση φυσικού αερίου με μηνιαίες τιμές, που τον Ιανουάριο του 2019 υπερβαίνουν και τα 45,000Nm^3.



***Σχήμα 12**: Μηνιαία κατανάλωση φυσικού αερίου στην Π-2 του Πα.Δ.Α. για το 2019.*

2.4. Κόστος καταναλώσεων ηλεκτρικής ενέργειας και φυσικού αερίου Πα.Δ.Α.

Αξιοποιώντας τα διαθέσιμα οικονομικά στοιχεία, τα οποία αναφέρονται στο συνολικό ενεργειακό κόστος της Π-2, συμπεριλαμβάνοντας και το σχετικό κόστος θέρμανσης με χρήση φυσικού αερίου από τους λέβητες της Π-2, Σχήμα 13, προκύπτει ότι για τη λειτουργία των εγκαταστάσεων της Π-2 απαιτούνται περίπου 550,000 έως 600,000€ ετησίως εκ των οποίων η ηλεκτρική ενέργεια αντιπροσωπεύει (ανάλογα και τα μετεωρολογικά δεδομένα κάθε έτους) από 85% έως και 90% του συνολικού κόστους. Συνεπώς, μπορεί να θεωρηθεί ως δεδομένο ότι υπό τις υφιστάμενες συνθήκες λειτουργίας της Π-2, ο προϋπολογισμός του Πα.ΔΑ. θα πρέπει να διαθέτει περίπου 500,000 ευρώ ετησίως για την κάλυψη της ηλεκτρικής κατανάλωσης των περίπου 3250MWh$_e$. Ακολούθως, βάσει των διαθέσιμων ιστορικών στοιχείων, η προμήθεια φυσικού αερίου της Π-2 πριν την έναρξη λειτουργίας της ΣΗΘ έχει ένα μέσο ετήσιο κόστος περίπου 70,000 ευρώ, εξαρτώμενο φυσικά από τις μετεωρολογικές συνθήκες κάθε έτους καθώς και από την αντίστοιχη τιμή του φυσικού αερίου στη χώρα μας και διεθνώς. Κατά τα έτη μερικής (περίπου εξάμηνη λειτουργία) της ΣΗΘ το συνολικό κόστος προμήθειας φυσικού αερίου υπερβαίνει τα 250,000 ευρώ ετησίως.



***Σχήμα 13**: Συνολικό Ενεργειακό Κόστος Π-2 (σε ευρώ) αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας και φυσικού αερίου (μονάδα ΣΗΘ και κάλυψη των αναγκών θέρμανσης).*

Αντίστοιχα, βάσει των διαθέσιμων ιστορικών στοιχείων, η προμήθεια φυσικού αερίου της Π-1 έχει ένα μέσο ετήσιο κόστος περίπου 100,000 ευρώ, εξαρτώμενο φυσικά από τις μετεωρολογικές συνθήκες κάθε έτους καθώς και από την αντίστοιχη τιμή του φυσικού αερίου στη χώρα μας και διεθνώς. Παράλληλα το ετήσιο κόστος κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας ισούται με περίπου 400,000 ευρώ.

Ολοκληρώνοντας, το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας για την Π-3 το 2019 πλησιάζει τα 200,000 ευρώ, οπότε με άθροιση του επιμέρους ενεργειακού κόστους των τριών πανεπιστημιουπόλεων του Πα.Δ.Α. προκύπτει ένα συνολικό ενεργειακό κόστος (ηλεκτρική ενέργεια και φυσικό αέριο) που υπερβαίνει τα 1,200,000 ευρώ ετησίως. Αξίζει να τονισθεί ότι ακόμα και για το 2020 με την ελάχιστη λειτουργία των εγκαταστάσεων του πανεπιστημίου το συνολικό ενεργειακό κόστος προσεγγίζει τα 900,000 ευρώ.

3. ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΛΥΣΗ ΓΙΑ ΕΝΑ ΠΡΑΣΙΝΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

Για την περιβαλλοντικά ορθή και οικονομικά αποδεκτή αντιμετώπιση του ενεργειακού προβλήματος το Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής (Πα.Δ.Α.) έχει υιοθετήσει τη σταδιακή μετάβαση προς ένα πράσινο πανεπιστήμιο, αξιοποιώντας υφιστάμενες υποδομές και επενδύοντας σε νέες καθαρές τεχνολογίες. Στο πλαίσιο αυτό από τον Ιούνιο του 2016 έχει εγκατασταθεί (Σχήμα 14) σύγχρονη μονάδα Συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας-θερμότητας και ψύξης, η οποία λειτουργεί περιοδικά (έως σήμερα δεν έχει υπερβεί τις 12000 ώρες λειτουργίας) με χρήση φυσικού αερίου υπό το παλαιότερο νομικό καθεστώς της αυτοπαραγωγής, για την κάλυψη αποκλειστικά και μόνο των αναγκών της Πανεπιστημιούπολης του Αρχαίου Ελαιώνα (τ. ΑΕΙ Πειραιά ΤΤ). Η συγκεκριμένη μονάδα υψηλής ενεργειακής απόδοσης (38% ηλεκτρική απόδοση και 50% θερμική) έχει ηλεκτρική ισχύ 600kW$_p$ και αντίστοιχη θερμική ισχύ, εξαρτώμενη βέβαια από διάφορες παραμέτρους.

***Σχήμα 14**: Η μονάδα Συμπαραγωγής (ΣΗΘ) του Πα.Δ.Α.*

Πιο συγκεκριμένα, η μονάδα συμπαραγωγής (Σχήμα 14), η οποία πλέον εντάσσεται στις υποδομές του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, έχει ονομαστική ηλεκτρική ισχύ 600 kW$_e$, θερμική ισχύ 658 kW$_{th}$ και ψυκτική ισχύ 844 kW, έχει δε τη δυνατότητα να καλύψει πλήρως τις ηλεκτρικές καταναλώσεις της Πανεπιστημιούπολης του Αρχαίου Ελαιώνα (Π-2) αλλά και το μεγαλύτερο μέρος των ηλεκτρικών φορτίων του Πα.Δ.Α. Παράλληλα, η σωστή αξιοποίηση της παρέχει τη δυνατότητα της πλήρους κάλυψης σημαντικού μέρους των αναγκών θέρμανσης και ψύξης, χωρίς την κατανάλωση πρόσθετης ενέργειας από τους λέβητες και τα κλιματιστικά της Πανεπιστημιούπολης "Αρχαίος Ελαιώνας".

Αναλυτικότερα, το σύστημα (ΣΗΘ), Σχήμα 15, αποτελείται από τα παρακάτω κύρια στοιχεία:

1. Έναν εμβολοφόρο τετράχρονο, υδρόψυκτο κινητήρα εσωτερικής καύσεως φυσικού αερίου με υπερπληρωτή, ονομαστική ταχύτητα περιστροφής 1500 rpm, και τυπική κατανάλωση 0.25Nm^3 φυσικού αερίου ανά παραγόμενη κιλοβατώρα ηλεκτρικής ενέργειας (0.25 Nm^3/kWh$_e$).
2. Μία σύγχρονη τριφασική ηλεκτρογεννήτρια ονομαστικής ισχύος 750 kVA, 50 Hz και τάσεως εξόδου 400V.
3. Ενσωματωμένο σύστημα εναλλακτών θερμότητας για την ανάκτηση της αποβαλλόμενης θερμότητας, ισχύος 658 kW$_{th}$ και συστήματος αερόψυκτων ψυκτών επείγουσας αποβολής του θερμικού φορτίου του κινητήρα.

4. Πίνακα αυτοματισμού που παρέχει στη μονάδα ΣΗΘ τη δυνατότητα παράλληλης λειτουργίας και συγχρονισμού με το εθνικό ηλεκτρικό δίκτυο.
5. Μια ψυκτική μηχανή απορρόφησης (Absorption chiller), αυτόματο σύστημα αποσκλήρυνσης ύδατος του συστήματος, αυτόματο σύστημα πυρόσβεσης με κατάκλιση CO_2, μετασχηματιστή ανύψωσης της τάσης, ένα μικρό αντλιοστάσιο για την εξυπηρέτηση του δικτύου τηλεθέρμανσης, καθώς και έναν πύργο ψύξεως ύδατος.

***Σχήμα 15**: Θέση Μονάδας Συμπαραγωγής στην Πανεπιστημιούπολη του Αρχαίου Ελαιώνα*

Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από το σύστημα, μετά από κατάλληλη ανύψωση με ξεχωριστό μετασχηματιστή ξηρού τύπου (400V/20kV) καταναλώνεται υπό τη μορφή ενέργειας υψηλής τάσης 20 kV / 50 Hz, ενώ η θερμική ενέργεια διοχετεύεται για την κάλυψη αναγκών θέρμανσης και ψύξης των κτηρίων της Πανεπιστημιούπολης του Αρχαίου Ελαιώνα, παρεχόμενη στις αντίστοιχες θέσεις συλλεκτών θερμού και ψυχρού ύδατος αυτών. Σε περιπτώσεις που η παραγόμενη θερμική ενέργεια δεν καταναλώνεται από τα συστήματα θέρμανσης και ψύξης της Πανεπιστημιούπολης, απορρίπτεται στο περιβάλλον, μέσω των εγκατεστημένων αερόψυκτων ψυκτών επείγουσας αποβολής της μονάδας, χάνοντας όμως στην περίπτωση αυτή το πλεονέκτημα της συμπαραγωγής.

Η μονάδα λειτουργεί παράλληλα και σε συγχρονισμό με το Εθνικό δίκτυο, επιτρέποντας την αμφίδρομη ροή ηλεκτρικού ρεύματος από το Κεντρικό Σύστημα, το οποίο δύναται να καλύπτει μέρος του φορτίου της Πανεπιστημιούπολης, αλλά και να δέχεται την περίσσεια της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Σε περιπτώσεις διακοπής της ηλεκτροδότησης από τη Δ.Ε.Η., η μονάδα έχει τη δυνατότητα (μέσω των διαθέσιμων κατάλληλων αυτοματισμών προστασίας) αυτόνομης λειτουργίας (σε μορφή Island Mode), ηλεκτροδοτώντας την πανεπιστημιούπολη του Αρχαίου Ελαιώνα, σε συνεργασία με το υφιστάμενο ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος ΕΗΖ 800 kVA.

4. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗΣ ΛΥΣΗΣ

4.1. Υπολογισμός του Συντελεστή Αξιοποίησης (Capacity Factor - CF)

Σύμφωνα με την υφιστάμενη κατάσταση του αυτοπαραγωγού η μονάδα συμπαραγωγής είναι υποχρεωμένη να ακολουθεί συνεχώς την έντονα μεταβαλλόμενη, καμπύλη ζήτησης της (Π-2), Σχήμα 6, με αποτέλεσμα όταν η ζήτηση ισχύος υπερβαίνει τα 600kW_e το Πα.Δ.Α. να υποχρεούται να αγοράζει ηλεκτρική ενέργεια από τον πάροχο μέσω του Κεντρικού Δικτύου. Αντιθέτως, εάν η παραγωγή της ΣΗΘ υπερβεί την κατανάλωση της (Π-2) η τυχόν περίσσεια ενέργειας απορροφάται δωρεάν από το εθνικό

δίκτυο, δηλαδή πρακτικά χαρίζεται στο Κεντρικό Σύστημα. Το γεγονός αυτό αποθαρρύνει μέχρι σήμερα τους χειριστές της ΣΗΘ να λειτουργούν συνεχώς την εγκατάσταση, ιδιαίτερα σε μερικά φορτία, διότι αφενός μειώνεται η απόδοση της μηχανής ενώ υπάρχει ο κίνδυνος άσκοπης χρέωσης της καταναλισκόμενης ποσότητας φυσικού αερίου, το οποίο τελικά καταναλώνεται χωρίς αντίστοιχη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για τις εγκαταστάσεις του Πα.Δ.Α.

Για την αντιμετώπιση της συγκεκριμένης κατάστασης η διοίκηση του Πανεπιστημίου αποφάσισε τη δυναμική αξιοποίηση της μονάδας συμπαραγωγής με την υιοθέτηση της στρατηγικής αρχικά του συμψηφισμού (net-metering) και στη συνέχεια του εικονικού συμψηφισμού (virtual metering). Με την επιλογή αυτή αποσυνδέεται σε στιγμιαία βάση η εξάρτηση της παραγωγής της ΣΗΘ από τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας της (Π-2), ενώ επιτρέπεται ο συνολικός ενεργειακός συμψηφισμός σε ετήσια βάση, δηλαδή η ετήσια παραγωγή της ΣΗΘ μπορεί να ισοσταθμίσει (υπό συγκεκριμένους όρους τιμολόγησης) την κατανάλωση ενέργειας της (Π-2). Πιο συγκεκριμένα, λαμβάνοντας υπόψιν τη συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας της (Π-2), η οποία μεταβάλλεται μεταξύ 2500 και 3500MWh$_e$ ετησίως (Σχήμα 2) και εφαρμόζοντας την εξίσωση (1) ορισμού του συντελεστή αξιοποίησης (CF-Capacity Factor) της ΣΗΘ, δηλαδή:

$$CF = E_y/(8760.P_o) \quad (1)$$

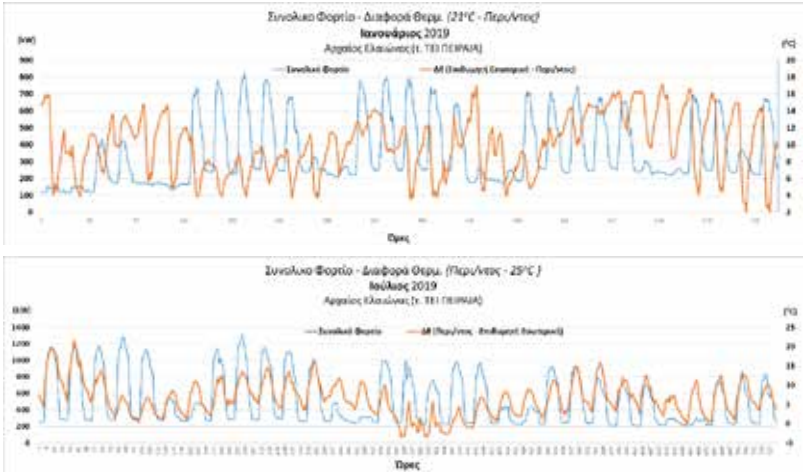
όπου με "P_o" (=600kW$_e$) συμβολίζεται η ονομαστική ηλεκτρική ισχύ της ΣΗΘ, προκύπτει ότι ο συντελεστής αξιοποίησης "CF" της εγκατάστασης για την κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών της (Π-2) κυμαίνεται μεταξύ 47.6% και 66.6%. Συνεπώς, εάν η ΣΗΘ λειτουργεί με το 50% περίπου των δυνατοτήτων της έχει τη ικανότητα μέσω του ενεργειακού συμψηφισμού να καλύπτει τις τρέχουσες ηλεκτρικές ανάγκες της (Π-2). Να σημειωθεί στο σημείο αυτό ότι συστηματικές και σημαντικές ενεργειακές παρεμβάσεις εξοικονόμησης και ορθολογικής χρήσης της ενέργειας στις εγκαταστάσεις του Πα.Δ.Α. αναμένεται να περιορίσουν σημαντικά (έως και 30%) τη συνολική ηλεκτρική κατανάλωση των εγκαταστάσεων του πανεπιστημίου. Επιπλέον, για την περίπτωση της (Π-2) η αξιοποίηση των δυνατοτήτων παροχής θερμότητας και κυρίως ψύξης λόγω της λειτουργίας της ΣΗΘ, θα περιορίσει σημαντικά τη λειτουργία των αυτόνομων αλλά και των κεντρικών κλιματιστικών μονάδων, με αποτέλεσμα τον περαιτέρω περιορισμό της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας κατά τουλάχιστον 20%. Λαμβάνοντας τώρα υπόψιν ότι η Πανεπιστημιούπολη Αθηνών (Π-3) βρίσκεται στο κέντρο της Αθήνας και δεν διαθέτει ούτε τη δυνατότητα εγκατάστασης ΣΗΘ ούτε και (λόγω της σκίασης των παρακείμενων κτηρίων) την προοπτική εγκατάστασης Φ/Β πλαισίων, αποφασίστηκε η επέκταση της λειτουργίας της υφιστάμενης μονάδας ΣΗΘ από την επιλογή ενεργειακού συμψηφισμού σε επιλογή εικονικού συμψηφισμού. Το αποτέλεσμα της επιλογής αυτής ισοδυναμεί με την απόφαση η ΣΗΘ της (Π-2) να καλείται να καλύψει το νέο συνολικό φορτίο που αποτελεί το άθροισμα των καταναλώσεων ηλεκτρικής ενέργειας των (Π-2) και (Π-3), δηλαδή ετησίως 3500 έως 5000 MWh$_e$. Εφαρμόζοντας και στην περίπτωση αυτή την εξίσωση (1) προκύπτει ότι ο νέος ο συντελεστής αξιοποίησης "CF$_{new}$" της εγκατάστασης για την κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών της (Π-2) και της (Π-3) κυμαίνεται μεταξύ 66.6% και 95.1%.

Ανακεφαλαιώνοντας το πρώτο στάδιο της ενεργειακής μας ανάλυσης είναι προφανές ότι με την επιλογή του εικονικού ενεργειακού συμψηφισμού αναμένεται αφενός να αυξηθεί ο χρόνος πλήρους λειτουργίας της υφιστάμενης εγκατάστασης (αύξηση του συντελεστή φορτίου "CF") με παράλληλη κάλυψη θερμικών και ψυκτικών φορτίων αφετέρου να ομαλοποιηθεί η καμπύλη παραγωγής της θερμικής μηχανής με μεγιστοποίηση της συνολικής της ενεργειακής απόδοσης.

4.2. Μελέτη Ταυτοχρονισμού Ηλεκτρικής και Θερμικής/Ψυκτικής Ζήτησης

Όπως έχει σαφώς επισημανθεί από την παρουσίαση της προτεινόμενης λύσεως της Συμπαραγωγής, η επιτυχία της (ενεργειακή-οικονομική) εξαρτάται σημαντικά από την ταυτόχρονη κατά το δυνατόν κάλυψη ηλεκτρικών και θερμικών/ψυκτικών καταναλώσεων, ώστε αξιοποιώντας το ίδιο πρωτογενές καύσιμο να καλύπτεται το σύνολο των ενεργειακών αναγκών του καταναλωτή. Στην περίπτωσή του Πα.Δ.Α. μελετάται ο ταυτοχρονισμός ζήτησης κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας των (Π-2) και (Π-3) με τη ζήτηση θερμικού ή ψυκτικού φορτίου των κτηρίων της (Π-2), δεδομένου ότι λόγω των μεγάλων αποστάσεων μεταξύ των δύο πανεπιστημιουπόλεων, μόνο η κάλυψη των θερμικών/ψυκτικών αναγκών της (Π-2) είναι δυνατή από τα «θερμικά απόβλητα» της ΣΗΘ. Στο πλαίσιο αυτό διεξήχθησαν κατάλληλες μετρήσεις ζήτησης ηλεκτρικής και θερμικής/ψυκτικής ενέργειας στις εγκαταστάσεις της (Π-2), ενδεικτικά δε αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 16. Από την ανάλυση των πλέον πρόσφατων και αντικειμενικών δεδομένων κατά τη χειμερινή περίοδο (μήνας Ιανουάριος) προκύπτει ότι η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας δεν ταυτίζεται με την αντίστοιχη ζήτηση θερμότητας, καθώς τα θερμικά φορτία είναι υψηλά τις πρωινές και τις απογευματινές-βραδινές ώρες, ενώ η ζήτηση ηλεκτρικού φορτίου μεγιστοποιείται τις μεσημβρινές και βραδινές ώρες. Αντιθέτως, κατά τη θερινή περίοδο (μήνας Ιούλιος)

η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας και ψυκτικού φορτίου ταυτίζονται σημαντικά κυρίως τις μεσημβρινές ώρες, ενώ λόγω και της μεγαλύτερης διάρκειας της ημέρας αλλά και της μειωμένης δραστηριότητας περιορισμένη ζήτηση καταγράφεται τη θερινή περίοδο τις απογευματινές και βραδινές ώρες τόσο για το ηλεκτρικό όσο και για το θερμικό φορτίο.



***Σχήμα 16**: Ζήτηση ηλεκτρικού και θερμικού/ψυκτικού φορτίου στις εγκαταστάσεις της Π-2.*

Αξιοποιώντας τα δεδομένα της ανάλυσης ταυτοχρονισμού ζήτησης ηλεκτρικού και θερμικού-ψυκτικού φορτίου στην (Π-2) και λαμβάνοντας υπόψιν ότι οι εγκαταστάσεις της (Π-3) καλύπτονται συνολικά με ηλεκτρική ενέργεια (και για θέρμανση-ψύξη) προκύπτει ότι σε πρώτη προσέγγιση η βέλτιστη λειτουργία της ΣΗΘ για ταυτόχρονη κάλυψη ηλεκτρικών και θερμικών-ψυκτικών φορτίων επιτυγχάνεται με συντελεστή αξιοποίησης μικρότερο του 55%, δηλαδή $CF_{new} \leq 0.55$. Είναι προφανές ότι το όριο αυτό μπορεί να μεταβάλλεται ετησίως ή και μηνιαίως, λαμβάνοντας υπόψιν την πραγματική ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, τις προσπάθειες εξοικονόμησης ενέργειας, τις μετεωρολογικές συνθήκες καθώς και το βαθμό χρήσης (πλήθος ατόμων και ώρες παραμονής) των εγκαταστάσεων του Πα.Δ.Α. Εφαρμόζοντας αντίστοιχα την εξίσωση (1) με τη μορφή της εξίσωσης (2)

$$E_y = CF.8760.P_o \quad (2)$$

προκύπτει ότι η μέγιστη επιθυμητή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (στα πλαίσια του ταυτοχρονισμού) της ΣΗΘ ισούται με «E_{max}»(=2900MWh_e). Συγκρίνοντας τη μέγιστη επιθυμητή παραγωγή της ΣΗΘ με την ετήσια ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας των (Π-2) και (Π-3) καταγράφεται ένα έλλειμμα 600 έως 2100 MWh_e. Είναι προφανές ότι σε περίπτωση επιλογής μας η ΣΗΘ έχει τη δυνατότητα κάλυψης και της εν λόγω συνολικής κατανάλωσης λειτουργώντας όμως όχι στις καλύτερες οικονομοτεχνικά συνθήκες.

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού, αποφασίσθηκε η εγκατάσταση πρόσθετης ηλεκτρικής ισχύος με τη χρήση Φ/Β πλαισίων που θα τοποθετηθούν στις επίπεδες οροφές επιλεγμένων κτηρίων της (Π-2). Λαμβάνοντας υπόψιν τις εκτεταμένες μετρήσεις του διαθέσιμου ηλιακού δυναμικού και των σχετικών μετεωρολογικών παραμέτρων (π.χ. θερμοκρασία περιβάλλοντος) καθώς και περιορισμούς φαινομένων σκίασης προκύπτει [10,11] ότι ο αναμενόμενος συντελεστής αξιοποίησης «CF_{pv}» των Φ/Β πλαισίων στις οροφές των κτηρίων της (Π-2) ισούται με 18%±0.6%. Εφαρμόζοντας στη συνέχει την εξίσωση (3) προκύπτει ότι η απαιτούμενη ισχύς των Φ/Β πλαισίων «P_{pv}» πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 380 και 1300kW_p.

$$P_{pv} = E_y/(8760.CF_{pv}) \quad (3)$$

Όμως, βάσει της υφιστάμενης νομοθεσίας που διέπει τον ενεργειακό (εικονικό ή μη) συμψηφισμό η συνολική εγκατεστημένη ισχύς του ιδιοπαραγωγού δεν πρέπει να υπερβαίνει τη συμφωνηθείσα, η οποία για την (Π-2) ισούται με 1MW_e (1000kW_e). Συνεπώς, με δεδομένη την ονομαστική ισχύ της ΣΗΘ (600kW_e) υπό τις παρούσες συνθήκες η μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύς των Φ/Β πλαισίων δεν πρέπει να ξεπερνά τα 400kW_p.

Συνοψίζοντας, μπορούμε να αναφέρουμε ότι η εγκατάσταση και προγραμματισμένη λειτουργία της μονάδας ΣΗΘ της (Π-2) του Πα.Δ.Α., ακολουθώντας σε πρώτη προτεραιότητα τη ζήτηση θερμικών και ψυκτικών φορτίων της πανεπιστημιούπολης, παρέχει τη δυνατότητα όχι μόνο κάλυψης των εν λόγω θερμικών-ψυκτικών φορτίων με πρακτικά μηδενικό ενεργειακό κόστος αλλά και τον εικονικό συμψηφισμό μεγάλου μέρους της ηλεκτρικής κατανάλωσης τόσο της πανεπιστημιούπολής του Αρχαίου Ελαιώνα (Π-2) όσο και της πανεπιστημιούπολης Αθηνών (Π-3) του Πα.Δ.Α. Για τη συνολική κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών των δύο πανεπιστημιουπόλεων προτείνεται η εγκατάσταση Φ/Β πλαισίων (στα πλαίσια των υφιστάμενων νομικών περιορισμών), η λειτουργία των οποίων θα συνδράμει τη λειτουργία της ΣΗΘ, απαλλάσσοντας την από τη λειτουργία σε υψηλά φορτία (ή και πλήρως) σε περιόδους χαμηλής/μηδενικής ζήτησης θερμικών ή ψυκτικών φορτίων. Τέλος, αν και η οικονομοτεχνική ανάλυση ξεπερνά τους σκοπούς της παρούσας εργασίας, αξίζει να σημειωθεί ότι με τις παρούσες (σχετικά υψηλές συμφωνηθείσες) τιμές αγοράς του φυσικού αερίου για συμπαραγωγή το κόστος του απαιτούμενου φυσικού αερίου για την προτεινόμενη λειτουργία της ΣΗΘ κυμαίνεται μεταξύ των 330,000 και 500,000 ευρώ, όταν μόνο το κόστος προμήθειας ηλεκτρικής ενέργειας για τις (Π-2) και (Π-3) ξεπερνά τις 650,000 ευρώ. Αντίστοιχα, πρόσθετη μείωση κόστους της τάξης των 100,000 ευρώ αναμένεται λόγω του περιορισμού λειτουργίας των λεβήτων της (Π-2), οι οποίοι λειτουργούν με (σχετικά ακριβό σε σχέση με τη τιμή προμήθειας για συμπαραγωγή) φυσικό αέριο για τη παροχή θέρμανσης η οποία θα υποκατασταθεί από το θερμικό φορτίο της ΣΗΘ.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στα πλαίσια της παρούσας ερευνητικής - επιστημονικής ανάλυσης εξετάζεται η συμβολή μιας μονάδας συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας-θερμότητας-ψύξης που λειτουργεί με φυσικό αέριο για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών των εγκαταστάσεων του Πα.Δ.Α. Για το σκοπό αυτό ενεργοποιείται η δυνατότητα εικονικού συμψηφισμού μεταξύ των ετήσιων καταναλώσεων ηλεκτρικής ενέργειας ύψους ετησίως 3500 έως 5000MWh$_e$ και της ιδιοπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τη μονάδα ΣΗΘ του πανεπιστημίου. Για την καλύτερη αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων της συμπαραγωγής επιδιώκεται η αξιοποίηση του ταυτοχρονισμού ηλεκτρικής και θερμικής-ψυκτικής ζήτησης, πράγμα που υλοποιείται με τον κατάλληλο προγραμματισμό λειτουργίας της ΣΗΘ με μέγιστο συντελεστή αξιοποίησης (CF) μικρότερο του 55%. Για τη κάλυψη της επιπλέον ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας των εγκαταστάσεων του πανεπιστημίου σχεδιάζεται η εγκατάσταση Φ/Β πλαισίων περίπου 400kW$_p$, η λειτουργία των οποίων θα καταστήσει ενεργειακά αυτόνομες τις υπό μελέτη πανεπιστημιουπόλεις (Αρχαίος Ελαιώνας και πανεπιστημιούπολη Αθηνών) σχετικά με την ανάγκη προμήθειας ηλεκτρικής ενέργειας από το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο. Είναι αυτονόητο ότι στο πλαίσιο αυτό θα ενσωματωθούν και συστηματικές προσπάθειες εξοικονόμηση ενέργειας στο σύνολο των κτηρίων του Πα.Δ.Α., έτσι ώστε να απορροφηθεί και η αναμενόμενη μελλοντική αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας λόγω της υιοθέτησης της ηλεκτροκίνησης από τη διοίκηση και το προσωπικό του πανεπιστημίου.

Από την ανάλυση των προκαταρκτικών ενεργειακών και οικονομικών δεδομένων της προτεινόμενης λύσης προκύπτει σημαντικό οικονομικό όφελος του πανεπιστημίου, που μπορεί να φτάσει και στην εξοικονόμηση του 50% του σημερινού κόστους ηλεκτροπαραγωγής και θέρμανσης-ψύξης. Παράλληλα, με δεδομένο το υφιστάμενο εθνικό ενεργειακό μίγμα του τομέα της ηλεκτροπαραγωγής και τις επίσημες εκπομπές αερίων ρυπαντών και αερίων του θερμοκηπίου από τη χρήση φυσικού αερίου [12] αναμένεται σημαντική μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε εθνικό επίπεδο καθώς και περιορισμός κατά περίπου 1500 έως 2000 τόνους διοξειδίου του άνθρακα ετησίως.

Για την περαιτέρω βελτίωση της περιβαλλοντικής και οικονομικής συμπεριφοράς της προτεινόμενης εγκατάστασης θα μελετηθεί στο επόμενο χρονικό διάστημα η ενεργειακή συμπεριφορά της εν λειτουργία μονάδας υπό το νέο καθεστώς του εικονικού ενεργειακού συμψηφισμού με ταυτόχρονη μελέτη και των θερμικών και ψυκτικών φορτίων. Με τον τρόπο αυτό θα προκύψουν συμπεράσματα βάσει πραγματικών συνθηκών λειτουργίας, τα οποία θα συμβάλλουν στην αριστοποίηση της προτεινόμενης λύσης και στην υλοποίηση του σχεδιασμού του Πα.Δ.Α. για την ενεργειακή μετάβαση σε ένα πράσινο πανεπιστήμιο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Gambini M., Vellini M., 2015, High Efficiency Cogeneration: Electricity from Cogeneration in CHP Plants, Energy Procedia, 81, pp. 430-439.

[2] Stavropoulos G.G., Skordas G., 2005, Energy and Environmental Benefits from Natural Gas Cogeneration: A Case Study, European Commission, OPET Network.

[3] U.S. DoE, EPA, 2012, Combined Heat and Power. A clean energy solution, U.S. Department of Energy, United States Environmental Protection Agency <energy.gov/sites/prod/files/2013/11/f4/chp_clean_energy_solution.pdf> accessed 05.04.2019.

[4] Gambini M., Vellini M., Stilo T., Manno M., Bellocchi S., 2018, Comparison of CHP systems for the paper industry in the context of High-efficiency cogeneration. 13th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems - SDEWES Conference, 0164, Palermo, Italy.

[5] Rosen M.A., 2009, Energy, environmental, health and cost benefits of cogeneration from fossil fuels and nuclear energy using the electrical utility facilities of a province, Energy for Sustainable Development, 13(1), pp. 43-51.

[6] Balaras C., Dascalaki E., Droutsa P., Micha M., Kontoyiannidis S., Argiriou A.A., 2017, Energy Use Intensities for Non-Residential Buildings. 48th International Congress & Exhibitionon Heating Refrigeration and Air-conditioning, 6–8 xii 2017, Belgrade, Sava Center, Serbia, pp. 369-389.

[7] Singh J., 2018, Energy Efficiency in the Public Sector (English). Live wire knowledge note series; no. 2018/94. Washington,D.C.: WorldBankGroup. <documents.worldbank.org/curated/en/124241544814266028/Energy-Efficiency-in-the-Public-Sector> accessed 02.05.2019.

[8] Darabadi Zareh A., Khoshbakhti Saray R., Mirmasoumi S., Bahlouli K., 2018, Extensive thermodynamic and economic analysis of the cogeneration of heat and power system fueled by the blend of natural gas and biogas, Energy Conversion and Management, 164, pp. 329-343.

[9] Kostopoulos Em., Kaloutsa M., Kondili E.M., Kaldellis J.K., 2019, "Cogeneration Unit Optimum Sizing for a University Campus". In Proceedings of the 22nd Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction, (PRES 2019), 20-23 October, Crete, Greece.

[10] Kaldellis J.K., Kavadias K., Zafirakis D., 2012, "Experimental Validation of the Optimum Photovoltaic Panels' Tilt Angle for Remote Consumers", Renewable Energy, Vol.46, pp.179-191.

[11] Kaldellis J.K., Kapsali M., Kavadias K., 2014,"Temperature and Wind Speed Impact on the Efficiency of PV Installations. Experience Obtained from Outdoor Measurements in Greece", Renewable Energy, Vol.66, pp. 612-624.

[12] Kaldellis J.K., Vlachos G.Th., Paliatsos A.G., Kondili E., 2005, Detailed Examination of Greek Electricity Sector Nitrogen Oxides Emissions for the Last Decade, Journal of Environmental Science and Policy, 8(5), pp. 502-514.

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΥΠΟΒΟΗΘΟΥΜΕΝΟΥ ΑΠΟ ΑΝΤΛΙΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΚΑΛΥΨΗ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΚΟΛΥΜΒΗΤΗΡΙΟΥ

Ηλίας Αναγνωστόπουλος, Λεωνίδας Ζουλούμης*, Γεώργιος Πανάρας

* Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, ΠΔΜ
e-mail: l.zouloumis@uowm.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ενεργειακή κατανάλωση των κτηρίων αντιπροσωπεύει το 40% της συνολικής πρωτογενούς ενεργειακής κατανάλωσης της Ευρωπαϊκής Ένωσης και οφείλεται στις αυξανόμενες ανάγκες για άνεση και καλύτερη ποιότητα διαβίωσης σε εσωτερικούς χώρους τις τελευταίες δεκαετίες. Το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας στρέφεται προς την αποδοτικότερη ενεργειακή διαχείριση στα κτίρια. Στο πλαίσιο αυτό εξετάζονται τα ζητήματα της βελτιστοποίησης και αυτονομίας της λειτουργίας των συστημάτων θέρμανσης, ψύξης, κλιματισμού και αερισμού (Heating, Ventilating and Air Conditioning, HVAC). Τα συστήματα ενεργειακής διαχείρισης κτηρίων (Building Energy Management Systems, BEMS) προσφέρουν δυνατότητες αντιμετώπισης των προαναφερθέντων ζητημάτων και συνεπώς ένα ενδιαφέρον αντικείμενο διερεύνησης.

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η λειτουργία και διερευνάται η ενεργειακή συμπεριφορά ενός κλειστού κολυμβητηρίου. Έμφαση δίνεται στην δυνατότητα αξιοποίησης θερμικής ηλιακής ενέργειας, αλλά και στην ενσωμάτωση συστήματος BEMS.

Το κολυμβητήριο υπό εξέταση είναι το Λιάπειο κολυμβητήριο της περιφερειακής ενότητας Κοζάνης. Το υπάρχον σύστημα διαθέτει δύο κύριες υδραυλικές διατάξεις. Η μία συνεισφέρει στη θέρμανση, ανανέωση και αναπλήρωση νερού της κολυμβητικής δεξαμενής και του δοχείου Ζεστού Νερού Χρήσης (ΖΝΧ) των αποδυτηρίων. Η άλλη καλύπτει τα φορτία θέρμανσης του εσωτερικού χώρου της εγκατάστασης. Η ενεργειακή κάλυψη των φορτίων γίνεται με χρήση αντλιών θερμότητας και λέβητα. Στο υπάρχον σύστημα βρίσκεται εγκατεστημένη μια διάταξη controller, υπεύθυνη για τον συντονισμό και τη λειτουργία των αντλιών θερμότητας. Η πρόταση επέμβασης περιλαμβάνει την εγκατάσταση συστήματος ηλιακών συλλεκτών, με σκοπό την μερική κάλυψη των απαιτούμενων φορτίων της κολυμβητικής δεξαμενής και του ΖΝΧ, παράλληλα με την ήδη υπάρχουσα αντλία θερμότητας. Επίσης, εξετάζεται η μετατροπή του συστήματος ελέγχου (controller), με σκοπό την αυτόνομη βελτιστοποίηση του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, μια εξεταζόμενη διάταξη controller περιλαμβάνει αισθητήρια όργανα μέτρησης και, μέσω αλγορίθμων βελτιστοποίησης, ελέγχει κατάλληλα τη λειτουργία των επιμέρους στοιχείων της διάταξης, δηλαδή βαλβίδες, κυκλοφορητές, την αντλία θερμότητας, τον λέβητα και τους ηλιακούς συλλέκτες. Στο πλαίσιο της εφαρμογής του controller, προτείνονται και οι αλγόριθμοι λειτουργίας των συστημάτων. Τέλος, υπολογίζεται η ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των υπολογισμών, η εγκατάσταση ηλιακών συλλεκτών και ενός συστήματος ελέγχου των διατάξεων προσφέρει εξοικονόμηση της τάξεως του 50% στο κόστος λειτουργίας των αντλιών θερμότητας του κολυμβητηρίου, ενώ ο χρόνος απόσβεσης των προτεινόμενων επεμβάσεων δεν ξεπερνά τα 4 έτη. Η προτεινόμενη ανάλυση σχετικά με τη μετατροπή της διάταξης controller στο σύστημα μπορεί να επεκταθεί περαιτέρω, εισάγοντας τη δυνατότητα χρήσης αλγορίθμων αυτοεκμάθησης και ανάπτυξης στρατηγικών αποφάσεων λειτουργίας των συστημάτων HVAC. Ουσιαστικά πρόκειται για ένα διευρυμένο πλαίσιο σχεδιασμού αντίστοιχων συστημάτων, λαμβάνοντας υπόψη στο μέγιστο δυνατό βαθμό τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

Λέξεις – κλειδιά: Ηλιακό θερμικό σύστημα, Αντλία θερμότητας, ΑΠΕ, BEMS, Κολυμβητήριο

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ενεργειακή κατανάλωση των κτηρίων αντιπροσωπεύει το 40% της συνολικής πρωτογενούς ενεργειακής κατανάλωσης της Ευρωπαϊκής Ένωσης [1] και οφείλεται στις αυξανόμενες ανάγκες για άνεση και καλύτερη ποιότητα διαβίωσης σε εσωτερικούς χώρους τις τελευταίες δεκαετίες. Οι αθλητικές εγκαταστάσεις χαρακτηρίζονται από υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις σε θέρμανση και ηλεκτρισμό [2]. Ειδικότερα, σύμφωνα με τους Artuso et al. [3], εγκαταστάσεις κλειστών κολυμβητηρίων διαθέτουν περισσότερες απαιτήσεις σε σύγκριση με τις υπόλοιπες αθλητικές εγκαταστάσεις. Εκτός από τον κλιματισμό και αερισμό του χώρου και τις απαιτήσεις σε φωτισμό και ζεστό νερό χρήσης (ΖΝΧ), πρέπει να ληφθούν υπόψη η θέρμανση, ο καθαρισμός και η ανανέωση του νερού των κολυμβητικών δεξαμενών. Στην εργασία των Tolis et al. [4] τονίζεται η σημαντικότητα της διαχείρισης ποιότητας εσωτερικού αέρα με σημαντικούς παράγοντες τις διαδικασίες του φυσικού αερισμού και απορρύπανσης του αέρα. Οι αυξημένες απαιτήσεις, λοιπόν, μεταφράζονται σε υψηλές καταναλώσεις σε ενέργεια. Συνεπώς είναι απαραίτητη η λήψη μέτρων για τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και του περιβαλλοντικού αποτυπώματος αυτών των εγκαταστάσεων.

Οι εν λόγω ενεργειακές καταναλώσεις, αναλύονται σε σχετικές έρευνες, σημειώνοντας ότι σύμφωνα με τους Kampel et al. [5], οι καταναλώσεις ανηγμένες ανά μονάδα υδάτινης επιφάνειας παρέχουν μια πιο αντικειμενική πληροφόρηση καταναλώσεων κολυμβητηρίων, σε σύγκριση με την αναγωγή ενέργειας προς ωφέλιμη επιφάνεια, ήτοι επιφάνεια κάτοψης της συνολικής εγκατάστασης. Αυτό συμβαίνει, καθώς το μεγαλύτερο μέρος των φορτίων κατανάλωσης σχετίζεται με την υδάτινη επιφάνεια (εξάτμιση/θέρμανση/ανανέωση νερού κολυμβητικών δεξαμενών). Στην έρευνα των Saari et al. [6] αναφέρονται ετήσιες ενεργειακές απαιτήσεις κολυμβητηρίου της Φινλανδίας. Στην εργασία των Trianti-Stourna et al. [7] παρουσιάζονται τρία κολυμβητήρια της Αθήνας, καθώς και οι ενεργειακές καταναλώσεις τους, γίνονται συγκρίσεις και προτείνονται παρεμβάσεις.

Για την μείωση των ενεργειακών καταναλώσεων, αρκετές εργασίες εξετάζουν την εφαρμογή συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) και πιο συγκεκριμένα, την εγκατάσταση ηλιακών συλλεκτών [8] [9]. Στην εργασία του Katsaprakakis [10] εξετάσθηκε ως σενάριο η πλήρης αντικατάσταση των συστημάτων συμβατικών καυσίμων από καυστήρα βιομάζας και ηλιακούς συλλέκτες για την κάλυψη αναγκών του Παγκρήτιου Σταδίου. Οι Hahne & Kubler [11] ανέπτυξαν μοντέλο προσομοίωσης εξωτερικών κολυμβητικών δεξαμενών, με στόχο την καλύτερη εκμετάλλευση των ηλιακών φορτίων και τη μείωση κατανάλωσης ενέργειας για τη θέρμανση της δεξαμενής.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας διερευνάται η ενεργειακή συμπεριφορά και λειτουργία κλειστού κολυμβητηρίου, και ειδικότερα του Λιάπειου κλειστού κολυμβητηρίου Κοίλων, της περιφερειακής ενότητας Κοζάνης. Στο πλαίσιο της ανάλυσης, εξετάζεται παρέμβαση ενεργειακής αναβάθμισης, η οποία περιλαμβάνει σύστημα ηλιακών θερμικών συλλεκτών, καθώς και σύστημα διατάξεων ελέγχου και αυτοματισμών (BEMS).

2. ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΥΠΟ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

Το κτίριο του κλειστού κολυμβητηρίου κατασκευάστηκε το 2002. Το κολυμβητήριο αποτελείται από έναν όροφο, έκτασης 909.13 m^2. Από αυτά, τα 833.03 m^2 αποτελούν τον κύριο χώρο, στον οποίο βρίσκεται η κολυμβητική δεξαμενή επιφάνειας 375 m^2 και όγκου 937.5 m^3 (Εικόνα 1). Τα υπόλοιπα 76.1 m^2 χώρου στεγάζουν τα αποδυτήρια του κολυμβητηρίου. Η οροφή του κτιρίου έχει επιφάνεια 967 m^2. Ο χώρος στέγασης του κολυμβητηρίου συμπληρώνεται και από ένα υπόγειο μικρής έκτασης, στο οποίο βρίσκεται το λεβητοστάσιο. Το κολυμβητήριο λειτουργεί ολόκληρο το έτος με εξαίρεση την περίοδο από 15 Ιουλίου μέχρι 15 Σεπτεμβρίου.

Εικόνα 1: Εσωτερικός χώρος Λιαπείου κολυμβητηρίου

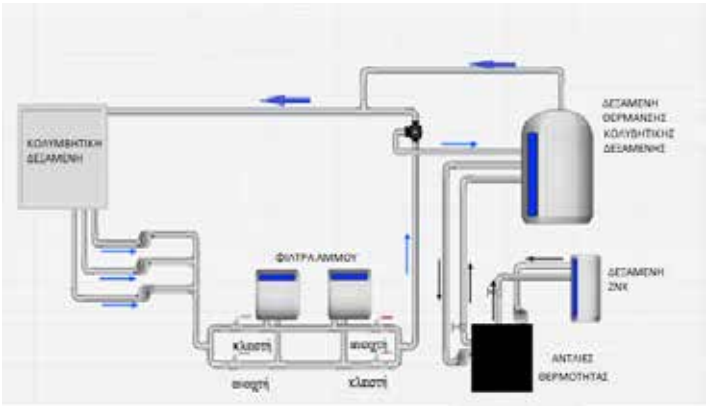
Εφαρμόζοντας τη μεθοδολογία που συνίσταται από την ΤΟΤΕΕ-20701-1 [12], υπολογίστηκαν οι συντελεστές θερμοπερατότητας των δομικών στοιχείων, οι οποίοι παρουσιάζονται στον πίνακα 1.

Δομικά στοιχεία	**Εμβαδόν Α (m^2)**	**Συντελεστής θερμοπερατότητας U ($W/m^2 \cdot K$)**
Οροφή	912.0	1.03
Δάπεδο	534.1	0.56
Πυθμένας κολυμβητικής δεξαμενής	375.0	0.3
Πλάγιο τοίχωμα κολυμβητικής δεξαμενής	100.0	0.37
Αδιαφανή κατακόρυφα δομικά στοιχεία	719.7	0.37
Ανοίγματα	18.6	1.92-2.31

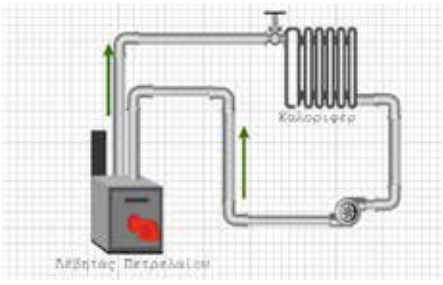
Πίνακας 1: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα δομικών στοιχείων κτιριακού κελύφους

Η θέρμανση των χώρων γίνεται από λέβητα πετρελαίου ισχύος 350 kW. Για την αποδοτικότερη κάλυψη των φορτίων θέρμανσης και ΖΝΧ, έχει εγκατασταθεί σύστημα αντλίας θερμότητας συνολικής ισχύος 120 kW, το οποίο παρέχει θερμότητα στη δεξαμενή θέρμανσης της κολυμβητικής δεξαμενής αλλά και στη δεξαμενή ΖΝΧ. Για τον έλεγχο λειτουργίας της διάταξης, έχει εγκατασταθεί σύστημα BEMS, το οποίο είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο λειτουργίας των αντλιών θερμότητας και τη θέρμανση της κολυμβητικής δεξαμενής.

Στις εικόνες 2 και 3 αποτυπώνονται τα θερμοϋδραυλικά διαγράμματα των συστημάτων θέρμανσης χώρου, κολυμβητικής δεξαμενής και κάλυψης αναγκών σε ζεστό νερό χρήσης (ΖΝΧ).

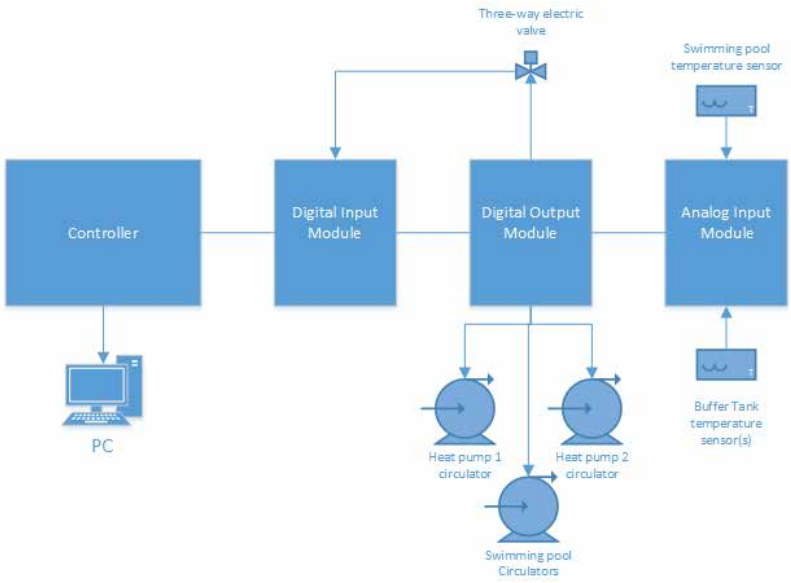


Εικόνα 2: Υδραυλικό διάγραμμα αντλιών θερμότητας για θέρμανση ΖΝΧ και νερού κολυμβητικής δεξαμενής



Εικόνα 3: Υδραυλικό διάγραμμα λέβητα πετρελαίου για θέρμανση χώρων του κολυμβητηρίου

Στην εικόνα 4 παρουσιάζεται η ήδη υπάρχουσα διάταξη controller. Σκοπός της λειτουργίας του είναι ο συντονισμός των εξαρτημάτων του θερμοϋδραυλικού συστήματος της εικόνας 2.



Εικόνα 4:Υπάρχουσα διάταξη controller

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η αποδεκτή ποιότητα εσωτερικού περιβάλλοντος, εστιάζοντας σε θέματα θερμικής άνεσης αλλά και ποιότητας αέρα, είναι σημαντική για την καλή απόδοση των αθλούμενων, την καλή διάθεση και την αποφυγή τραυματισμών. Σύμφωνα με την ΤΟΤΕΕ 20701-1 [12], δίνονται οι συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας που συνίσταται να επικρατούν σε κλειστούς χώρους κολυμβητηρίων, ενώ σύμφωνα με τον Μπαλαρά [13], η θερμοκρασία του νερού σε αντίστοιχες χρήσεις προτείνεται να είναι 26-28^{o}C.

Στα πλαίσια της παρούσας ανάλυσης, υπολογίζονται τα απαιτούμενα ενεργειακά φορτία, σύμφωνα με το μοντέλο ημισταθερής κατάστασης κατά EN13790 [14] για το κτίριο και της ASHRAE [15] για την κολυμβητική δεξαμενή, ενώ για συγκεκριμένες παραμέτρους λειτουργίας υιοθετήθηκαν οι προτεινόμενες τιμές από την ΤΟΤΕΕ20701-1 & 3 [12,16]. Ειδικότερα, υπολογίζονται σε μηνιαία βάση, τα φορτία θέρμανσης/ψύξης του χώρου, θέρμανσης της κολυμβητικής δεξαμενής (όπως αυτά αναλύονται σε φορτία εξάτμισης, συναγωγής και ανανέωσης νερού), καθώς επίσης οι απαιτήσεις σε ΖΝΧ και τα φορτία που προκύπτουν από την ύπαρξη φωτισμού και συσκευών.

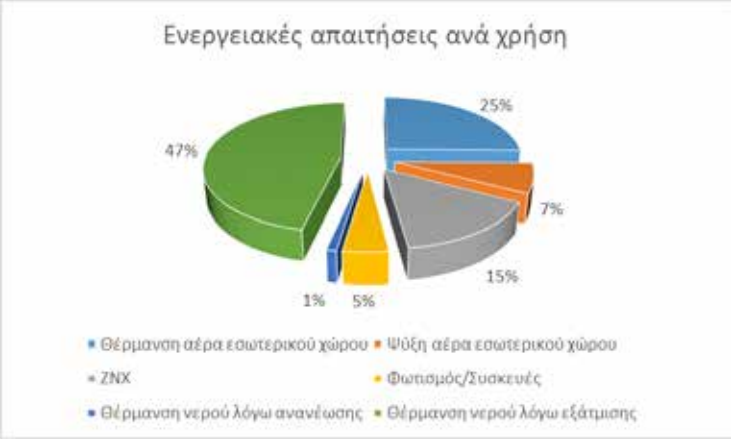
Μετέπειτα εξετάζεται το σενάριο εγκατάστασης ηλιακών συλλεκτών για την κάλυψη αναγκών θέρμανσης ΖΝΧ ή του νερού κολυμβητικής δεξαμενής. Η διαστασιολόγηση των ηλιακών συλλεκτών πραγματοποιείται με την εφαρμογή της μεθόδου F-Chart [17]. Ο υπολογισμός της ενεργειακής κατανάλωσης βασίστηκε στον προσδιορισμό των βαθμών απόδοσης των σχετικών συστημάτων, στα πλαίσια ενεργειακής επιθεώρησης αλλά και σύμφωνα με τις σχετικές υποδείξεις της ΤΟΤΕΕ 20701-1 [12].

Στη συνέχεια, εξετάζεται η αναδιαμόρφωση της υπάρχουσας διάταξης controller, υπεύθυνου για τη θέρμανση της κολυμβητικής δεξαμενής. Επιπλέον, υλοποιούνται αλγόριθμοι ελέγχου και ενεργειών που εκτελεί ο controller, με σκοπό τον συντονισμό, την αυτοματοποίηση και βελτιστοποίηση της απόδοσης λειτουργίας των συστημάτων.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1. ΠΑΡΟΥΣΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

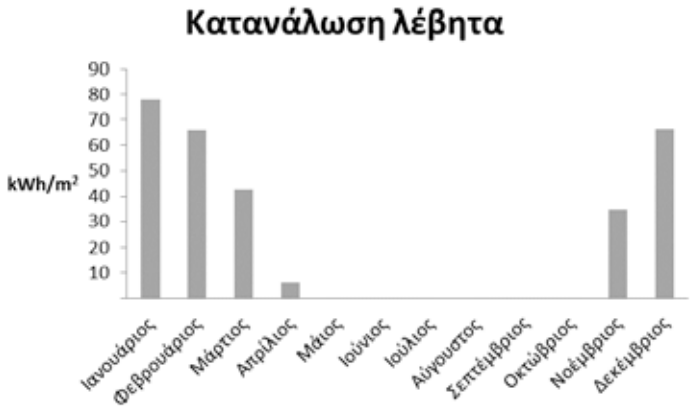
Σύμφωνα με τους υπολογισμούς, οι συνολικές ετήσιες ενεργειακές απαιτήσεις ανέρχονται στις 892 kWh/ m^2 ωφέλιμης επιφάνειας (ή 2162 kWh/m^2 υδάτινης επιφάνειας) ενώ στην εικόνα 5 παρουσιάζονται τα ποσοστά που καταλαμβάνει το κάθε είδος αναγκών. Επισημαίνεται πως σε όλη την έκταση των αποτελεσμάτων, η ανηγμένη ενέργεια ανά επιφάνεια [kWh/m^2] αντιστοιχεί στην ωφέλιμη επιφάνεια, δηλαδή στη συνολική επιφάνεια του δαπέδου του κλειστού κολυμβητηρίου. Συγκρίνοντας τα απαιτούμενα φορτία με αυτά αντίστοιχα της σχετικής βιβλιογραφίας, οι τιμές είναι συγκρίσιμες με τις τιμές που παρουσιάζονται στην εργασία των Trianti-Stourna et al. [7], λαμβάνοντας υπόψη ότι η εργασία αυτή αναφέρεται στην κλιματική ζώνη Α.



Εικόνα 5: Ετήσιες ενεργειακές απαιτήσεις κατά είδος αναγκών

Από την ποσοστιαία ανάλυση φορτίων προκύπτει ότι η ανάγκη θέρμανσης της κολυμβητικής δεξαμενής αποτελεί το μεγαλύτερο είδος φορτίου με ποσοστό 48% και το φορτίο θέρμανσης του εσωτερικού αέρα καταλαμβάνει το 25% του συνολικού φορτίου. Επομένως, μια αποτελεσματική πρόταση είναι η κάλυψη των απαιτήσεων ενέργειας για τη θέρμανση της κολυμβητικής δεξαμενής, με τη χρήση συστημάτων ΑΠΕ. Στο παρόν σενάριο παρέμβασης προτείνεται η εγκατάσταση ηλιακών συλλεκτών. Σύμφωνα με τη μεθοδολογία που υιοθετήθηκε για τη διαστασιολόγηση των ηλιακών συλλεκτών κατά Duffie & Beckmann [17], επιλέγονται ως καταλληλότεροι οι ηλιακοί συλλέκτες τοποθετημένοι σε γωνία κλίσης 41^o. Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται καλύτερη κάλυψη φορτίων κατά τη χειμερινή περίοδο, στην οποία οι απαιτήσεις για θέρμανση μεγιστοποιούνται.

Για τον υπολογισμό των ενεργειακών καταναλώσεων, είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός των βαθμών απόδοσης των εμπλεκόμενων συστημάτων. Ειδικότερα, σύμφωνα με την ΤΟΤΕΕ 20701-1 [12] και την ενεργειακή επιθεώρηση που πραγματοποιήθηκε, προκύπτει από υπολογισμούς ο βαθμός απόδοσης του λέβητα πετρελαίου 98%. Στην εικόνα 6 παρουσιάζονται τα φορτία κατανάλωσης του λέβητα. Επισημαίνεται πως ο ρόλος του είναι η θέρμανση του χώρου μέσω τερματικών μονάδων καλοριφέρ.



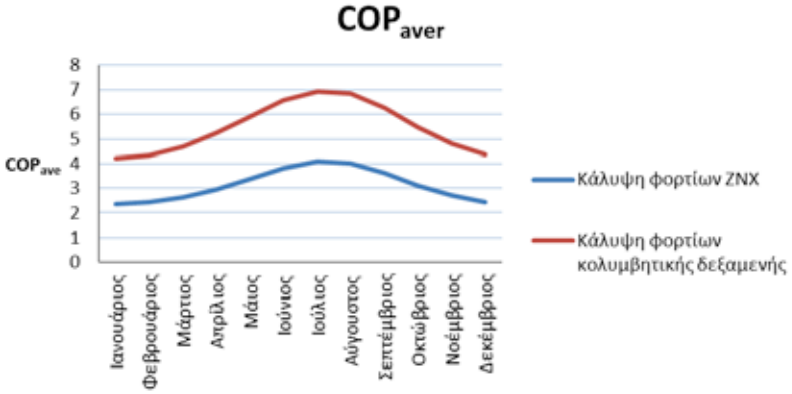
Εικόνα 6: Διάγραμμα φορτίων κατανάλωσης του λέβητα κατά τη διάρκεια του έτους

Προχωρώντας στην ανάλυση της θέρμανσης της κολυμβητικής δεξαμενής και του ZNX, αναφέρεται πως οι αντλίες θερμότητας είναι υπεύθυνες και για τις δύο λειτουργίες. Επαναλαμβάνεται πως οι δύο αυτές ανάγκες καταλαμβάνουν πάνω από το 60% των συνολικών ενεργειακών αναγκών, σύμφωνα με την εικόνα 5.

4.2. ΣΕΝΑΡΙΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗΣ

Ως γνωστόν, οι αντλίες θερμότητας αποδίδουν καλύτερα, όταν η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ πηγής και καταβόθρας είναι μειωμένη. Στην εικόνα 7 παρουσιάζεται το διάγραμμα μέσης απόδοσης αντλίας θερμότητας κατά τη λειτουργία της, είτε για την παραγωγή ZNX, ή τη θέρμανση της κολυμβητικής δεξαμενής. Οι τιμές του COP έχουν βασιστεί στην ανάλυση των Mouzeviris & Papakostas [18].

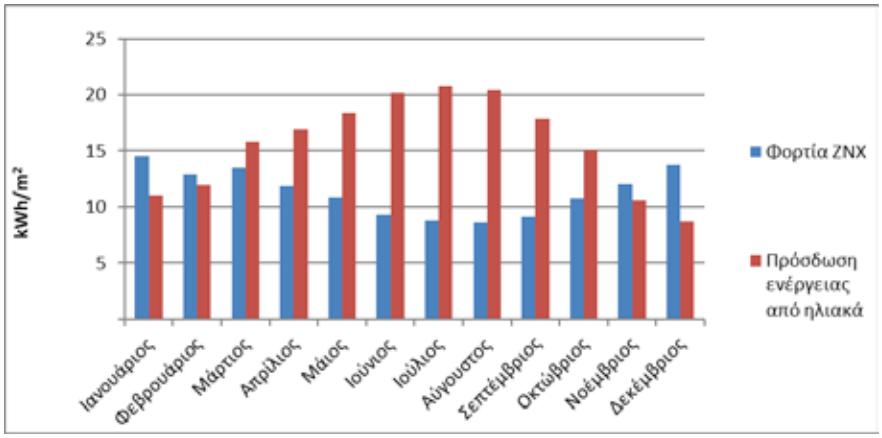
Από την εικόνα 7 παρατηρείται ότι η αντλία θερμότητας είναι αποδοτικότερη όταν προσδίδει θερμότητα στην κολυμβητική δεξαμενή. Αυτό το χαρακτηριστικό οφείλεται στο γεγονός ότι η θέρμανση του νερού για κατανάλωση ως ζεστό νερό χρήσης γίνεται μέχρι τους 50ºC, ενώ η θέρμανση για την κολυμβητική δεξαμενή γίνεται μέχρι τους 27ºC, θερμοκρασία κοντινότερη στη θερμοκρασία του νερού δικτύου, που χρησιμοποιεί η αντλία θερμότητας.



Εικόνα 7: Σύγκριση μέσου COP αντλιών θερμότητας αέρα-νερού για παραγωγή ζεστού νερού για την κολυμβητική δεξαμενή και για ZNX ανά μήνα

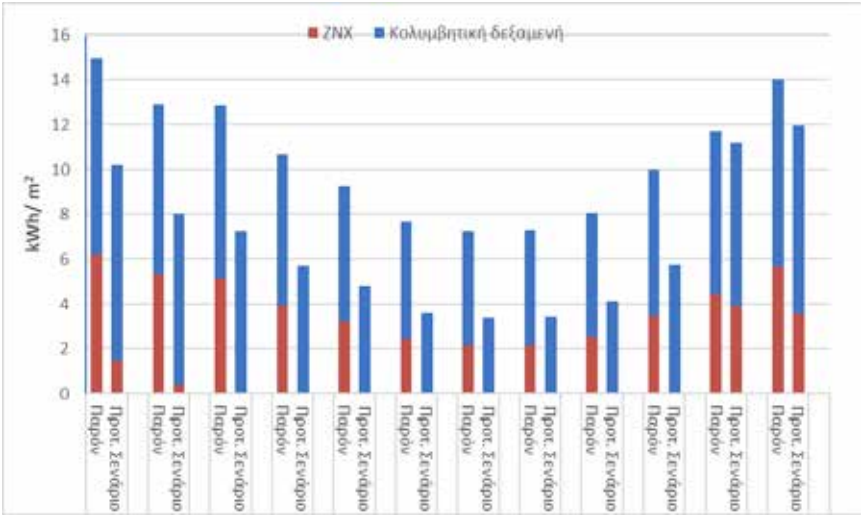
Από τα παραπάνω, προκύπτει το συμπέρασμα πως το σύστημα αντλιών θερμότητας αποδίδει καλύτερα, αν προτεραιότητα του αποτελεί η θέρμανση της δεξαμενής. Συνεπώς, προτεραιότητα των ηλιακών συλλεκτών θα είναι η θέρμανση του ΖΝΧ.

Από την εικόνα 8 μπορεί να παρατηρηθεί πως οι ηλιακοί συλλέκτες δύνανται να καλύψουν μεγάλα ποσοστά των απαιτήσεων σε ΖΝΧ. Επισημαίνεται πως τη θερινή περίοδο υπάρχει περίσσεια παραγόμενης ενέργειας. Η περίσσεια αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη θέρμανση της κολυμβητικής δεξαμενής. Τους μήνες της χειμερινής περιόδου, τα υπολειπόμενα φορτία που δεν καλύπτονται από τους ηλιακούς συλλέκτες, θα καλύπτονται από την αντλία θερμότητας.



Εικόνα 8: Δυναμικό κάλυψης των φορτίων ΖΝΧ από την πρόσδοση των ηλιακών συλλεκτών

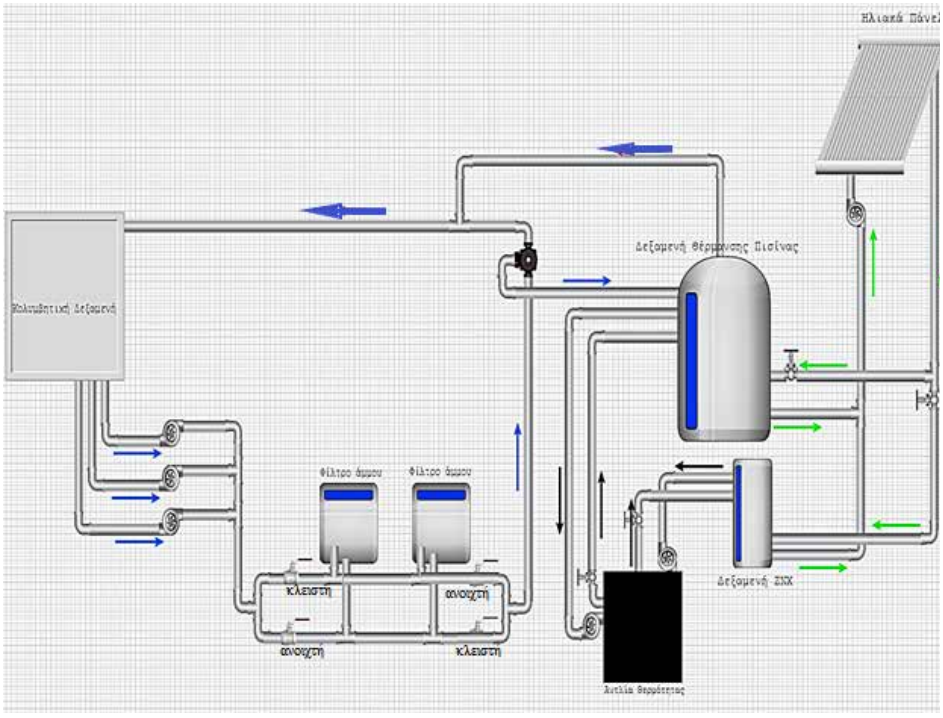
Επομένως, η κατανάλωση ενέργειας από την αντλία θερμότητας για την κάλυψη αναγκών για ΖΝΧ μειώνεται και μάλιστα μηδενίζεται στους περισσότερους μήνες. Στην εικόνα 9 παρουσιάζεται η συνολική επίδραση της παρέμβασης στην ενεργειακή κατανάλωση των αντλιών θερμότητας.



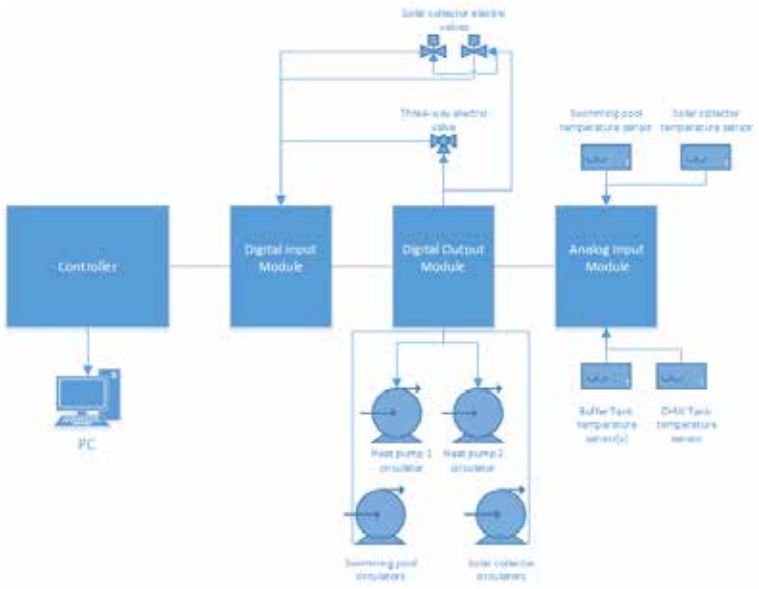
Εικόνα 9: Σύγκριση συνολικών καταναλώσεων των αντλιών θερμότητας

Στην εικόνα 10 παρουσιάζεται η νέα συνδεσμολογία της θερμοϋδραυλικής διάταξης, μετά το σενάριο της παρέμβασης, ενώ στην εικόνα 11 παρουσιάζονται οι αλλαγές στη διάταξη του controller. Επισημαίνεται πως καμία αλλαγή δεν πραγματοποιείται στη συνδεσμολογία του λέβητα πετρελαίου (Εικόνα 3). Πιο συγκεκριμένα, στη διάταξη του σεναρίου επέμβασης προστέθηκαν αισθητήρες θερμοκρασίας στο δοχείο ΖΝΧ και στο σύστημα ηλιακών συλλεκτών, καθώς και τα σήματα εισόδου/εξόδου του κυκλοφορητή και των ηλεκτροβανών που ελέγχουν τη ροή νερού στον βρόχο των ηλιακών συλλεκτών. Με αυτόν τον τρόπο, ο controller μπορεί να διαχειριστεί αυτόνομα τη λειτουργία τους.

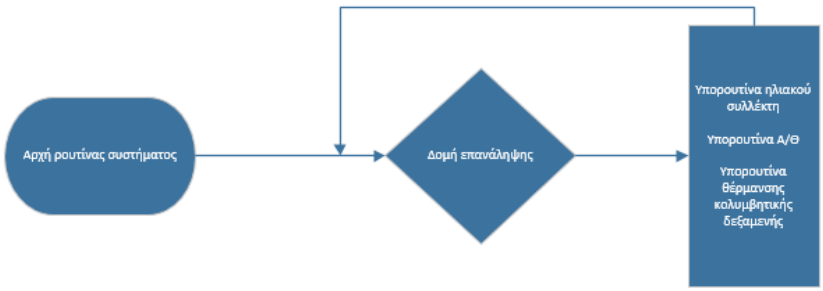
Για την επίτευξη των παραπάνω προτεραιοτήτων, όπως προαναφέρθηκε, απαιτείται ένα σύστημα BEMS. Στο συγκεκριμένο σενάριο, μελετάται η μετατροπή της υπάρχουσας διάταξης controller. Στο πλαίσιο της εργασίας αναπτύχθηκε ένα σύνολο αλγορίθμων για την εφαρμογή των στρατηγικών λειτουργίας μέσω του συστήματος αυτοματισμού. Μέσω της ρουτίνας του controller, λαμβάνονται αυτόματα αποφάσεις για τη λειτουργία του θερμοϋδραυλικού συστήματος και των εξαρτημάτων του, καθ' όλη την έκταση του Ο αλγόριθμος με τις υποροutίνες που θα εμπεριέχει παρουσιάζεται στο διάγραμμα ροής της εικόνας 12. Η μία υποροutίνα είναι υπεύθυνη για τη θέρμανση της κολυμβητικής δεξαμενής, χρησιμοποιώντας ζεστό νερό από τη δεξαμενή θέρμανσης (Εικόνα 10). Για τη θέρμανση των δύο δεξαμενών της εικόνας, χρησιμοποιούνται δύο υποροutίνες, οι οποίες αναθέτουν στις αντλίες θερμότητας και το σύστημα ηλιακών συλλεκτών τη θέρμανση των δεξαμενών. Οι υποροutίνες αυτές διασφαλίζουν ότι η αντλίες θερμότητας δίνουν προτεραιότητα στη θέρμανση της κολυμβητικής δεξαμενής, ενώ οι ηλιακοί συλλέκτες έχουν ως προτεραιότητα τη θέρμανση του ΖΝΧ.



Εικόνα 10: Υδραυλικό θερμοϋδραυλικό διάγραμμα με συμμετοχή ηλιακού συστήματος

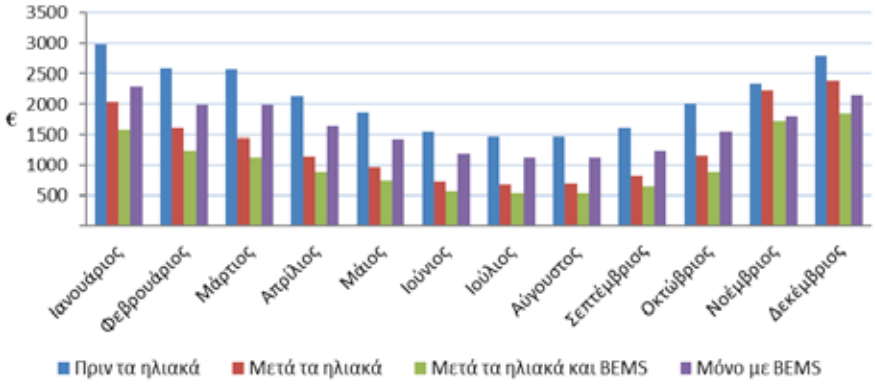


Εικόνα 11: Νέα διάταξη controller

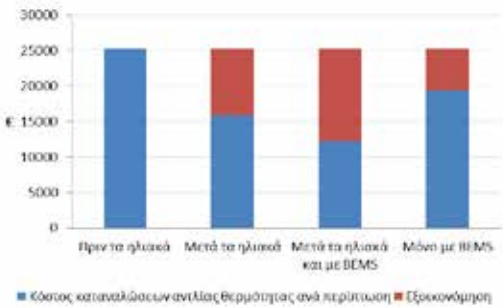


Εικόνα 12: Ρουτίνα του controller

Στην εικόνα 13 παρουσιάζεται το τελικό κόστος καταναλώσεων των αντλιών θερμότητας για όλες τις περιπτώσεις επέμβασης του σεναρίου.



Εικόνα 13: Κόστος καταναλώσεων αντλιών θερμότητας ανά περίπτωση: Πριν τα ηλιακά, μετά τα ηλιακά, μόνο με BEMS, με ηλιακά και BEMS



Εικόνα 14: Κόστος και εξοικονόμηση σε € των αντλιών θερμότητας ανά περίπτωση επέμβασης

Από την εικόνα 14 διακρίνεται η εξοικονόμηση που αποφέρει η κάθε περίπτωση του σεναρίου. Συνολικά το ετήσιο κέρδος λόγω της εξοικονόμησης της περίπτωσης εγκατάστασης ηλιακών και του συστήματος BEMS ανέρχεται στα 13115 €. Επίσης, λόγω εγκατάστασης του BEMS, σύμφωνα με ΤΟΤΕΕ 20701-1 [12], η εξοικονόμηση στη λειτουργία του λέβητα υπολογίζεται στα 4743 € ετησίως. Επίσης, παρουσιάζεται μια μείωση στη χρήση ηλεκτροφωτισμού και βοηθητικών ηλεκτρικών συστημάτων που αποφέρουν ετήσια εξοικονόμηση 266 €. Η συνολική ετησία εξοικονόμηση ανέρχεται στα 18124 €. Από έρευνα αγοράς, υπολογίζεται ότι η απόσβεση του κόστους εγκατάστασης θα είναι επιτεύξιμη σε λιγότερο από 4 έτη.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η διερεύνηση κατέδειξε ότι τα ηλιακά συστήματα μπορούν να εξοικονομήσουν σημαντικό ποσό συμβατικής ενέργειας, το οποίο μπορεί να φτάσει το 28%, ενώ παράλληλα συνίσταται η λειτουργία των αντλιών θερμότητας κατά προτεραιότητα για τη θέρμανση της κολυμβητικής δεξαμενής. Η προτεινόμενη παρέμβαση στο σύστημα ελέγχου και η διατύπωση των σχετικών αλγορίθμων ελέγχου διασφαλίζει τη προβλεπόμενη λειτουργία και συνεισφέρει στην βελτίωση της απόδοσης του συνολικού συστήματος, σημειώνοντας συνολική εξοικονόμηση κόστους λειτουργίας που ξεπερνάει το 50%.

Περαιτέρω έρευνα μπορεί να εστιάσει στην επεξεργασία των αλγορίθμων ελέγχου του συνολικού συστήματος, συμπεριλαμβάνοντας θέματα βελτιστοποίησης και αυτοεκμάθησης, ουσιαστικά προσφέροντας ένα διευρυμένο πλαίσιο σχεδιασμού αντίστοιχων διατάξεων. Επιπλέον, μπορεί να εστιάσει στην επεξεργασία των αλγορίθμων ελέγχου του συνολικού συστήματος, συμπεριλαμβάνοντας θέματα βελτιστοποίησης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Eurostat, 2020, “Energy Statistics – An Overview”, URL : https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Energy_statistics_-_an_overview#Primary_energy_production

[2] Panaras G., Chatzitypi V., Tolis Evangelos I., Afentoylidis A., Souliotis M., Bartzis John G, 2018, "Assessment of thermal comfort conditions and energy performance of an indoor athletic center", Fresenius Environmental Bulletin, 2019, Vol.28, No.2, pp.651-657 ref.20, URL: Assessment of thermal comfort conditions and energy performance of an indoor athletic center. (cabdirect.org)

[3] Artuso P., Santiangeli A., 2008, "Energy solutions for sports facilities”, Special Issue of the International Journal of Hydrogen Energy - 2nd World Congress of Young Scientists on Hydrogen Energy Systems, June 2008, Volume 33, Issue 12, pp. 3182-3187 (ISSN 0360-3199). Published by Elsevier Ltd, https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.12.064

[4] Tolis, E.I., Panaras, G., Bartzis, J.G., 2018, "A comprehensive air quality investigation at an aquatic centre: Indoor/outdoor comparisons.", Environmental Science and Pollution Research 25(17), 16710-16719. doi: https://doi.org/10.1007/s11356-018-1882-9

[5] Kampel W., Aas B., Bruland A., 2013, "Energy-use in Norwegian swimming halls", Energy and Buildings,Volume 59,Pages 181-186,ISSN 0378-7788, doi: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.11.011.

[6] Saari A. & Sekki T, 2008, "Energy Consumption of a Public Swimming Bath", The Open Construction and Building Technology Journal, 2, 202-206 doi: https://doi.org/10.2174/1874836800802010202.

[7] Trianti-Stourna E., Spyropoulou K., Theofylaktos C., Droutsa K., Balaras, C.A., Santamouris M., Asimakopoulos D.N., Lazaropoulou G., Papanikolaou N., 1997, "Energy conservation strategies for sports centers: Part B. Swimming pools", Energy and Buildings 27, 1998, doi: https://doi.org/10.1016/S0378-7788(97)00041-8.

[8] Alkhamis A.I., Sherif S.A., 1992, "Performance analysis of a solar-assisted swimming pool heating system", Energy, Volume 17, Issue 12, Pages 1165-1172, ISSN 0360-5442, doi: https://doi.org/10.1016/0360-5442(92)90005-K.

[9] Tagliafico L.A., Federico Scarpa F., Giulio Tagliafico G., Federico Valsuani F., 2012, "An approach to energy saving assessment of solar assisted heat pumps for swimming pool water heating, Energy and Buildings", Volume 55, Pages 833-840, ISSN 0378-7788, doi: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.10.009.

[10] Katsaprakakis D., 2019, "Introducing a solar-combi system for hot water production and swimming pools heating in the Pancretan Stadium, Crete, Greece", Energy Procedia, Volume 159, Pages 174-179, ISSN 1876-6102, doi: https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.12.047.

[11] Hahne E., Kubler R., 1994, "Monitoring and simulation of the thermal performance of solar heated outdoor swimming pools." Solar Energy 53, p. 9-19

[12] Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος, ΤΟΤΕΕ 20701-1/2010 «Αναλυτικές Εθνικές Προδιαγραφές παραμέτρων για τον υπολογισμό της Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων και την έκδοση ΠΕΑ», Αθήνα

[13] Μπαλαράς Κ.Α., 1996, «Στρατηγικές εξοικονόμησης ενέργειας σε αθλητικά κέντρα.», ΚΕΝΕ, Αθήνα

[14] ELOT EN ISO 13790:2008, "Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling", Athens

[15] ASHRAE, 2011. ASHRAE HANDBOOK HVAC Applications. Atlanta, USA

[16] Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος, ΤΟΤΕΕ 20701-3/2010 «Κλιματικά Δεδομένα Ελληνικών Περιοχών», Αθήνα

[17] Duffie J.A., Beckman W.A. (2013), "Solar Engineering of Thermal Processes", 4th Edition

ΓΕΩΘΕΡΜΙΑ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΚΑΝΟΝΙΚΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ ΣΕ ΨΥΚΤΙΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΕΜΠΟΡΙΚΗΣ ΨΥΞΗΣ CO_2

Αναστασία Σλιουσαρέγκο[1], Ευάγγελος Συγγούνας[1]*, Μιχαήλ Γρ. Βραχόπουλος[1]

[1] Εργαστήριο Ενεργειακών και Περιβαλλοντικών Ερευνών, Γενικό Τμήμα, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών
*e-mail: esyngounas@uoa.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία έχει ως στόχο τη θεωρητική ανάλυση και βελτίωση της απόδοσης ενός συμβατικού συστήματος ψύξης CO_2 δυο θερμοκρασιών (CBR) σε περιοχές με θερμό κλίμα, εξετάζοντας την περίπτωση προσθήκης εκτοξευτήρα, καθώς και την εισαγωγή γεωθερμικού εναλλάκτη νερού κανονικής γεωθερμίας σε ρόλο υπόψυξης ή συμπύκνωσης. Όλα τα συστήματα συγκρίνονται ως προς το συντελεστή συμπεριφοράς (COP) και την ενεργειακή κατανάλωση με χρήση του λογισμικού EES, όπου πραγματοποιείται παραμετρική ανάλυση για το εύρος θερμοκρασιών περιβάλλοντος 1÷40^{o}C. Για το σύστημα με την τοποθέτηση εκτοξευτήρα (EBR) τα αποτελέσματα δείχνουν ότι, στην υποκρίσιμη λειτουργία επιτυγχάνεται μείωση ηλεκτρικής ισχύος έως και 65% για θερμοκρασία περιβάλλοντος 16^{o}C σε σύγκριση με το συμβατικό, με αντίστοιχη αύξηση του COP κατά 157%. Στην υπερκρίσιμη λειτουργία η εξοικονόμηση ενέργειας φτάνει έως και 40% στους 27^{o}C με αύξηση του COP κατά 67%. Συνδυαστικά με τη γεωθερμία, το σύστημα CBR εμφανίζει βελτίωση απόδοσης έως και 24% στους 22^{o}C, με εξοικονόμηση έως και 19% σε σχέση με το αρχικό σύστημα. Από τους 29^{o}C, ενεργειακό προβάδισμα έχει ο υδρόψυκτος συμπυκνωτής, βελτιώνοντας την απόδοση κατά 22% και εξοικονομώντας ενέργεια κατά 18% στους 29^{o}C, ενώ στους 40^{o}C επιτυγχάνεται βελτίωση απόδοσης έως και 86%, με εξοικονόμηση έως και 46%. Ομοίως, εξετάζεται και η περαιτέρω βελτίωση του συστήματος EBR με χρήση γεωθερμίας. Στην περίπτωση του γεωθερμικού εναλλάκτη υπόψυξης, το σύστημα εμφανίζει βελτίωση απόδοσης έως και 75% στους 31^{o}C, με εξοικονόμηση έως και 43% της ηλεκτρικής ισχύος σε σχέση με το αρχικό σύστημα. Από τους 32^{o}C, ενεργειακό προβάδισμα έχει ο υδρόψυκτος συμπυκνωτής. Το σύστημα αυτό, σε σύγκριση με το αρχικό EBR, βελτιώνει την απόδοση κατά 87% και εξοικονομεί ενέργεια κατά 47% στους 32^{o}C, ενώ στους 40^{o}C πετυχαίνει βελτίωση έως και 206%, με εξοικονόμηση έως και 67%. Στα συστήματα με εκτοξευτήρα, η λειτουργία της γεωθερμίας απαιτεί λιγότερη παροχή νερού και συγκεκριμένα, για τη συνδεσμολογία υπόψυξης η μείωση φτάνει έως και 20%, ενώ η συνδεσμολογία στον συμπυκνωτή απαιτεί 14% λιγότερη παροχή νερού σε σύγκριση με το CBR. Τέλος, το σύστημα EBR με γεωεναλλάκτη υπόψυξης σημειώνει 230% βελτίωση του COP και 70% μείωση των ηλεκτρικών καταναλώσεων στους 16^{o}C σε σχέση με το CBR, ενώ αντίστοιχα, το σύστημα EBR με τον υδρόψυκτο συμπυκνωτή, 241% βελτίωση του COP και 71% μείωση των ηλεκτρικών καταναλώσεων στους 40^{o}C.

Λέξεις Κλειδιά: ψυκτικό σύστημα CO_2, εκτοξευτήρας ατμού, γεωθερμική ενέργεια, υπόψυξη, ενεργειακή απόδοση

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο πλαίσιο της μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, με τις τροποποιήσεις του Πρωτοκόλλου του Μόντρεαλ και τη συμφωνία του Παρισιού, επιζητείται επιπλέον μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, καθώς και η ανάπτυξη συστημάτων θέρμανσης και ψύξης με αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) [1-3]. Συγκεκριμένα, με το νομοθετικό τοπίο για τα φθοριούχα ψυκτικά μέσα να μεταβάλλεται συνεχώς και να προστίθενται επιπλέον περιορισμοί τόσο σε εθνικό επίπεδο, όσο και σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης, φυσικά ψυκτικά, όπως το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), κερδίζουν ολοένα και περισσότερο έδαφος στη βιομηχανική και εμπορική ψύξη. Με την εφαρμογή μάλιστα του Ευρωπαϊκού κανονισμού «F-gas regulation», οι ψυκτικές εγκαταστάσεις με CO_2 καθίστανται η πλέον βιώσιμη λύση στον τομέα της εμπορικής ψύξης [4].

Τα κυριότερα είδη συστημάτων CO_2 που χρησιμοποιούνται στην εμπορική ψύξη είναι: τα *έμμεσα (indirect)*, τα οποία έχουν το CO_2 ως δευτερεύον ψυκτικό, ενώ ως πρωτεύον χρησιμοποιούν κάποιον υδροφθοράνθρακα (HFC), τα *κλιμακωτά (cascade)*, όπου ως κύριο ψυκτικό χρησιμοποιείται συνήθως το R404A, R134a, η αμμωνία ή υδρογονάνθρακες και τέλος, διάφορες παραλλαγές διβάθμιων *διακρίσιμων συστημάτων (transcritical booster)*, τα οποία διαρρέονται αμιγώς από CO_2. Οι παραλλαγές αυτές μπορεί να περιλαμβάνουν χρήση μηχανικής υπόψυξης, παράλληλης συμπίεσης, χρήση πολλαπλών εκτοξευτήρων (multi-ejector) ή ακόμη και υπερπληρωμένους ατμοποιητές [5].

Η χρήση του CO_2 σε συστήματα ψύξης είναι ιδιαίτερα δημοφιλής, καθώς είναι ένα φιλικό για το περιβάλλον ρευστό, μη εύφλεκτο και μη τοξικό. Επιπλέον, είναι διαθέσιμο σε μεγάλες ποσότητες και χαμηλές τιμές στην αγορά. Ωστόσο, σε σύγκριση με άλλα συμβατικά ψυκτικά μέσα, παρουσιάζει θερμοδυναμικές ιδιαιτερότητες, όπως το ιδιαίτερα χαμηλό του κρίσιμο σημείο (31,1^{o}C, 78,3bar). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, για θερμοκρασίες περιβάλλοντος κοντά στην κρίσιμη θερμοκρασία, το σύστημα να μεταβαίνει στην υπερκρίσιμη λειτουργία. Τα υπερκρίσιμα (transcritical) συστήματα CO_2 έχουν μεγαλύτερη διαφορά πίεσης μεταξύ των διεργασιών απόρριψης θερμότητας και της ατμοποίησης και άρα, οι απώλειες στραγγαλισμού είναι αυξημένες. Ακόμη, οι υψηλές πιέσεις λειτουργίας οδηγούν σε υψηλότερες καταναλώσεις από τον συμπιεστή και τελικά χαμηλότερη απόδοση [6].

Προκειμένου να ανακτηθούν οι απώλειες στραγγαλισμού και να αυξηθεί η απόδοση, έχει προταθεί η αντικατάσταση της εκτονωτικής βαλβίδας με διάταξη εκτοξευτήρων (ejectors). Οι εκτοξευτήρες είναι απλά σε λειτουργία εξαρτήματα, χωρίς κινητά μέρη, ενώ έχουν χαμηλές απαιτήσεις συντήρησης. Συνεπώς, αποτελούν μια ελκυστική λύση για τα συστήματα ψύξης. Ειδικότερα τα τελευταία χρόνια, διάφορα ψυκτικά συστήματα με λύση ejector έχουν προταθεί και αναλυθεί, τα οποία δίνουν θετικά αποτελέσματα για τη συνολική απόδοση των συστημάτων [7, 8]. Περαιτέρω μείωση της κατανάλωσης του συστήματος μπορεί να επιτευχθεί με την αξιοποίηση ΑΠΕ, όπως η τοποθέτηση συστημάτων αξιοποίησης κανονικής γεωθερμίας (έως 25^{o}C). Μια τέτοια προοπτική είναι υλοποιήσιμη σε χώρες όπως η Ελλάδα, η οποία περιλαμβάνει σημαντικές γεωθερμικές πηγές (υψηλής, μέσης και χαμηλής ενθαλπίας) σε οικονομικά βάθη (100-1500 m) [9].

Η *κανονική* ή *αβαθής* γεωθερμία παρουσιάζει γενικά μεγάλο δυναμικό εξοικονόμησης ενέργειας και μείωσης των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου. Οι εφαρμογές της περιλαμβάνουν κυρίως τη θέρμανση και τον κλιματισμό κτηρίων και, σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα ψύξης και θέρμανσης (που καταναλώνουν πετρέλαιο και φυσικό αέριο), η εξοικονόμηση ενέργειας μπορεί να φτάσει μέχρι και το 70%. Η εκμετάλλευση της κανονικής γεωθερμίας επιτυγχάνεται είτε με Γεωθερμικές Αντλίες Θερμότητας (ΓΑΘ), είτε με συστήματα υπόγειας αποθήκευσης. Οι ΓΑΘ χρησιμοποιούν τη γη σαν πηγή θερμότητας όταν παρέχουν θέρμανση, χρησιμοποιώντας νερό (με ή χωρίς αντιψυκτικό) ως το μέσον που μεταφέρει τη γήινη θερμότητα στον ατμοποιητή της αντλίας θερμότητας. Αναλόγως τις ανάγκες και το περιβάλλοντα χώρο, οι ΓΑΘ μπορεί να είναι ανοικτού ή κλειστού κυκλώματος, οριζόντιοι κλειστοί ή κατακόρυφοι κλειστοί [9].

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν διάφορα παραδείγματα εφαρμογής γεωθερμικών συστημάτων σε συστήματα ψύξης στην πράξη, όπως η ενσωμάτωση συστήματος γεωθερμικής αποθήκευσης σε transcritical CO_2 ψυκτικό σύστημα σουπερμάρκετ. Ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να λειτουργήσει ως μέσο παρεμπόδισης μετάβασης της λειτουργίας στην υπερκρίσιμη περιοχή, χρησιμοποιώντας το έδαφος ως ψύκτη (heat-sink) κατά τις συνθήκες θερμού κλίματος. Από την άλλη πλευρά, κατά τη χειμερινή περίοδο, όπου το ψυκτικό φορτίο των σουπερμάρκετ τυπικά μειώνεται τουλάχιστον στο μισό σε σχέση με την απαίτηση σε ψύξη της καλοκαιρινής περιόδου, η ανεκμετάλλευτη ισχύς των συμπιεστών θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να την ανάκτηση θερμότητας από το υπέδαφος σε περιοχές αβαθούς γεωθερμίας, προσφέροντας θερμότητα είτε στην εγκατάσταση του σουπερμάρκετ,

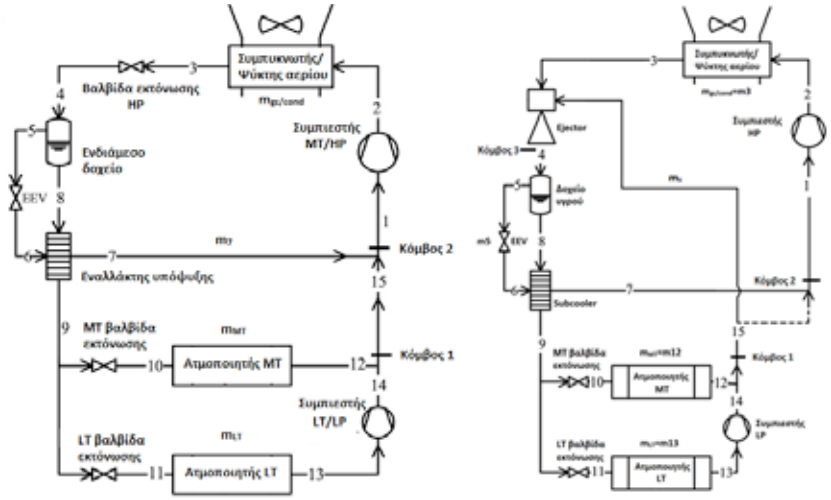
είτε σε γειτονική εγκατάσταση. Η απορρόφηση θερμότητας από το έδαφος ωφελεί ακόμη και στην προετοιμασία του εδάφους, για την αξιοποίησή του ως σύστημα υπόψυξης στην επόμενη καλοκαιρινή περίοδο [10, 11].

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί η βελτίωση της λειτουργίας ψυκτικών κύκλων δύο θερμοκρασιών ατμοποίησης που εφαρμόζονται σε ψυκτικά συστήματα σουπερμάρκετ, με ψυκτικό αμιγώς το διοξείδιο του άνθρακα. Η λειτουργία των συστημάτων μελετάται σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος από 1 έως 40°C. Για τη βελτίωση της απόδοσης του συμβατικού συστήματος booster (CBR) – σύστημα αναφοράς, εξετάζεται καινοτόμος συνδεσμολογία με τη χρήση ejector (EBR). Επιπλέον, τα συστήματα αναβαθμίζονται με γεωεναλλάκτη νερού, σταθερής θερμοκρασίας 20°C σε δύο περιπτώσεις: i) τοποθέτηση στη θέση του συμπυκνωτή και ii) τοποθέτηση μετά τον συμπυκνωτή ή ψύκτη αερίου (υπόψυξη). Για τα νέα συστήματα υπολογίζεται και η ζητούμενη παροχή νερού στον γεωεναλλάκτη. Η ανάλυση όλων των συστημάτων γίνεται με την ανάπτυξη αλγορίθμου στο λογισμικό EES (Engineering Equation Solver) [12].

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1. Τοπολογίες προς εξέταση

Το σύστημα αναφοράς που επιλέχθηκε προς μοντελοποίηση και μελέτη είναι ένα συμβατικό booster ψυκτικό σύστημα CO_2 δύο θερμοκρασιών, με μηχανική υπόψυξη και απομάκρυνση ατμού (CBR), το οποίο στη συνέχεια βελτιώνεται με την προσθήκη εκτοξευτήρα (ejector, EBR). Το σύστημα CBR αποτελεί ένα πραγματικό παράδειγμα συστήματος σουπερμάρκετ για το οποίο είναι διαθέσιμες πραγματικές μετρήσεις [13]. Η μεθοδολογία επίλυσης των συστημάτων ακολουθεί τη μελέτη των Huang et al. [5], με τη διαφορά ότι για το EBR μοντέλο προτάθηκε εναλλακτική τοπολογία. Τα συστήματα παρουσιάζονται στην Εικόνα 1.



Εικόνα 1: Σύστημα αναφοράς (αριστερά), σύστημα booster με ejector (δεξιά) [5]

Για το σύστημα CBR, ξεκινώντας από την κατάσταση 1, το ρευστό συμπιέζεται και ρέει προς τον συμπυκνωτή ή ψύκτη αερίου βρισκόμενο υπό υψηλή πίεση και θερμοκρασία. Στη συνέχεια, μέσω της βαλβίδας HPV, εκτονώνεται στο ενδιάμεσο δοχείο (δοχείο υγρού), στο οποίο το ρευστό διαχωρίζεται βαρυτικά σε κορεσμένο υγρό (κατάσταση 8) και κορεσμένο ατμό (κατάσταση 5). Το ατμώδες τμήμα στη συνέχεια ψύχεται μέσω της βαλβίδας EEV. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το ψυκτικό ρευστό (κατάσταση 6) να μπορεί να απορροφήσει θερμότητα από το κορεσμένο υγρό, που εξέρχεται από το δοχείο υγρού, μέσω ενός εναλλάκτη υπόψυξης (subcooler). Το τελικά υπόψυκτο υγρό (κατάσταση 9) ρέει προς τους ατμοποιητές MT και LT. Ο υπέρθερμος ατμός (κατάσταση 13) ο οποίος εξέρχεται από τον ατμοποιητή LT, συμπιέζεται από έναν συμπιεστή χαμηλής πίεσης (LP) και αναμιγνύεται με τον ατμό της εξόδου του MT ατμοποιητή (κατάσταση 15). Το μίγμα τελικά αναμιγνύεται με τον ατμό στην

έξοδο του subcooler (κατάσταση 1), όπου και ολοκληρώνεται ο κύκλος του CBR συστήματος. Η απομάκρυνση του ατμού από το ενδιάμεσο δοχείο, έχει θετική επίδραση στην απόδοση του συστήματος, αφού συνεισφέρει στη μείωση των απωλειών στραγγαλισμού στις εκτονωτικές βαλβίδες των καταναλώσεων χαμηλής θερμοκρασίας[5].

Στο προτεινόμενο βελτιωμένο σύστημα, η βαλβίδα υψηλής πίεσης αντικαθίσταται από έναν ejector. Στον ejector εισέρχονται δύο ξεχωριστές ροές, η κύρια (primary) και η δευτερογενής (secondary). Η βασική λειτουργία είναι η αξιοποίηση του έργου εκτόνωσης της ροής υψηλής πίεσης ώστε στην έξοδο του εκτοξευτήρα, να επιτευχθεί συνολική ροή με πίεση υψηλότερη από τη δευτερεύουσα. Πιο αναλυτικά, η κύρια ροή, η οποία βρίσκεται σε υψηλή πίεση, επιταχύνεται κατά την είσοδό της στο κινητήριο ακροφύσιο αγγίζοντας την ταχύτητα του ήχου κατά το πιο στενό σημείο εισόδου ενώ, στην έξοδο του ακροφυσίου αγγίζει την ταχύτητα υπερήχων, όπου δημιουργείται μια περιοχή χαμηλής πίεσης. Αυτή η διαφορά πίεσης παρασύρει (entrain) τη δευτερεύουσα ροή μέσα στο ακροφύσιο αναρρόφησης η οποία επιταχύνεται. Οι δύο ροές εμφανίζουν μεγάλη διαφορά πίεσης μεταξύ τους και αναμιγνύονται μόνο εφόσον η δευτερεύουσα ροή αγγίξει την ταχύτητα του ήχου. Τότε, οι δύο ροές έρχονται σε επαφή στον θάλαμο ανάμιξης, όπου η πρωτεύουσα ροή επιβραδύνεται και η δευτερεύουσα επιταχύνεται (μεταφορά ορμής). Η ανάμιξη αυτή γίνεται υπό σταθερή πίεση και εξελίσσεται έως ότου φτάσουν στο τέλος του θαλάμου ανάμιξης, όπου προκαλείται ένα κανονικό ωστικό κύμα, έχοντας ως αποτέλεσμα σημαντική συμπίεση και στιγμιαία πτώση της ταχύτητας ροής από υπερηχητική σε υποηχητική. Στον θάλαμο ανάμιξης τα δύο ρευστά έχουν πλέον κοινή ταχύτητα [14]. Το μίγμα στη συνέχεια κατευθύνεται στον διαχυτήρα, όπου γίνεται μερική ανάκτηση πίεσης [15]. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, η πρωτεύουσα ροή του ejector είναι η ροή υψηλής πίεσης, ερχόμενη από την έξοδο του συμπυκνωτή ή ψύκτη αερίου, ενώ η δευτερεύουσα αποτελεί μέρος της ροής που εξέρχεται από τους ατμοποιητές. Η έξοδος του ejector οδηγείται στο δοχείο υγρού, όπου, όπως και στο συμβατικό σύστημα, η ροή διαχωρίζεται σε μέρος υγρού και μέρος ατμού, τα οποία περνούν από τον subcooler. Ο υπέρθερμος ατμός (κατάσταση 7) αναμιγνύεται με το υπόλοιπο μέρος της ροής των ατμοποιητών που δεν αναρροφήθηκε από τον ejector, ενώ το υπόψυκτο υγρό (κατάσταση 9) κατευθύνεται στους ατμοποιητές.

Οι τοπολογίες που αναπτύχθηκαν παραπάνω στη συνέχεια αναβαθμίζονται με την προσθήκη γεωθερμικού εναλλάκτη. Οι νέες διατάξεις εξετάστηκαν για τοποθέτηση γεωεναλλάκτη ως συμπυκνωτή και ως subcooler, ακριβώς μετά τον συμπυκνωτή ή ψύκτη αερίου. Ο γεωεναλλάκτης που θεωρήθηκε σε αυτήν την ανάλυση, αναφέρεται σε ένα ανοικτό σύστημα σε βάθος έως 30 m, όπου η θερμοκρασία του νερού παραμένει σταθερή και ανεξάρτητη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Συνολικά εξετάζονται έξι συστήματα, τα CBR με και χωρίς γεωεναλλάκτες και EBR με και χωρίς γεωεναλλάκτες.

2.2. Θερμοδυναμική μοντελοποίηση

Για τα συστήματα θεωρήθηκαν τρεις κοινές θερμοκρασιακές ζώνες λειτουργίας για την υποκρίσιμη (T_{amb}≤22°C), μεταβατική (22°C<T_{amb}<27°C) και υπερκρίσιμη περιοχή (T_{amb}≥27°C). Τα αποτελέσματα στη μεταβατική περιοχή βρίσκονται με τη βοήθεια γραμμικής παρεμβολής. Οι συνθήκες λειτουργίας θεωρούνται σταθερές και κοινές για όλα τα υπό μελέτη συστήματα, όπως φαίνονται στον Πίνακα 2.1.

Πίνακας 1: Συνθήκες λειτουργίας των συστημάτων

Ψυκτικό φορτίο MT (Q_{MT})	130 kW
Ψυκτικό φορτίο LT (Q_{LT})	30 kW
Θερμοκρασία ατμοποίησης MT (T_{MT})	-10 °C
Θερμοκρασία ατμοποίησης LT (T_{LT})	-35 °C

Οι θερμοκρασίες ατμοποίησης που επιτυγχάνονται είναι μάλιστα αρκετά χαμηλές, αφού σκοπός είναι η ψύξη ψυγείων και ψυκτικών θαλάμων σουπερμάρκετ. Η διαφορά, περίπου 5-15°C, μεταξύ του ψυκτικού και του αέρα στον θάλαμο ψύξης, διατηρεί τα ευπαθή προϊόντα στις επιθυμητές θερμοκρασίες.

Για τα θερμοδυναμικά μοντέλα των συστημάτων, οι διεργασίες θεωρήθηκαν σταθερές, για τις οποίες λήφθηκαν υπόψη οι εξής γενικές παραδοχές:

- Η πτώση πίεσης στον subcooler θεωρήθηκε αμελητέα.

- Όλες οι διαδικασίες εκτόνωσης θεωρήθηκαν ισενθαλπικές.
- Η μεταφορά θερμότητας προς και από τις σωληνώσεις θεωρήθηκαν αμελητέες.
- Στην έξοδο του ατμοποιητή βγαίνει υπέρθερμος ατμός, με υπερθέρμανση 10K.
- Ο συντελεστής απόδοσης του subcooler, ε, θεωρήθηκε 0,7.
- Η θερμοκρασία προσέγγισης του ψύκτη αερίου θεωρήθηκε σταθερή 3K, ενώ του συμπυκνωτή 8K.
- Το ενδιάμεσο δοχείο (υγρού) θεωρείται ότι διαχωρίζει πλήρως το ρευστό σε κορεσμένο υγρό και κορεσμένο ατμό.
- Τα ψυκτικά φορτία παραμένουν σταθερά με την αλλαγή της θερμοκρασίας περιβάλλοντος.
- Ο γεωθερμικός εναλλάκτης θεωρήθηκε παράλληλης ροής, με αποτελεσματικότητα ίση με ε_{ghe}=0,7.
- Ο γεωεναλλάκτης τροφοδοτείται από νερό σταθερής θερμοκρασίας $T_{w,in}$=20°C. Η θερμοκρασία αυτή είναι συνήθεις για τις συνθήκες της Ελλάδας. Το νερό θεωρείται ότι είναι κατάλληλο για κυκλοφορία εντός του εναλλάκτη.
- Στην περίπτωση που ο εναλλάκτης λειτουργεί ως heat-sink, η θερμοκρασία του νερού στην έξοδο θεωρήθηκε γνωστή και ίση με $T_{w,out}$=25°C. Η διαφορά ΔT_w=5K θερμοκρασιών εισόδου και εξόδου του νερού θεωρείται μία τυπική τιμή σε αυτού του είδους τις εφαρμογές.

2.2.1. Μοντελοποίηση CBR

Σε όλες τις διατάξεις οι συμπιεστές θεωρήθηκαν πραγματικοί [5], με ισεντροπικό βαθμό απόδοσης συναρτήσει του λόγου πιέσεων τους:

$$\eta_{is,HP} = exp\left(-0{,}397 + 0{,}0307 \cdot P_{r,HP} - 0{,}0092 \cdot {P_{r,HP}}^2\right) \quad (1)$$

Όπου, $2{,}22 \le P_{r,HP} \le 3{,}71$

$$\eta_{is,LP} = exp\left(-0{,}584 + 0{,}1902 \cdot P_{r,LP} - 0{,}0449 \cdot {P_{r,LP}}^2\right) \quad (2)$$

Όπου, $1{,}58 \le P_{r,LP} \le 2{,}93$

Η υψηλή πίεση εξαρτάται από την κατάσταση λειτουργίας του συστήματος. Στην υποκρίσιμη λειτουργία, ο εναλλάκτης υψηλής πίεσης λειτουργεί ως συμπυκνωτής και το ρευστό στην έξοδό του είναι κορεσμένο υγρό. Επομένως, η υψηλή πίεση αντιστοιχεί στην πίεση κορεσμού της εκάστοτε θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Ωστόσο, όταν το σύστημα λειτουργεί στην υπερκρίσιμη κατάσταση, η υψηλή πίεση είναι ανεξάρτητη της θερμοκρασίας και υπάρχει βέλτιστη τιμή για την απόδοση του συστήματος. Η βέλτιστη πίεση υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης [5],

$$P_{gc} = exp\left(4{,}361 - 0{,}020 \cdot T_{amp} + 0{,}0007 \cdot {T_{amp}}^2\right) \quad (3)$$

Όσον αφορά τον συμπυκνωτή ή ψύκτη αερίου, η θερμοκρασία εξόδου του ρευστού καθορίζεται από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος T_{amb} και τη θερμοκρασία προσέγγισης, ΔT_{app}. Η θερμοκρασία προσέγγισης προτείνεται να αλλάζει για την κάθε λειτουργία του συστήματος, για τη βέλτιστη απόδοση [16, 17]. Η πρόταση αυτή ακολουθήθηκε σε όλα τα μοντέλα και οι τιμές θεωρήθηκαν 8K στην υποκρίσιμη και 3K στην υπερκρίσιμη λειτουργία.

$$T_{gc/cond} = T_{amp} + \Delta T_{app} \quad (4)$$

Ακόμη μία σημαντική παράμετρος είναι η ενδιάμεση πίεση, P_{int}. Για το σύστημα CBR η ενδιάμεση πίεση δίνεται από τις σχέσεις [5],

$$P_{int} = exp\left(3{,}5 + 0{,}014 \cdot T_{amp} + 2{,}2 \cdot 10^{-4} \cdot {T_{amp}}^2\right), \quad (5)$$

για την υποκρίσιμη κατάσταση

$$P_{int} = 162{,}57 - 3{,}66 \cdot T_{amp} - 1{,}25 \cdot P_{gc} + 0{,}042 \cdot T_{amp} \cdot P_{gc}, \quad (6)$$

για την υπερκρίσιμη κατάσταση

Για την εύρεση των καταστάσεων στους κόμβους 1 και 2 απαιτείται ισολογισμός μαζών και ενέργειας.

- Ισολογισμός ενέργειας στον κόμβο 1

$$(m_{MT} + m_{LT}) \cdot h_{15} = m_{LT} \cdot h_{14} + m_{MT} \cdot h_{12} \quad (7)$$

- Ισολογισμός ενέργειας στον κόμβο 2

$$m_{gc/cond} \cdot h_1 = m_7 \cdot h_7 + (m_{MT} + m_{LT}) \cdot h_{15} \quad (8)$$

Όπου,

$$m_{15} = m_{MT} + m_{LT} \quad (9)$$

$$m_{gc/cond} = m_7 + (m_{MT} + m_{LT}) \quad (10)$$

Οι μάζες ή ροές μαζών, δεδομένου του ότι τα ψυκτικά φορτία είναι γνωστά, προκύπτουν από τις καταναλώσεις στους ατμοποιητές και την ξηρότητα του ρευστού στην ενδιάμεση πίεση:

$$m_{15} = m_{MT} + m_{LT} \quad (11)$$

$$m_{gc/cond} = m_7 + (m_{MT} + m_{LT}) \quad (12)$$

$$Q_{MT} = \dot{m_{MT}} \cdot (h_{12} - h_{10}) \quad (13)$$

$$Q_{LT} = \dot{m_{LT}} \cdot (h_{13} - h_{11}) \quad (14)$$

$$\dot{m_7} = x_4 \cdot \dot{m_{gc/cond}} \quad (15)$$

$$\dot{m_{gc/cond}} = \frac{\dot{m_{15}}}{1 - x_4} \quad (16)$$

Επιπλέον, για τον subcooler ισχύει:

$$T_7 = T_6 + \varepsilon \cdot \Delta T_{56} \quad (17)$$

$$h_9 = h_8 - \frac{x_4}{1 - x_4} \cdot (h_7 - h_6) \quad (18)$$

Εφόσον έχουν προσδιοριστεί όλες οι καταστάσεις του κύκλου, σειρά έχει ο προσδιορισμός των καταναλώσεων στους συμπιεστές. Συγκεκριμένα,

$$W_{HP} = \dot{m_{gc/cond}} \cdot (h_2 - h_1) \quad (19)$$

$$W_{LP} = \dot{m_{LT}} \cdot (h_{14} - h_{13}) \quad (20)$$

$$W_{total} = W_{HP} + W_{LP} \quad (21)$$

Τελικά, ως δείκτης απόδοσης του συστήματος επιλέχθηκε ο COP, ο οποίος για το παρόν σύστημα ορίζεται ως:

$$COP = \frac{Q_{MT} + Q_{LT}}{W_{total}} \quad (22)$$

Για το CBR, τα αποτελέσματα επαληθεύτηκαν με εκείνα των Huang et al. [5], με αμελητέα απόλυτη απόκλιση των καμπυλών του COP (0,26%) και αμελητέα μέση απόλυτη απόκλιση της ενθαλπίας από όλες τις καταστάσεις λειτουργίας (0,67%).

2.2.2. Μοντέλο για το σύστημα με ejector

Η μεθοδολογία επίλυσης του EBR ακολουθεί ως βάση τη μεθοδολογία επίλυσης του συμβατικού συστήματος. Οι εξισώσεις (1), (2), (5), (13), (14) και (19) έως (22) παραμένουν ίδιες. Στα σημεία ανάμιξης ροών (Κόμβος 1, 2 και 3) η πίεση είναι κοινή. Θέτοντας την επιθυμητή ενδιάμεση πίεση, P_{int}, υπολογίζεται ο λόγος ανάμιξης μαζών στον ejector, $\mu=m_s/m_3$. Αναλόγως την τιμή του λόγου διοχέτευσης μαζών στον ejector, μ, υπολογίζεται και η μάζα m_s, δηλαδή το μέρος της ροής χαμηλής πίεσης που έχει την ικανότητα να αναρροφήσει ο ejector στις δεδομένες συνθήκες. Η υπόλοιπη μάζα, $m_{12}+m_{13}-m_s$, θα οδηγηθεί στον συμπιεστή HP, αφού πρώτα αναμιχθεί με τον κορεσμένο ατμό (κατάσταση 7). Για να εξασφαλιστεί η απαιτούμενη διαφορά πίεσης στην είσοδο και την έξοδο του ejector, η οποία δημιουργεί και την αναρρόφηση μάζας, η ενδιάμεση πίεση, επιλέχθηκε να κρατηθεί μέσα σε ένα εύρος μεταξύ 35 και 45bar, με τα αποτελέσματα να αναφέρονται στα 35bar. Αναμένεται ότι όσο αυξάνεται η τιμή της στην υπερκρίσιμη λειτουργία θα αυξάνεται και η απόδοση, καθώς κατ΄αυτόν τον τρόπο, μειώνεται η κατανάλωση στον συμπιεστή HP. Για υψηλότερες πιέσεις εξόδου, ο ejector υπολειτουργεί.

Για το EBR, η νέα βέλτιστη υψηλή πίεση δίνεται από τη σχέση [5]:

$$P_{gc} = exp\left(4{,}775 - 0{,}048 \cdot T_{amp} + 0{,}0012 \cdot {T_{amp}}^2\right) \quad (23)$$

Στο δοχείου υγρού ισχύει η αρχή διατήρηση της ενέργειας και μάζας αντίστοιχα:

$$(m_3 + m_s) \cdot h_4 = m_5 \cdot h_5 + m_8 \cdot h_8 \quad (24)$$

$$m_3 + m_s = m_5 + m_8 \quad (25)$$

Για τον subcooler από την αρχή διατήρησης της ενέργειας ισχύει:

$$m_5 \cdot (h_7 - h_6) = m_8 \cdot (h_8 - h_9) \quad (26)$$

Σύμφωνα με το δεδομένο σύστημα, για τις μάζες του κυκλώματος ισχύει:

$$m_8 = m_{12} + m_{13} \quad (27)$$

$$m_{gc/cond} = m_{MT} + m_{LT} - m_s + m_5 \quad (28)$$

Για τη μοντελοποίηση του ejector υιοθετήθηκε το μοντέλο που προτάθηκε από τους Kornhauser [18] και Sarkar [19], για διφασικό ejector υπό σταθερή πίεση ανάμιξης. Στην ανάλυση αυτή, η ροή μέσα στον εκτοξευτήρα θεωρείται ομογενής, σε ισορροπία και μονοδιάστατη. Επιπλέον οι ιδιότητες των ροών και οι ταχύτητές τους παραμένουν τμηματικά σταθερές. Συνεπώς, οι διεργασίες στα επιμέρους τμήματα του ejector μπορούν να μεταφραστούν σε όρους απόδοσης. Οι αποδόσεις αυτές λαμβάνουν υπόψιν τις απώλειες που προκαλούνται από τη μη-αντιστρεψιμότητα των διεργασιών και το ωστικό κύμα. Η απόδοση στον θάλαμο ανάμιξης θεωρείται μέγιστη (ίση με 1), ενώ η κινητική ενέργεια εκτός του ejector αμελητέα. Αναφέρεται ότι, στις περισσότερες μελέτες, οι αποδόσεις των μερών του ejector κυμαίνονται από 0,7 έως 0,95 εξετάζοντας διάφορα ρευστά [20].

Για τον συγκεκριμένο κύκλο, οι αποδόσεις στο κινητήριο ακροφύσιο, το ακροφύσιο αναρρόφησης και τον διαχυτήρα θεωρήθηκαν $\eta_m = \eta_s = 0{,}8$ και $\eta_{diff} = 0{,}75$ αντίστοιχα. Επιπλέον, οι πιέσεις στο κινητήριο ακροφύσιο, αναρρόφησης και στην είσοδο του θαλάμου ανάμιξης θεωρήθηκαν ίσες. Στο μοντέλο σταθερής πίεσης, η πίεση αυτή είναι ίση τελικά με την πίεση στο θάλαμο ανάμιξης, δηλαδή $P_{m,out} = P_{s,out} = P_{mix}$ και θα πρέπει να είναι μικρότερη από την πίεση στον ατμοποιητή. Οι πιέσεις αυτές συνήθως θεωρούνται με μία τιμή. Στη βιβλιογραφία, είναι πολύ συχνό η διαφορά πιέσεων μεταξύ της εισόδου και εξόδου από το ακροφύσιο αναρρόφησης, $P_{s,in}$-$P_{s,out,}$ να θεωρείται ίση με 0,3bar, με την προϋπόθεση ότι ο COP παραμένει περίπου σταθερός σε σχέση με την πίεση αυτή σε κάθε θερμοκρασία περιβάλλοντος [21]. Στο μοντέλο που αναπτύχθηκε, λόγω της περιπλοκότητας του συστήματος, η πίεση αυτή θεωρήθηκε ίση με 0,3bar.

Εφόσον οι συνθήκες εισόδου στον ejector είναι γνωστές και η πίεση στην έξοδο του ακροφυσίου έχουν θεωρηθεί, για το κινητήριο ακροφύσιο μπορεί να βρεθεί η ισεντροπική ενθαλπία στο σημείο εξόδου, ως εξής;

$$h_{m,out,is} = h(s_{m,in}; p_{m,out}) \quad (29)$$

Από τον ορισμό της ισεντροπικής απόδοσης του κινητήριου ακροφυσίου, η ενθαλπία στην έξοδό του θα είναι:

$$h_{m,out,is} = h(s_{m,in}; p_{m,out}) \quad (30)$$

$$\eta_m = \frac{h_{m,in} - h_{m,out}}{h_{m,in} - h_{m,out,is}} \quad (31)$$

Από την αρχή διατήρηση της ενέργειας, θεωρώντας ότι η κινητική ενέργεια στην είσοδο του ακροφυσίου είναι αμελητέα, προκύπτει:

$$h_{m,in} = h_{m,out} + \frac{u_{m,out}^2}{2} \quad (32)$$

Αντιστοίχως, μπορούν να βρεθούν οι εξισώσεις για το δευτερεύον ακροφύσιο:

$$h_{s,out,is} = h(s_{s,in}; p_{s,out}) \quad (33)$$

$$\eta_s = \frac{h_{s,in} - h_{s,out}}{h_{s,in} - h_{s,out,is}} \quad (34)$$

$$h_{s,in} = h_{s,out} + \frac{u_{s,out}^2}{2} \tag{35}$$

Η ροή μάζας στο θάλαμο ανάμιξης των δύο ρευστών θα είναι:

$$\dot{m_{mix}} = \dot{m_{total}} = \dot{m_m} + \dot{m_s} \tag{36}$$

Σύμφωνα με τον ορισμό του λόγου διοχέτευσης μάζας, από την αρχή διατήρησης της ορμής και ενέργειας αντιστοίχως ισχύει:

$$u_{mix,out} = \frac{1}{1+\mu} \cdot u_{m,out} + \frac{\mu}{1+\mu} \cdot u_{s,out} \tag{37}$$

$$h_{mix,out} + \frac{u_{mix,out}^2}{2} = \frac{1}{1+\mu} \cdot \left(h_{m,in} + \mu \cdot h_{s,in}\right) \tag{38}$$

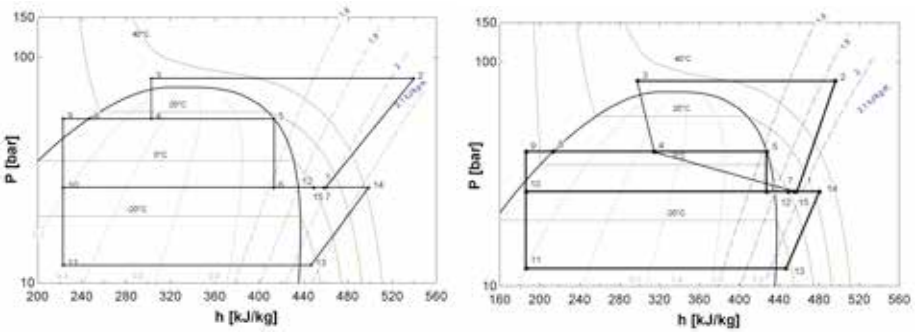
Η ενθαλπία στο σημείο στης εξόδου από τον διαχυτήρα, μπορεί να βρεθεί βάση της διαχείρισης ενέργειας στον εκτοξευτήρα.

$$h_{diff,out} = \frac{h_{m,in} + \mu \cdot h_{s,in}}{1+\mu} \tag{39}$$

Από τον ορισμό της ισεντροπικής απόδοσης του διαχυτήρα, μπορεί να βρεθεί η ισεντροπική ενθαλπία στην έξοδο, βάση της οποίας υπολογίζεται και η πίεση στην έξοδο του ejector.

$$\eta_{diff} = \frac{h_{mix,out} - h_{diff,out,is}}{h_{mix,out} - h_{diff,out}} \tag{40}$$

$$p_{diff,out} = p(s_{mix,out}; h_{diff,out,is}) \tag{41}$$



Εικόνα 2: Διαγράμματα πίεσης-ενθαλπίας R-744 συστήματος αναφοράς (αριστερά) και συστήματος booster με ejector (δεξιά), για T_{amb}=30°C

2.2.3. Μοντέλο γεωθερμικών εναλλακτών

Στα συστήματα με γεωεναλλάκτη, η θερμοδυναμική ανάλυση παραμένει ίδια, με τη μόνη διαφορά ότι πλέον, ο κύριος άγνωστος είναι η θερμοκρασία εξόδου του ψυκτικού υγρού από τον γεωθερμικό εναλλάκτη, η οποία βρίσκεται μέσω της εξίσωσης αποτελεσματικότητας του εναλλάκτη, ε_{ghe}. Η θερμότητα που απορροφά το νερό είναι ίση με τη θερμότητα που αποβάλλει το ψυκτικό ρευστό από την είσοδο στην έξοδο του γεωεναλλάκτη, και αντίστροφα. Έτσι, επιλύοντας το σύστημα μπορεί να βρεθεί η παροχή μάζας CO_2 στην είσοδο του γεωεναλλάκτη. Με δεδομένη την παροχή και σε συνδυασμό με τις εξισώσεις (40) και (41), μπορεί να βρεθεί και η παροχή μάζας νερού που είναι απαραίτητη για να καλύψει τις ανάγκες λειτουργίας του υπό εξεταζόμενου συστήματος.

$$\varepsilon = \frac{Tc_o - Tc_i}{Th_i - Tc_i} \tag{40}$$

Όπου, c_o=ψυχρό στην έξοδο και h_i=θερμό στην είσοδο

$$Q_{actutal} = C_h \cdot (Th_i - Th_o) = C_c \cdot (Tc_i - Tc_o) \quad (41)$$

Όπου C=θερμοχωρητικότητα

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

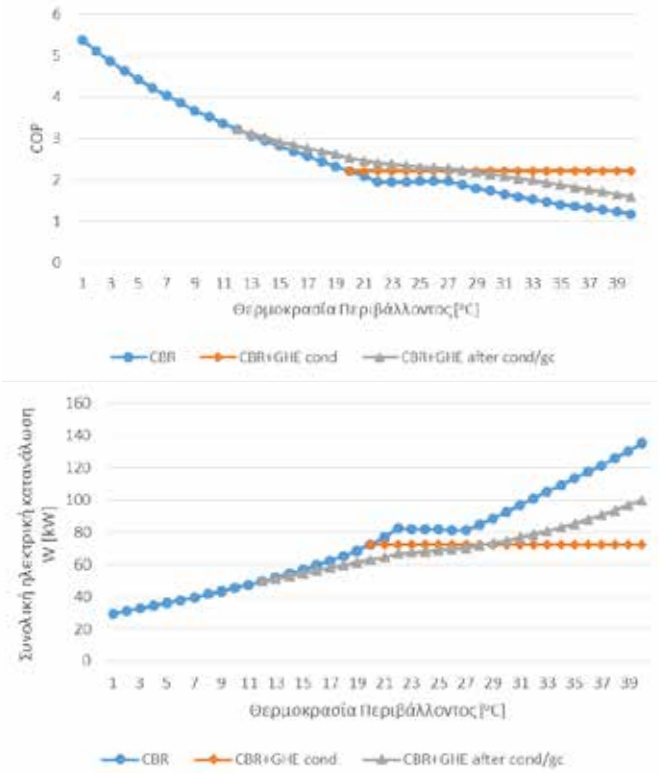
Από τα διαγράμματα Mollier (Εικόνα 2) μπορεί να παρατηρηθεί ήδη η μείωση στην κατανάλωση στην υπερκρίσιμη λειτουργία στο σύστημα EBR. Συνολικά, το σύστημα EBR συμβάλλει στη βελτίωση της λειτουργίας του συστήματος τόσο στην υποκρίσιμη, όσο και την υπερκρίσιμη λειτουργία. Ο ορισμός σταθερών ισεντροπικών βαθμών απόδοσης εντός του ejector οδηγεί τον ejector να παρουσιάζει μεγαλύτερη βελτίωση απόδοσης στις χαμηλές θερμοκρασίες (πιέσεις). Ωστόσο, τα μεγέθη αυτά εξαρτώνται από τη γεωμετρία του ejector, όπου για μεγαλύτερες παροχές δίνουν καλύτερα αποτελέσματα. Επίσης, στις υψηλές θερμοκρασίες (πιέσεις) παρά το γεγονός ότι αυξάνεται το ποσοστό αναρρόφησης μάζας από τη γραμμή αναρρόφησης του συμπιεστή, η ραγδαία αύξηση της κατανάλωσης στην υπερκρίσιμη κατάσταση μειώνει το δυναμικό βελτίωσης του ejector. Συγκεκριμένα, η μέγιστη βελτίωση του COP στην υποκρίσιμη λειτουργία υπολογίστηκε 157,36% στους T_{amb}=16°C, ενώ στην υπερκρίσιμη 67,02% στους 27°C. Έχοντας υποθέσει σταθερό ψυκτικό φορτίο για κάθε θερμοκρασία περιβάλλοντος, η βελτίωση του COP μεταφράζεται ως μείωση στη συνολική ηλεκτρική κατανάλωση των συμπιεστών κατά 61,18% για T_{amb}=16°C και 40,12% για Tamb=27°C.

Ωστόσο, το προτεινόμενο σύστημα EBR σημειώνει ορισμένες ιδιαιτερότητες. Συγκεκριμένα, ο ejector τίθεται σε λειτουργία για περιβαλλοντικές θερμοκρασίες άνω των 8°C, καθότι σε χαμηλότερες θερμοκρασίες αδυνατεί να αναρροφήσει στο δευτερεύον αεροφύσιο και συνεπώς υπολειτουργεί (λειτουργεί ως απλή HPV). Οι 8°C υπολογίστηκαν ως το κατώτερο όριο αναρρόφησης, 5%. Σε αυτή την περίπτωση, για θερμοκρασίες μικρότερες από το κατώτερο όριο λειτουργίας, μπορεί να γίνει ενσωμάτωση κατάλληλου αυτοματισμού, ώστε η δευτερεύουσα γραμμή αναρρόφησης του ejector μπορεί να παρακάμπτεται (κατάσταση 15) και να οδηγείται όλη η επιστροφή των ατμοποιητών στην αναρρόφηση του συμπιεστή HP. Τότε, το σύστημα λειτουργεί ως απλό CBR. Ακόμη μια ιδιαιτερότητα αφορά τη λειτουργία του subcooler μετά τον ejector (Σημεία 8-9 και 6-7, Εικόνα 1). Συγκεκριμένα, ο subcooler στο EBR ενεργοποιείται στους 16°C, καθώς κάτω από αυτή τη θερμοκρασία το flash-gas θεωρείται πολύ μικρό, προσφέροντας αμελητέο όφελος στο σύστημα. Επομένως, από 8 έως και 15°C ο ejector λειτουργεί χωρίς τον subcooler. Κάτω των 8°C, ο ejector αδυνατεί να αναρροφά και λειτουργεί ως HPV ρυθμίζοντας την υψηλή πίεση.

Η ενσωμάτωση γεωθερμίας στο σύστημα φαίνεται να βελτιώνει περαιτέρω την απόδοση των συστημάτων. Από τα σχήματα της Εικόνας 3 είναι φανερό ότι, αναλόγως της θερμοκρασίας, διαφορετικό σύστημα υπερέχει ενεργειακά. Έχοντας θεωρήσει θερμοκρασία νερού 20°C και ΔT_{app}=8K, ο γεωεναλλάκτης υπόψυξης τίθεται σε λειτουργία για θερμοκρασίες άνω των 12°C. Για χαμηλότερες θερμοκρασίες περιβάλλοντος, στο σύστημα μπορεί να προστεθεί αυτοματισμός, όπως μια τρίοδη βαλβίδα, η οποία θα επιτρέπει στο ψυκτικό να περνά από τον γεωεναλλάκτη για θερμοκρασίες εισόδου μεγαλύτερες των 20°C, ενώ θα το προσπερνά για χαμηλότερες θερμοκρασίες. Ο subcooler, ρυθμίζει την ποσότητα κορεσμένου ατμού, η οποία οδηγείται τελικά στον συμπιεστή. Η επίδραση είναι σημαντική ειδικότερα στην υπερκρίσιμη λειτουργία, δηλαδή στη λειτουργία κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Με την υπόψυξη, η απόδοση βελτιώνεται έως και 23,60% στους 22°C, με εξοικονόμηση έως και 19,09% σε σχέση με το αρχικό σύστημα. Από τους 29°C είναι πλέον φανερό το ενεργειακό προβάδισμα του συστήματος με τον γεωεναλλάκτη στον συμπυκνωτή. Όταν ο γεωθερμικός εναλλάκτης τοποθετηθεί στη θέση του συμπυκνωτή, τότε το σύστημα λειτουργεί συνεχώς στην υποκρίσιμη κατάσταση, ανεξαρτήτως τη διακύμανση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Κατ' αυτόν τον τρόπο, ο συντελεστής συμπεριφοράς και η συνολική κατανάλωσης ηλεκτρικής ισχύος από τους συμπιεστές έχουν σταθερή τιμή. Το σύστημα αυτό, σε σύγκριση με το απλό CBR, βελτιώνει την απόδοση κατά 22,06% και εξοικονομεί ενέργεια κατά 18,08% στους 29°C, ενώ στους 40°C καταφέρνει βελτίωση έως και 86,64%, με εξοικονόμηση έως και 46,41%. Από την άλλη πλευρά, στις αντίστοιχες συνθήκες, ο γεωεναλλάκτης υπόψυξης, βελτιώνει κατά 20,73% την απόδοση και εξοικονομεί ενέργεια κατά 17,06% στους 29°C, ενώ στους 40°C πετυχαίνει μόνο 34,32% βελτίωση της απόδοσης και 26,09% εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας στους συμπιεστές.

Για τις δύο διαφορετικές θέσεις του γεωεναλλάκτη, υπάρχει και διαφορετική απαίτηση σε παροχή νερού. Συγκεκριμένα, για τον γεωεναλλάκτη που λειτουργεί ως συμπυκνωτής, η παροχή απαιτείται να είναι σταθερή και ίση με 11,11 kg/sec, ενώ στην περίπτωση του γεωεναλλάκτη υπόψυξης, η παροχή κυμαίνεται από 0 έως 2,53 kg/sec (για 40°C). Όπως είναι αναμενόμενο, αυξανόμενης της

θερμοκρασίας, η παροχή νερού αυξάνεται, καθώς αυξάνεται και η θερμότητα που εναλλάσσεται μεταξύ των ρευστών.

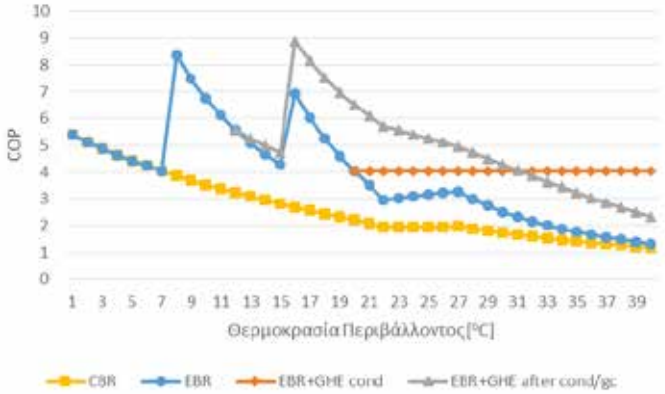


Εικόνα 3: Μεταβολή του συντελεστή συμπεριφοράς (πάνω) και της συνολικής ηλεκτρικής κατανάλωσης των συστημάτων CBR με γεωθερμικό εναλλάκτη σε λειτουργία σε σχέση με την εξωτερική θερμοκρασία

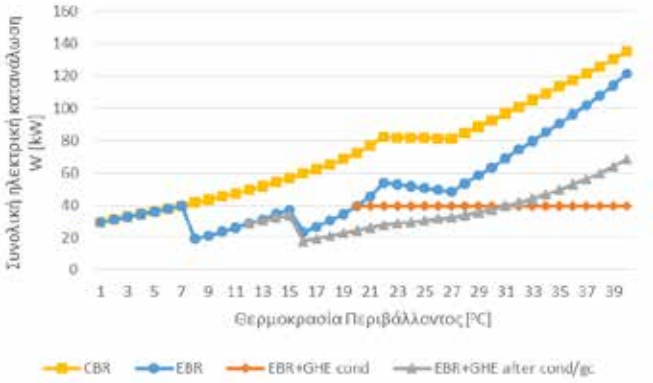
Κατά όμοιο τρόπο, συγκρίνονται τα αποτελέσματα βελτίωσης με γεωθερμία στο σύστημα EBR. Η μέση πίεση επιλέχθηκε ίση με 35bar, εξαιτίας του ότι, αυξανόμενης τις πίεσης, ο λόγος μ, στον ejector μειώνεται σημαντικά. Επιπλέον, για χαμηλές θερμοκρασίες, η μέση πίεση δεν μπορεί να ξεπεράσει τα 40bar. Και σε αυτή την περίπτωση, αναλόγως τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, διαφορετικό σύστημα υπερέχει ενεργειακά. Συγκεκριμένα, για θερμοκρασίες από 1 έως 12°C, το σύστημα λειτουργεί ως απλό EBR, όπως συζητήθηκε παραπάνω. Ξεκινώντας από τους 12°C ο γεωεναλλάκτης υπόψυξης μπορεί να τεθεί σε λειτουργία. Η επίδραση του γεωεναλλάκτη ξεκινά να είναι σημαντική από 16°C. Μάλιστα, η μεταβατική περιοχή φαίνεται να έχει ομαλοποιηθεί λόγω της επίδρασης της γεωθερμικής υπόψυξης. Με τη γεωθερμική υπόψυξη, η απόδοση βελτιώνεται έως και 92,19% στους 22°C, με εξοικονόμηση έως και 47,98% σε σχέση με το απλό EBR σύστημα. Από τους 32°C είναι πλέον φανερό το ενεργειακό προβάδισμα του συστήματος με τον γεωεναλλάκτη στον συμπυκνωτή. Με τον γεωεναλλάκτη στη συμπύκνωση, όπως και στο CBR, το σύστημα λειτουργεί πάντα στην υποκρίσιμη κατάσταση με σταθερή κατανάλωση και αποδόσεις. Το σύστημα αυτό, σε σχέση με το απλό EBR, βελτιώνει την απόδοση κατά 87,40% και εξοικονομεί ενέργεια κατά 46,64% στους 32°C, ενώ στους 40°C καταφέρνει βελτίωση έως και 206,31%, με εξοικονόμηση έως και 67,36% στον συμπυκνωτή. Από την άλλη πλευρά, στις αντίστοιχες συνθήκες, ο γεωεναλλάκτης υπόψυξης, βελτιώνει κατά 78,85% την απόδοση και εξοικονομεί ενέργεια κατά 44,08% στους 32°C, ενώ στους 40°C πετυχαίνει μόνο 77,74% βελτίωση της απόδοσης και 43,75% εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας στους συμπιεστές.

Η απαίτηση σε παροχή νερού με το EBR είναι πλέον μειωμένη. Η μέγιστη παροχή νερού υπολογίστηκε στα 2,02 kg/sec (40°C), δηλαδή 20% μικρότερη απαίτηση σε παροχή με την αντίστοιχη

περίπτωση βελτίωσης με γεωθερμία στο σύστημα CBR. Τέλος, η ανάγκη για παροχή νερού στον γεωεναλλάκτη στη συμπύκνωση, για θερμοκρασία περιβάλλοντος 40°C, είναι περίπου κατά 5 φορές μεγαλύτερη σε σχέση με την περίπτωση του γεωεναλλάκτη υπόψυξης.



Εικόνα 4: Μεταβολή του συντελεστή συμπεριφοράς των συστημάτων EBR με γεωθερμικό εναλλάκτη σε λειτουργία σε σχέση με την εξωτερική θερμοκρασία



Εικόνα 5: Συνολική ηλεκτρική κατανάλωση των συστημάτων EBR με γεωθερμικό εναλλάκτη σε λειτουργία σε σχέση με την εξωτερική θερμοκρασία

Φανερή είναι και η βελτίωση που επιτυγχάνουν τα συστήματα EBR σε σχέση με το απλό συμβατικό CBR. Συγκεκριμένα, οι μέγιστες βελτιώσεις που επιτυγχάνονται είναι:

- Στο σύστημα EBR 67,02% βελτίωση του COP και 40,12% μείωση των ηλεκτρικών καταναλώσεων στους 27°C, ενώ μέγιστη απόκλιση εμφανίζεται στους 16°C με 157,56% αύξηση COP και 61,18% εξοικονόμηση στις καταναλώσεις.
- Στο σύστημα EBR με γεωεναλλάκτη ως subcooler, 229,69% βελτίωση του COP και 69,68% μείωση των ηλεκτρικών καταναλώσεων στους 16°C.
- Στο σύστημα EBR με γεωεναλλάκτη στον συμπυκνωτή, 240,74% βελτίωση του COP και 70,64% μείωση των ηλεκτρικών καταναλώσεων στους 40°C.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτή την εργασία εξετάστηκε η βελτίωση του συστήματος CBR με τη χρήση ejector, καθώς και η περαιτέρω αναβάθμιση των προηγουμένων με τοποθέτηση γεωεναλλάκτη νερού κανονικής γεωθερμίας (20°C) σε δύο διαφορετικές συνδεσμολογίες. Η διάταξη του συστήματος CBR αντικατοπτρίζει ένα πραγματικό σύστημα σουπερμάρκετ, με ρεαλιστικές απαιτήσεις ψυκτικού φορτίου και θερμοκρασιών ατμοποίησης. Σε όλες τις διατάξεις το ψυκτικό φορτίο θεωρήθηκε σταθερό σε όλο το εξεταζόμενο εύρος θερμοκρασιών περιβάλλοντος (1÷40°C) και οι ηλεκτρικές καταναλώσεις αναφέρονται μόνο στους συμπιεστές, καθότι μελετήθηκε μόνο η εσωτερική βελτίωση των συστημάτων. Τα βασικά συμπεράσματα συνοπτικά είναι:

- Η χρήση ejector σε transcritical booster CO_2 αποδεικνύεται ωφέλιμη, καθώς ανακτάται μέρος του έργου των συμπιεστών. Η βελτίωση παρατηρείται ότι είναι μεγαλύτερη στις χαμηλές θερμοκρασίες, λόγω του ορισμού σταθερών ισεντροπικών βαθμών απόδοσης εντός του ejector, καθώς και της ραγδαίας αύξησης κατανάλωσης στους συμπιεστές στην υπερκρίσιμη λειτουργία. Το προτεινόμενο σύστημα EBR ξεκινά τη λειτουργία του για θερμοκρασίες από 8°C, ενώ με τη βοήθεια αυτοματισμού σε χαμηλότερες θερμοκρασίες λειτουργεί ως CBR. Οι μέγιστες αποκλίσεις στον COP βρέθηκαν για θερμοκρασίες περιβάλλοντος 16°C και 27°C, με βελτίωση κατά 157,56%, και 67,02% αντίστοιχα. Δηλαδή, η μέγιστες βελτιώσεις συμβαίνουν στην αρχή κάθε ζώνης λειτουργίας, με μείωση των καταναλώσεων κατά 61,18% και 40,12% αντίστοιχα.
- Όσον αφορά τη βελτίωση με τοποθέτηση γεωεναλλάκτη, τότε, όταν ο γεωεναλλάκτης τοποθετείται μετά τον συμπυκνωτή ή ψύκτη αερίου (στην υπόψυξη), τότε, επιδρά πάντοτε βελτιωτικά σε σχέση με το αρχικό σύστημα, μπαίνοντας σε λειτουργία όταν η εξωτερική θερμοκρασία ξεπεράσει τους 12°C (για θερμοκρασία προσέγγισης 8K). Αυτό ωστόσο, δεν ισχύει στην περίπτωση που τοποθετείται στη συμπύκνωση, αφού η θετική επίδραση ξεκινά άνω των 20°C.
- Συνδυαστικά με τη γεωθερμία, το απλό σύστημα CBR για θερμοκρασίες από 1 έως 12°C λειτουργεί ως έχει. Ξεκινώντας από τους 12°C ο γεωεναλλάκτης υπόψυξης μπορεί να τεθεί σε λειτουργία και το σύστημα εμφανίζει βελτίωση απόδοσης έως και 23,60% στους 22°C, με εξοικονόμηση έως και 19,09% σε σχέση με το αρχικό σύστημα. Από τους 29°C, ενεργειακό προβάδισμα έχει ο γεωεναλλάκτης στον συμπυκνωτή. Το σύστημα αυτό, σε σύγκριση με το απλό CBR, βελτιώνει την απόδοση κατά 22,06% και εξοικονομεί ενέργεια κατά 18,08% στους 29°C, ενώ στους 40°C καταφέρνει βελτίωση έως και 86,64%, με εξοικονόμηση έως και 46,41%. Όμοια συμπεριφορά παρουσιάζει και η βελτίωση του συστήματος EBR με γεωθερμία. Σε αυτή την περίπτωση, ο γεωεναλλάκτης απαιτεί λιγότερη παροχή νερού και συγκεκριμένα, στη συνδεσμολογία υπόψυξης η μείωση φτάνει έως και 20%, ενώ στη συνδεσμολογία στον συμπυκνωτή η μείωση είναι σταθερά 14% σε σχέση με τις αντίστοιχες τοπολογίες του CBR συστήματος.
- Συνδυαστικά και με τη γεωθερμία, το σύστημα EBR για θερμοκρασίες από 1 έως 8°C, λειτουργεί ως το CBR, με τον ejector να προσπερνάται με αυτοματισμό. Από τους 8 έως 31°C ο γεωεναλλάκτης υπόψυξης μπορεί να τεθεί σε λειτουργία και το σύστημα εμφανίζει βελτίωση απόδοσης έως και 74,98% στους 31°C, με εξοικονόμηση έως και 42,85% σε σχέση με το αρχικό σύστημα. Από τους 32°C, ενεργειακό προβάδισμα έχει ο γεωεναλλάκτης στον συμπυκνωτή. Το σύστημα αυτό, σε σύγκριση με το EBR, βελτιώνει την απόδοση κατά 87,40% και εξοικονομεί ενέργεια κατά 46,64% στους 32°C, ενώ στους 40°C καταφέρνει βελτίωση έως και 206,41%, με εξοικονόμηση έως και 67,36%.
- Οι διαφορετικές παραλλαγές στο σύστημα αναφοράς μπορούν να λειτουργήσουν και συνδυαστικά, με τοποθέτηση αυτοματισμού, θέτοντας σε λειτουργία εκείνα που προσφέρουν καλύτερη απόδοση ή και αντίστοιχα, να προσπερνούνται εκείνα τα στοιχεία που δεν μπορούν να συμβάλλουν στη βελτίωση του συστήματος σε κάθε εύρος θερμοκρασιών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας - Πρωτόκολλο του Κυότο. http://www.ypeka.gr/ (accessed August 5, 2020).

[2] EU legislation to control F-gases | Climate Action, (2015). https://ec.europa.eu (accessed August 5, 2020).

[3] Κλιματική αλλαγή — Κύρωση της συμφωνίας του Παρισιού από την ΕΕ, (2016). https://eur-lex.europa.eu/ (accessed August 5, 2020).

[4] Oko-Recherche, “Briefing Paper Availability of alternatives to HFCs in commercial refrigeration in the EU Context & Methodology.” https://ec.europa.eu (accessed August 5, 2020).

[5] Z. Huang, H. Zhao, Z. Yu, J. Han, “Simulation and optimization of a R744 two- temperature supermarket refrigeration system with an ejector,” Int. J. Refrig. 90 (2018) 73–82.

[6] M.H. Kim, J. Pettersen, C.W. Bullard, “Fundamental process and system design issues in CO_2 vapor compression systems,” Prog. Energy Combust. Sci. 30 (2004) 119–174.

[7] C. Arpagaus, F. Bless, J. Schiffmann, S.S. Bertsch, “Multi-temperature heat pumps: A literature review,” Int. J. Refrig. 69 (2016) 437–465.

[8] H.K. Ersoy, N. Bilir, “Performance characteristics of ejector expander transcritical CO_2 refrigeration cycle,” Proc. Inst. Mech. Eng. Part A J. Power Energy. 226 (2012) 623–635.

[9] Μ.. Κ.Μ.. Κ.Κ. Βραχόπουλος, “Κανονική γεωθερμία - αρχές σχεδιασμού γεωθερμικών συστημάτων και εφαρμογές.” [ηλεκτρ. βιβλ.], Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών, Αθήνα, 2015.

[10] W. Jinggang, K. Ligai, L. Jie, “CO_2 transcritical cycle for ground source heat pump,” in: 2009 WRI World Congr. Comput. Sci. Inf. Eng. CSIE 2009, 2009: pp. 213–217.

[11] M. Karampour, C. Mateu-Royo, J. Rogstam, S. Sawalha,”Geothermal storage integration into a supermarket’s CO_2 refrigeration system,” Int. J. Refrig. 106 (2019) 492–505.

[12] S. Klein, G. Nellis, “Mastering EES,” 63rd ed., 2001. http://fchart.com (accessed August 10, 2020).

[13] S. Sawalha, M. Karampour, J. Rogstam, “Field measurements of supermarket refrigeration systems. Part I: Analysis of CO_2 transcritical refrigeration systems,” Appl. Therm. Eng. 87 (2015) 633–647.

[14] A. Hafner, S. Försterling, K. Banasiak, “Multi-ejector concept for R-744 supermarket refrigeration,” Int. J. Refrig. 43 (2014) 1–13.

[15] H. Zhao, K. Zhang, L. Wang, J. Han, “Thermodynamic investigation of a booster-assisted ejector refrigeration system,” Appl. Therm. Eng. 104 (2016) 274–281.

[16] P. Gullo, B. Elmegaard, G. Cortella, “Energy and environmental performance assessment of R744 booster supermarket refrigeration systems operating in warm climates,” Int. J. Refrig. 64 (2016) 61–79.

[17] G. Mitsopoulos, E. Syngounas, D. Tsimpoukis, E. Bellos, C. Tzivanidis, S. Anagnostatos, “Annual performance of a supermarket refrigeration system using different configurations with CO_2 refrigerant,” Energy Convers. Manag. X. 1 (2019) 100006.

[18] A.A. Kornhauser, “The Use Of An Ejector as a expander,” Proc. 25th Intersoc. Energy Convers. Eng. Conf. 5 (1990) 79–84.

[19] J. Sarkar, “Optimization of ejector-expansion transcritical CO_2 heat pump cycle,” Energy. 33 (2008) 1399–1406.

[20] F. Liu, E.A. Groll, “Study of ejector efficiencies in refrigeration cycles,” Appl. Therm. Eng. 52 (2013) 360–370.

[21] D. Li, E.A. Groll, “Transcritical CO_2 refrigeration cycle with ejector-expansion device,” Int. J. Refrig. 28 (2005) 766–773.

ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΠΕΔΙΩΝ ΕΘΝΙΚΟΥ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΟΣ

Βασίλης Γαγάνης[1], Σοφία Σταματάκη[1]

[1] Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
e-mail: vgaganis@metal.ntua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Επανειλημμένες έρευνες στην Ελλάδα έχουν αποδείξει την ύπαρξη βιώσιμων πηγών γεωθερμικής ενέργειας, τόσο τοπικού ενδιαφέροντος (θερμοκρασία < 90 °C) όσο και εθνικού (υψηλότερες θερμοκρασίες). Οι μεν πρώτες έχουν γνωρίσει πολυετή ανάπτυξη, ιδίως στα πεδία της Βόρειας Ελλάδας, ενώ οι δε δεύτερες υστερούν παρά τις απόπειρες που έγιναν στο παρελθόν στα γεωθερμικά πεδία της Μήλου και της Νισύρου.

Σήμερα το ενδιαφέρον για αξιοποίηση γεωθερμικών πηγών υψηλής ενθαλπίας με στόχο την ηλεκτροπαραγωγή έχει αναζωογονηθεί με την ΔΕΗ Ανανεώσιμες να πρωτοστατεί, την ΗΛΕΚΤΩΡ (ΕΛΛΑΚΤΩΡ) να συμμετέχει ως στρατηγικός εταίρος και τις περιοχές Μήλου-Κιμώλου, Νισύρου, Λέσβου και Μεθάνων να ξαναμπαίνουν στο μικροσκόπιο με στόχο την εγκατάσταση μονάδας παραγωγής 5 MW στη Μήλο μέχρι το 2025.

Δεδομένου του μεγέθους των έργων αξιοποίησης γεωθερμικής ενέργειας για ηλεκτροπαραγωγή, έννοιες όπως η προστασία του περιβάλλοντος, η διαχείριση των πιθανών κινδύνων κατά την ανάπτυξη και λειτουργία του έργου και κυρίως η εξασφάλιση αειφορίας του γεωθερμικού πεδίου αποτελούν θέματα μείζονος σημασίας.

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η εφαρμογή μεθοδολογιών διαχείρισης, παρακολούθησης και ελέγχου (monitoring) της εκμετάλλευσης και αξιοποίησης ρευστών από γεωθερμικά πεδία υψηλής θερμοκρασίας στον Ελληνικό χώρο. Καθώς η παρακολούθηση και ο έλεγχος αποτελούν απαραίτητο μέρος οποιουδήποτε επιτυχημένου προγράμματος διαχείρισης στόχος των ως άνω μεθοδολογιών είναι η μεγιστοποίηση της απόληψης γεωθερμικής ενέργειας, η ελαχιστοποίηση του λειτουργικού κόστους αξιοποίησης του γεωθερμικού ταμιευτήρα, η ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, ο έλεγχος και περιορισμός λειτουργικών δυσκολιών όπως οι εναποθέσεις και η διάβρωση, η εξασφάλιση αδιάλειπτης παραγωγής ενέργειας και η συνέπεια προς την ενεργειακή πιλοτική της χώρας.

Εξετάζονται τεχνικές όπως η παρακολούθηση της στάθμης των γεωτρήσεων, η ενθαλπία ή η θερμοκρασία του παραγόμενου ρευστού, η κατανομή πίεσης και θερμοκρασίας στον ταμιευτήρα, η χημική σύσταση των παραγόμενων ρευστών, η συγκέντρωση μη συμπυκνώσιμων αερίων, η εναπόθεση στερεών καθώς και η πιθανή χρήση ιχνηθετών (tracers). Η εφαρμογή των μεθοδολογιών ελέγχεται ειδικότερα μέσα από τις απαιτήσεις που τίθενται στο πρόσφατα συσταθέν Σχέδιο Κανονισμό Γεωθερμικών Εργασιών.

Λέξεις Κλειδιά: Γεωθερμικά πεδία, Υψηλή ενθαλπία, Παρακολούθηση πεδίου, Ελεγχος παραγωγής πεδίου

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η γεωθερμική ενέργεια αποτελεί την απλούστερη έκφανση του γεγονότος ότι ο πλανήτης Γη συμπεριφέρεται ως μια τεράστια δεξαμενή θερμότητας. Από την εποχή που ο Λόρδος Κέλβιν κατέληξε σε εσφαλμένους θερμικούς υπολογισμούς για την εκτίμηση της ηλικίας της Γης αγνοώντας τη γεωθερμική ενέργεια πέρασαν πολλά χρόνια μέχρι να γίνει αντιληπτή η σχέση της παρατηρούμενης στην επιφάνεια ενέργειας αφενός με την αρχέγονη θερμική κατάσταση του πλανητή κατά το σχηματισμό του και αφετέρου με τα ραδιενεργά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό του. Η σε ημερήσια βάση εκπεμπόμενη γεωθερμική ενέργεια έχει εκτιμηθεί ως 2.5 φορές μεγαλύτερη της παγκοσμίως καταναλισκόμενης καθιστώντας την πρακτικά ως την πλεονάζουσα συγκριτικά με κάθε άλλη συμβατική μορφή.

Αν και το ποσοστό της γεωθερμικής ενέργειας που μπορεί να αξιοποιηθεί ελεγχόμενα αποτέλει ένα πολύ μικρό μέρος της συνολικά εκπεμπόμενης, η συμμετοχή του στην παγκόσμια κατανάλωση μπορεί να έχει εξέχουσα θέση, ιδίως σε μια εποχή όπου το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των παραδοσιακών ορυκτών καυσίμων συνδέεται με το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Εως σήμερα ο αριθμός των χωρών που έχουν προβεί σε εκμετάλλευση των γεωθερμικών ενέργειας έχει υπερβεί τις 80, με τη συντριπτική πλειοψηφία να στοχεύει στην εκμετάλλευση γεωθερμικών πεδίων υψηλής ενθαλπίας αποσκοπώντας στην ηλεκτροπαραγωγή.

Η διαχείριση ενός γεωθερμικού πεδίου, ιδίως δε αυτών υψηλής ενθαλπίας απαιτεί την εφαρμογή εξειδικευμένων τεχνικών βελτιστοποίησης προκειμένου να εξασφαλιστεί αφενός η μεγιστοποίηση της παραγόμενης γεωθερμικής ενέργειας και αφετέρου η αειφορία του πόρου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι γεωθερμικοί ταμιευτήρες αποτελούν ιδιαίτερα σύνθετα συστήματα με πολυπλοκότητα που πηγάζει τόσο από τη γεωλογική και υδραυλική συνθετότητα του ίδιου του ταμιευτηρα όσο και από την ποικιλία επιλογών ως προς τη διαχείρισή του με την τελευταία να περιλαμβάνει την επιλογή του ρυθμού παραγωγής και επανεισπίεσης γεωθερμικών ρευστών, τη θέση νέων γεωτρήσεων, την επιλογή θέσεων λήψης επιπρόσθετων μετρήσεων και τις μεθόδους αντιμετώπισης των εμφανιζόμενων προβλημάτων [1].

Εσφαλμένες επιλογές λόγω απειρίας, αστοχιών, περιορισμένης αντίληψης για το πώς λειτουργεί ο ταμιευτήρας ή έλλειψης δεδομένων θα έχουν ιδιαίτερα αρνητικά αποτελέσματα με πλέον κρίσιμα την υπερβολική πτώση πίεσης στον ταμιευτήρα λόγω υπεράντλησης ή την αδυναμία θερμικής επαναφόρτισης των ρευστών του. Επιπρόσθετα θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν ότι πάντα εγκυμονεί ο κίνδυνος πρόκλησης βλαβών στο περιβάλλον, τόσο στο υπεδαφικό σύστημα όσο και στην επιφάνεια. Ατυχής διαχείριση ενός γεωθερμικού πεδίου, σε επιχειρησιακό επίπεδο, μπορεί να οδηγήσει σε «εκτροχιασμό» του ρυθμού παραγωγής ή του κόστους γεωθερμικής ενεργείας καταδικάζοντας σε αρνητική πορεία το εταιρικό σχήμα που υλοποιεί την παραγωγή γεωθερμικής ενεργείας από το πεδίο ενώ σε επιτελικό επίπεδο μπορεί να φτάσει στον εκτροχιασμό του ενεργειακού σχεδιασμού και πολιτικής ενός κράτους.

Επιπρόσθετη δυσκολία δημιουργείται από το γεγονός ότι κατά τη διαχείριση ενός γεωθερμικού πόρου είναι αδύνατο να υπάρξει άμεση και ακριβής απεικόνιση της υδραυλικής και θερμικής κατάστασης του ταμιευτήρα (κατανομή πίεσης, φάσεων και θερμοκρασίας σε κάθε σημείο και κάθε χρονική στιγμή) λόγω της αδυναμίας άμεσης πρόσβασης σε αυτόν, ακριβώς όπως συμβαίνει στις περιπτώσεις ταμιευτήρων υδρογονανθράκων. Αντίθετα, οι μηχανικοί που διαχειρίζονται το πεδίο καλούνται να συμπεράνουν τις κατανομές των μεγεθών ενδιαφέροντος κάνοντας χρήση των περιορισμένων μετρήσεων που διατίθενται αποκλειστικά στα σημεία που έχουν ορυχθεί γεωτρήσεις [2].

Από την παραπάνω συζήτηση καθίσταται σαφές ότι μείζονα απαίτηση για την ορθολογική διαχείριση ενός γεωθερμικού ταμιευτήρα αποτελεί η συγκέντρωση επιπρόσθετων πληροφοριών για την κατάστασή του. Εκτός από την πληροφορία που αρχικά συγκεντρώνεται κατά το στάδιο της έρευνας (γεωλογική, γεωφυσική και χημική) απαιτείται η διαρκής καταγραφή όλων των μεγεθών για τα οποία υπάρχει πρόσβαση στη μέτρησή τους, όπως η πίεση (είτε η στάθμη, ισοδύναμα), η θερμοκρασία και η χημική σύσταση του ρευστού στις διαθέσιμες γεωτρήσεις. Η διαδικασία διαρκούς συλλογής και επεξεργασίας των δεδομένων απαντάται με τον όρο «παρακολούθηση» (monitoring) [1].

Στο παρελθόν, η συγκέντρωση των παραπάνω πληροφοριών χρησιμοποιούνταν αποκλειστικά με ποιοτικό τρόπο από τους μηχανικούς του πεδίου προκειμένου να αντιληφθούν τον τρόπο με τον οποίο το πεδίο «αντιδρά» στην αλληλεπίδρασή του με την επιφάνεια, δηλαδή το ρυθμό παραγωγής. Πλέον, τόσο οι μαθηματικές μέθοδοι όσο και τα απαραίτητα λογισμικά για την εφαρμογή τους έχουν αναπτυχθεί τόσο ώστε να είναι δυνατή η ανάπτυξη λεπτομερών μαθηματικών μοντέλων της ροής στο πεδίο. Τα μοντέλα αυτά δημιουργούν κι επιλύουν τις διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν τη ροή στο πορώδες μέσο λαμβάνοντας υπόψιν όλες τις συνοριακές συνθήκες όπως γεωτρήσεις, επαφή με μαγματικούς

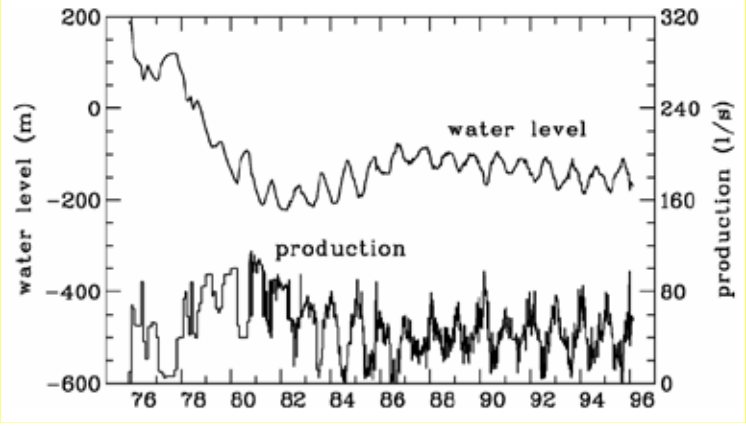
θαλάμους και επαναφόρτιση από φυσικές πηγές [3]. Στη συνέχεια τα μοντέλα χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση πολλών πιθανών σεναρίων εκμετάλλευσης, την εκτίμηση των αποτελεσμάτων τους στη διαχείριση του πεδίου και εν τέλει την επιλογή και υλοποίηση του βέλτιστου αυτών.

Το τρίτο «όπλο» που συμπληρώνει την παλέτα εργαλείων για τη βέλτιστη διαχείριση είναι η τεχνική της επανεισπίεσης [1]. Στη συντριπτική πλειονότητα των γεωθερμικών πεδίων υψηλής ενθαλπίας όπου η φυσική επαναφόρτιση του πεδίου δεν αρκεί για τη διατήρηση της πίεσής του κι επομένως την εξασφάλιση αειφόρου παραγωγής, απαιτείται η επανεισπίεση των παραγόμενων ρευστών αφού προηγούμενα η περιεχόμενη θερμική τους ενέργεια ληφθεί και κατευθυνθεί προς τις σχετιζόμενες εφαρμογές (ηλεκτροπαραγωγή, θέρμανση, ξήρανση κλπ). Κατά αυτό τον τρόπο το ισοζύγιο μάζας στον ταμιευτήρα διατηρείται και ταυτόχρονα εξασφαλίζεται η επαναθέρμανση του ανακυκλωμένου ρευστού επιτρέποντας τον επόμενο κύκλο παραγωγής-εισπίεσης. Η θέση των γεωτρήσεων και ο ρυθμός εισπίεσης αποτελεί μείζον θέμα ιδιαίτερης δυσκολίας καθώς έχει άμεση επίπτωση στη διαχείριση του πεδίου.

Στην παρούσα εργασία γίνεται εκτενής παρουσίαση των τεχνικών παρακολούθησης (monitoring) και μοντελοποίησης (modeling) γεωθερμικών πεδίων υψηλής ενθαλπίας που εφαρμόζονται σε παγκόσμια κλίμακα προκειμένου να επιτευχθεί η βελτιστοποιημένη διαχείριση των πεδίων, η μεγιστοποίηση της παραγόμενης γεωθερμικής ενέργειας και η εξασφάλιση της αειφορίας του ενεργειακού αυτού πόρου.

2. Η ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΕ ΕΠΙΠΕΔΟ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ

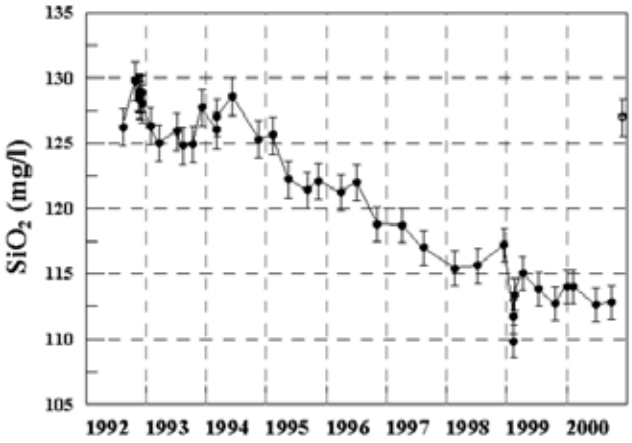
Η μεταφορά μάζας και ενέργειας αποτελούν τους κυρίαρχους μηχανισμούς που χαρακτηρίζουν τη ροή και την κατάσταση ενός γεωθερμικού πεδίου. Οι μεταβολές της πίεσης (ποσοτικοποιημένες ως «βαθμίδα πίεσης», pressure gradient) αποτελούν την κινητήριο δύναμη για τη ροή με αποτέλεσμα μεγάλες διαφορές πίεσης μεταξύ γειτονικών σημείων να προκαλούν έντονη ροή και αντιστρόφως. Κατά συνέπεια, αυξημένοι ρυθμοί παραγωγής, είτε με φυσική παραγωγή είτε με αντλητική υποβοήθηση, προκαλούν έντονη μείωση της πίεσης, αρχικά στις περιοχές πέριξ των γεωτρήσεων και σταδιακά σε όλο τον όγκο του ταμιευτήρα. Μακροπρόθεσμα, η μέση πίεση του ταμιευτήρα φθίνει εφόσον ο όγκος του πορώδους παραμένει (σχεδόν) σταθερός ενώ η περιεχόμενη μάζα μειώνεται, εκτός από την περίπτωση της επαρκούς φυσικής ή τεχνητής (μέσω εισπίεσης) επαναφόρτισης. Μια δεύτερη περίπτωση διατήρησης της πίεσης παρά τη συνεχιζόμενη παραγωγή παρατηρείται στις λίγες περιπτώσεις όπου ο ταμιευτήρας είναι διφασικός (περιέχεται υγρό νερό και κορεσμένος ατμός). Στην περίπτωση αυτή η απώλεια μάζας λόγω παραγωγής προκαλεί διαρκή εξάτμιση του υγρού σε ατμό διατηρώντας, ωστόσο, την πίεση σταθερή.



Εικόνα 1: Μεταβολή στάθμης γεώτρησης και ρυθμού παραγωγής για το πεδίο Laugaland (Ισλανδία)

Από ενεργειακή σκοπιά, η παραγωγή ρευστών οδηγεί προφανώς σε απομείωση της ενέργειας που εμπεριέχεται στο σύστημα με αποτέλεσμα τη μείωση της συνολικής του ενθαλπίας. Η αναπλήρωση ρευστών μέσω φυσικής ή τεχνητής επαναφόρτισης προκαλεί την είσοδο ψυχρών ρευστών τα οποία, με

τη σειρά τους, θερμαίνονται από την θερμική πηγή που επιδρά στον ταμιευτήρα. Δεδομένου ότι η μεταφορά θερμότητας αποτελεί χρονοβόρα διαδικασία τα εισερχόμενα ρευστά θα πρέπει να διανύσουν επαρκή διαδρομή από το σημείο εισπίεσης μέχρι το σημείο παραγωγής ώστε να αποκαταστήσουν την απαιτούμενη ενθαλπία. Σε αντίθετη περίπτωση, το σύστημα μεν υδραυλικά θα λειτουργεί, όμως τα παραγόμενα ρευστά στην επιφάνεια θα περιέχουν περιορισμένη θερμική ενέργεια αναγκάζοντας τις εφαρμογές (ηλεκτροπαραγωγή, θέρμανση, ξήρανση κλπ) να υπολειτουργούν ή ακόμη και να αποτυγχάνουν πλήρως.



Εικόνα 2: Εξέλιξη συγκέντρωσης SiO_2 στο πεδίο Thelamork (Ισλανδία)

Δεδομένου ότι πολλά γεωθερμικά συστήματα είναι κλειστά ή έστω δέχονται μικρή επαναφόρτιση η απαίτηση για παραγωγή σε ιδιαίτερα αυξημένους ρυθμούς προκαλεί πτώση της μέσης πίεσης σε σύντομο χρονικό διάστημα καθιστώντας μη βιώσιμη την περαιτέρω αξιοποίηση του πεδίου. Σε αυτές τις περιπτώσεις είναι απαραίτητη η μείωση της παραγωγής και η επαναφόρτιση του ταμιευτήρα. Καθίσταται επομένως σαφές ότι πρωτεύον πρόβλημα για την ορθή διαχείριση του πεδίου αποτελεί ο έλεγχος της πίεσης με τη θερμοκρασία να έχει δευτερεύοντα ρόλο.

3. ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΠΕΔΙΟΥ

Ιδανικά η παρακολούθηση της εξέλιξης ενός γεωθερμικού ταμιευτήρα κατά τη διάρκεια του χρόνου εκμετάλλευσής του έγκειται καταρχάς στη γνώση και επεξεργασία α) της μεταφοράς μάζας και ενέργειας τόσο μεταξύ διαφορετικών σημείων εντός του ταμιευτήρα όσο και μεταξύ ταμιευτήρα και επιφάνειας, β) της κατανομής της πίεσης σε χώρο και χρόνο και γ) του θερμικού περιεχομένου, όπως αυτό ουσιαστικά εκφράζεται μέσω της θερμοκρασίας. Λεπτομερέστερη πληροφορία όπως ο χημισμός των ρευστών και οι μεταβολές που αυτός υφίσταται κατά τη διάρκεια της παραγωγής είναι επιθυμητή. Η πλήρης γνώση των παραπάνω τιμών είναι δύσκολη έως αδύνατη λόγω αφενός μεν του γεγονότος ότι πρόκειται για μετρήσεις επί ρευστών σε υψηλή πίεση και θερμοκρασία και αφετέρου ότι μετρήσεις μπορούν να ληφθούν μόνο στα σημεία όπου έχουν ορυχθεί γεωτρήσεις.

Πιο συγκεκριμένα, οι μετρήσεις που δύνανται να ληφθούν ώστε να συνεισφέρουν στο πρόγραμμα παρακολούθησης του πεδίου είναι οι κάτωθι [4]:

- Παραγωγή ρευστών (υγρού και αερίου, αν υπάρχει) σε κάθε παραγωγική γεώτρηση
- Ενθαλπία (συνήθως υπό τη μορφή θερμοκρασίας) των παραγόμενων ρευστών
- Πίεση στην κεφαλή της παραγωγικής γεώτρησης (αν πρόκειται για γεωτρήσεις με αρτεσιανισμό) ή μέτρηση της στάθμης νερού (σε συμβατικές γεωτρήσεις)
- Χημισμός του παραγόμενου νερού και ατμού

- Ρυθμός, ποσότητα και θερμοκρασία εισπιεζόμενου νερού σε κάθε γεώτρησης εισπίεσης
- Πίεση στην κεφαλή της γεώτρησης εισπίεσης (injection wells)
- Πίεση και θερμοκρασία ταμιευτήρα σε γεώτρησης παρακολούθησης (observation wells)
- Κατάσταση γεωτρήσεων με χρήση διαγραφιών (logs) για την ανίχνευση τεχνικών προβλημάτων

Ιδιαίτερη σημασία έχει ο ρυθμός με τον οποίο λαμβάνονται οι μετρήσεις καθώς αφενός η παραγωγή ασφαλών συμπερασμάτων απαιτεί τακτική λήψη μετρήσεων και αφετέρου ο περιορισμός της δαπάνης λειτουργίας του πεδίου απαιτεί τον περιορισμό τους. Προφανώς δεν τίθεται θέμα για μετρήσεις οι οποίες μπορούν να λαμβάνονται αυτόματα με χρήση σχετικού εξοπλισμού καθώς σε αυτή την περίπτωση ο μόνος περιορισμός σχετίζεται με τη χωρητικότητα του συστήματος αποθήκευσης. Ωστόσο, μετρήσεις οι οποίες απαιτούν σύνθετες διαδικασίες (π.χ. χημική ανάλυση του γεωθερμικού ρευστού) εκ των πραγμάτων δεν μπορούν να λαμβάνονται ιδιαίτερα συχνά, ιδίως όταν πρόκειται για μικρά πεδία όπου το κόστος των δειγματοληψιών και των αναλύσεων είναι υπολογίσιμο.

Η συγκέντρωση μετρήσεων κατά τη διάρκεια της παρακολούθησης του πεδίου μπορεί να αναδείξει χαρακτηριστικά του πεδίου τα οποία δεν είναι ευδιάκριτα. Ένα απλό παράδειγμα καταγραφής και συσχέτισης των δεδομένων στάθμης γεώτρησης (δηλαδή πίεσης ταμιευτήρα) και παροχής παρουσιάζεται στην Εικ. 1 και αφορούν το πεδίο Laugaland στην Ισλανδία [1]. Μετά την πρώτη πτώση της πίεσης λόγω έναρξης παραγωγής και μετάβασης σε ροή σταθερή κατάσταση, παρατηρείται επιπρόσθετη έντονη πτώση η οποία αποδίδεται στην αύξηση της παραγωγής γεωθερμικού ρευστού. Σε δεύτερο χρόνο η παροχή μειώνεται σημαντικά με αποτέλεσμα τη διατήρηση της στάθμης σε σταθερά επίπεδα (με εξαίρεση την εποχικότητα) και ένδειξη ότι πλέον πραγματοποιείται πλήρης επαναφόρτιση του ταμιευτήρα. Ένα πιο σύνθετο παράδειγμα παρουσιάζεται στην Εικ. 2 όπου απεικονίζεται η συγκέντρωση σίλικας (διοξείδιο του πυριτίου, SiO_2) μετρημένη μετά από χημική ανάλυση σε δείγματα ρευστού σε τρι- έως τετρα-μηνιαία βάση [1]. Από την παρατήρηση των τιμών τεκμαίρεται άμεσα ότι η συγκέντρωση διαρκώς μειώνεται γεγονός που ερμηνεύεται ως εισχώρηση κρύου νερού από τον «εξωτερικό» χώρο προς τον ταμιευτήρα.

Μια δεύτερη κατηγορία ιδιοτήτων αφορά αυτές οι οποίες δεν μετρώνται/καταγράφονται άμεσα αλλά προκύπτουν έμμεσα ως συμπέρασμα ανάλυσης διαφορετικών πρωτόλειων στοιχείων, με έμφαση σε ιδιότητες οι οποίες, σε αντίθεση με τις κλασικές επιφανειακές μετρήσεις, αφορούν σε μεταβολές σε βάθος ταμιευτήρα. Το πιο σύνηθες παράδειγμα αυτής της κατηγορίας αφορά γεωφυσικά δεδομένα και την ερμηνεία τους. Πέρα από τη συνθετότητα και το κόστος αυτών των διαδικασιών, σημαντικό πρόβλημα δημιουργεί η ανάγκη εκτίμησης της «γραμμής βάσης» (baseline) της μετρούμενης έμμεσης ιδιότητας ΠΡΙΝ την έναρξη παραγωγής από το συγκεκριμένο πόρο έτσι ώστε να μπορούν να προσδιοριστούν οι μεταβολές από την αρχική κατάσταση. Ιδιότητες σε αυτή την κατηγορία είναι οι:

- Τοπογραφική αποτύπωση με στόχο τη διαπίστωση μεταβολών στο ανάγλυφο, τόσο υποχωρήσεων (subsidence) λόγω παραγωγής ή ακόμη και ανυψώσεων (uplift) λόγω επανεισπίεσης.
- Διαγραφίες μικροβαρύτητας
- Διαγραφίες ηλεκτρικής αντίστασης
- Καταγραφή μικροσεισμικότητας

Μια ιδιαίτερη κατηγορία μετρήσεων παρέχει η χρήση ιχνηθετών (tracers) η οποία έγκειται στην εισαγωγή κατάλληλης ποσότητας ιχνηθέτη μέσω γεώτρησης επανέγχυσης και ακολούθως την εισπίεση νερού προκειμένου να προκληθεί η μετακίνηση του ιχνηθέτη στο πορώδες μέσο [5]. Η συλλογή του στις παραγωγικές γεωτρήσεις και η ανάλυση των συλλεγμένων δεδομένων παρέχει πληροφορίες σχετικά με τις κύριες διαδρομές ροής των ρευστών στον ταμιευτήρα οι οποίες τελικά μπορούν να μεταφραστούν σε μεταβολή της θερμοκρασίας κατά μήκος του. Από τις τρεις διαθέσιμες κατηγορίες ιχνηθετών (χημικοί, ραδιενεργοί και περιβαλλοντικοί) η πρώτη χρησιμοποιείται στη συντριπτική πλειονότητα των τεστ λόγω του περιορισμένου κόστους της και παρά το γεγονός ότι απαιτείται σημαντικά μεγαλύτερη ποσότητα συγκριτικά με τις εναλλακτικές λύσεις.

4. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

Η μοντελοποίηση ενός γεωθερμικού πεδίου έγκειται στην ανάπτυξη δυναμικών ως προς το χρόνο και το χώρο μαθηματικών εκφράσεων, με τη μορφή διαφορικών εξισώσεων, η επίλυση των οποίων παρέχει

τις κρίσιμες τιμές ενδιαφέροντος (πίεση, θερμοκρασία, κορεσμός φάσεων, χημισμός) σε κάθε σημείο του ταμιευτήρα και για κάθε χρονική στιγμή. Οι προς επίλυση εξισώσεις εκφράζουν τις θεμελιώδεις αρχές της ροής ρευστών σε πορώδες μέσο, δηλαδή τη διατήρηση μάζας, ορμής (με τη μορφή του νόμου του Darcy) και ενέργειας [1].

Οι συνοριακές συνθήκες που υπεισέρχονται αφορούν τη στεγανότητα του πεδίου (ο ρυθμός ροής είναι μηδενικός στα όρια του ταμιευτήρα), τη διατήρηση της πίεσης σε σταθερά επίπεδα κατά την επαφή με υδροφορείς, την είσοδο νερού από εξωτερικές φυσικές πηγές όπως ποτάμια, λίμνες και ρήγματα, την τεχνητή εισπίεση νερού μέσω γεωτρήσεων, τη μεταφορά θερμότητας από τα υποκείμενα στρώματα και μαγματικούς θαλάμους και, φυσικά, την παραγωγή νερού και ατμού στην επιφάνεια. Οι αρχικές συνθήκες αφορούν την κατανομή των θεμελιωδών μεταβλητών (πίεση, θερμοκρασία, κορεσμός) σε κάθε σημείο του πεδίου κατά τη χρονική στιγμή έναρξης της προσομοίωσης.

Είναι σαφές ότι ο προσδιορισμός των παραμέτρων ενδιαφέροντος σε τέτοιο επίπεδο λεπτομέρειας απαιτεί την γνώση και είσοδο στο μοντέλο στοιχείων του ταμιευτήρα σε αντίστοιχη λεπτομέρεια όπως, για παράδειγμα, η υδραυλική και θερμική διαπερατότητα σε κάθε σημείο του. Δεδομένου ότι οι διαθέσιμες μετρήσεις είναι περιορισμένες και αφορούν ιδιότητες που έχουν εκτιμηθεί στα σημεία όπου έχουν ορυχθεί γεωτρήσεις, απαιτείται η χρήση μεθόδων χωρικής κατανομής βασισμένες σε στοχαστικά κριτήρια όπως οι μέθοδοι kriging και spatial modeling.

Μια ιδιαίτερη κατηγορία μοντέλων αποτελούν τα μοντέλα συγκεντρωμένων ιδιοτήτων (lumped models) τα οποία αντιμετωπίζουν τον ταμιευτήρα ως ένα ενιαίο και ομοιόμορφο σύστημα όπου η πίεση και θερμοκρασία έχουν μία μοναδική τιμή, τη μέση, σε κάθε σημείο του ταμιευτήρα. Προφανώς, η έλλειψη πληροφορίας σχετικά με τη χωρική κατανομή πίεσης και θερμοκρασίας στερεί τη δυνατότητα προσδιορισμού της βαθμίδας τους κι επομένως αυτή της λεπτομερούς προσομοίωσης της ροής. Ωστόσο, η δυνατότητα εκτίμησης της μέσης τιμής των κρίσιμων μεγεθών που χαρακτηρίζουν τον ταμιευτήρα μπορεί να αποδειχθεί ιδιαίτερα ωφέλιμη για τη μελέτη των ρευστών και ειδικότερα την αντίληψη της δυναμικής συμπεριφοράς του ταμιευτήρα σε μακροσκοπικό επίπεδο [2].

Η ανάπτυξη ενός ρεαλιστικού, αντιπροσωπευτικού μαθηματικού μοντέλου σε συνδυασμό με τη συγκέντρωση, ανάλυση και μελέτη των μετρήσεων κατά την παρακολούθηση του ταμιευτήρα καθιστά εφικτό τον προσδιορισμό της κρίσιμης ποσότητα E_0 που αντιστοιχεί στην μέγιστη ισχύ που δύναται να παραχθεί από το γεωθερμικό πεδίο προκειμένου να εξασφαλιστεί η αειφορία του. Στην προκειμένη περίπτωση ο όρος αειφορία εννοείται ως η δυνατότητα λήψης ισχύος κατά μέγιστο ίσης προς E_0 για ένα πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα, της τάξης των 100+ ετών. Σημειώνεται ότι η ποσότητα E_0 δεν εξαρτάται από την ενεργειακή ζήτηση, τα οικονομικά ή τα περιβαλλοντικά δεδομένα αλλά σχετίζεται αποκλειστικά με το δυναμικό του πόρου και τον τρόπο εκμετάλλευσής του, δηλαδή την τοποθέτηση και την παροχή των γεωτρήσεων παραγωγής και εισπίεσης [6].

5. ΤΟ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΝΟΜΟΘΕΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

Πρόσφατα ολοκληρώθηκαν οι εργασίες της Επιτροπής που εργάστηκε για τη σύσταση του νέου Κανονισμού Γεωθερμικών Εργασιών (ΚΓΕ) [7] όπου προδιαγράφονται όλες οι εργασίες σχετικά με την έρευνα και εκμετάλλευση γεωθερμικών πεδίων υψηλής (εθνικού ενδιαφέροντος με θερμοκρασία ρευστών άνω των 90 ºC) και χαμηλής ενθαλπίας (τοπικού ενδιαφέροντος με θερμοκρασία ρευστών άνω των 30 ºC και μέχρι τους 90 ºC).

Ειδικότερα για τα πεδία εθνικού ενδιαφέροντος ο ΚΓΕ προβλέπει στα άρθρα του τον τρόπο παρακολούθησης ενός πεδίου. Συγκεκριμένα, στο άρθρο 7 προδιαγράφονται οι «εργασίες εκμετάλλευσης» και γίνεται μνεία στην όρυξη γεωτρήσεων επανεισπίεσης με στόχο την εξασφάλιση της αειφορίας του γεωθερμικού πόρου. Οι όροι «δοκιμαστικές αντλήσεις» και ο ισοδύναμός του «δοκιμές παραγωγής» αναφέρονται στις διαδικασίες ελεγχόμενης παραγωγής για περιορισμένο χρονικό διάστημα προκειμένου να εξεταστεί το παραγωγικό δυναμικό της γεώτρησης και, σε συνδυασμό με τις μετρήσεις πίεσης, της εκτίμησης των χαρακτηριστικών ροής του ταμιευτήρα (διαπερατότητα, πορώδες). Οι εκτιμώμενες ιδιότητες εμπλέκονται άμεσα στο σχεδιασμό του μαθηματικό μοντέλου του ταμιευτήρα και εν τέλει στην εξασφάλιση της ορθής λειτουργίας και αειφορίας του.

Ως ελάχιστη απαίτηση τίθεται η τακτική μέτρηση και καταγραφή της μάζας, θερμοκρασίας και της πίεσης στο στόμιο κάθε γεώτρησης παραγωγής και επανέγχυσης. Ειδικότερα για τις γεωτρήσεις από πεδία εθνικού ενδιαφέροντος όπου αναμένεται η παραγωγή ατμού πέραν του υγρού επιβάλλεται η χρήση μετρητών διφασικής ροής (χωρίς φυσικό διαχωρισμό των φάσεων) ή του διαχωρισμού του ατμού από το υγρό και η ξεχωριστή μέτρηση της κάθε παροχής. Ιδιαίτερη μνεία γίνεται στην ανάγκη βαθμονόμησης των μετρητικών οργάνων και την απαίτηση σε ακρίβεια προκειμένου να εξασφαλιστεί η αξιοπιστία των

μετρούμενων πληροφοριών και κατά συνέπεια η ορθότητα της παρακολούθησης του πεδίου. Σημειώνεται ότι οι συγκεκριμένες προδιαγραφές αφορούν επίσης την ανάγκη ορθής εκτίμησης της παραγόμενης ενέργειας προκειμένου να προσδιοριστεί με ακρίβεια το οφειλόμενο τίμημα.

Στο άρθρο 8 τίθεται η ανάγκη σύνταξης και κατάθεσης Τεχνικής Μελέτης Εκμετάλλευσης όπου θα πρέπει να προδιαγράφονται επιμέρους στοιχεία του σχεδιαζόμενου τρόπου εκμετάλλευσης του πόρου. Μεταξύ άλλων ζητείται

- αναλυτική περιγραφή των υφιστάμενων γεωτρήσεων ως προς τα υδρολογικά δεδομένα και φυσικοχημικά δεδομένα των περιεχόμενων ρευστών
- αποτελέσματα των δοκιμών παραγωγής
- το αναλυτικό διάγραμμα ροής των ρευστών τόσο σε επίπεδο επιφάνειας (δίκτυο, εναλλάκτες, καταναλώσεις κλπ) όσο και σε επίπεδο υπόγειου ταμιευτήρα
- προβλεπόμενη ημερήσια και ετήσια παραγωγή του γεωθερμικού δυναμικού

δηλαδή των στοιχείων που σχετίζονται και τα οποία τεκμηριώνουν την ορθή εκμετάλλευση του γεωθερμικού πόρου.

Στο άρθρο 9 γίνεται σαφής αναφορά στην ανάγκη παρακολούθησης της αντίδρασης του ταμιευτήρα στη διαδικασία εκμετάλλευσης καθώς ζητείται από το Μισθωτή του πεδίου (ανεξάρτητα από το αν είναι ταυτόχρονα ο Διαχειριστής του) να παρακολουθεί και να καταγράφει την υδραυλική συμπεριφορά του γεωθερμικού ταμιευτήρα και των γεωτρήσεων παραγωγής και επανέγχυσης. Ακόμα σαφέστερα τονίζεται η ανάγκη ορθολογικής διαχείρισης βασισμένης στο σταθερό ισοζύγιο παραγωγής και αναπλήρωσης του γεωθερμικού ρευστού. Το ισοζύγιο αυτό οφείλει να προκύπτει από τη μελέτη του ταμιευτήρα κατά το στάδιο των παραγωγικών δοκιμών και αντλήσεων (διαμόρφωση εννοιολογικού μοντέλου (conceptual model) και αριθμητικού τρισδιάστατου μοντέλου (numerical model)). Στην ίδια κατεύθυνση επιβάλλεται ο ρυθμός άντλησης γεωθερμικού δυναμικού να μην υπερβαίνει τον εκτιμώμενο ρυθμό τροφοδοσίας του γεωθερμικού ταμιευτήρα και να γίνεται διαδοχική χρήση της θερμικής ενέργειας από εγκαταστάσεις υψηλής σε χαμηλής θερμοκρασιακής απαίτησης.

Τέλος, στο άρθρο 17, μεταξύ άλλων υποχρεώσεων του ασκούντος την έρευνα, την εκμετάλλευση ή τη διαχείριση επιβάλλεται όλες οι εργασίες για την έρευνα, την εκμετάλλευση ή τη διαχείριση γεωθερμικού πεδίου ή δυναμικού, να διεξάγονται σύμφωνα με τους κανόνες της Επιστήμης και της Τεχνικής, με στόχο την ορθολογική αξιοποίηση του πεδίου.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα γεωθερμικά πεδία υψηλής ενθαλπίας (εθνικού ενδιαφέροντος) αποτελούν ιδιαίτερα σύνθετα συστήματα με πλειάδα άγνωστων παραμέτρων που σχετίζονται με τη δομή του ταμιευτήρα και με την υδραυλική και θερμική του επικοινωνία με το εξωτερικό περιβάλλον. Το υψηλό κόστος όρυξης γεωτρήσεων παρακολούθησης καθιστά τη λήψη πληροφοριών περιορισμένη και την ανάγκη «μετάφρασής» τους επιτακτική. Ωστόσο, η λήψη, ανάλυση και εφαρμογή των μετρήσεων κατά τη φάση παρακολούθησης της παραγωγικής διαδικασίας είναι απαραίτητη προκειμένου να εξασφαλιστεί η ορθή εκμετάλλευση και η αειφορία του γεωθερμικού πόρου και προκειμένου να επιβεβαιωθεί ο χαρακτηρισμός του ως «ανανεώσιμης» πηγής ενέργειας.

Σήμερα η Ελλάδα ξεκινά εκ νέου την προσπάθεια αξιοποίησης των γεωθερμικών πεδίων εθνικού ενδιαφέροντος με το πεδίο του Μήλου να αποτελεί τον πρώτο στόχο. Είναι απόλυτα απαραίτητη η συστηματική παρακολούθηση του πεδίου προκειμένου να γίνει κατανοητή η δυναμική του, τα φαινόμενα μεταφοράς που λαμβάνουν χώρα και τελικά να εξασφαλιστεί η βέλτιστη και αειφόρος αξιοποίηση του πεδίου για ηλεκτροπαραγωγή.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Axelsson, G., 2003, “Essence of geothermal resource management”, IGC2003, Geothermal training programme, September 2003.

[2] Yu C., Shufang W., Zhezhou C., Zheng H., Pei L., Haikui L., Ming Y., Jumei P, 2015, “Effective and sustainable utilization of geothermal resources” in Procs. World Geothermal Congress, Melbourne, Australia.

[3] Axelsson G., Stefansson V., Bjornsson G., Liu J., 2005, “Sustainable management of geothermal resources and utilization for 100-300 years” in Procs. World Geothermal Congress, 2005, Antalya, Turkey.

[4] Malate R., 2003, “Management of geothermal resources: PNOC-EDC experience”, IGC2003, Geothermal training programme, September 2003.

[5] Rodriguez V., Monterossa M., 2011, “Field monitoring and management: the Berlin geothermal field case”, Short course on geothermal drilling, resource development and power plants, Santa Tecla, San Salvador, January 2011.

[6] Rodriguez V., Monterossa M., 2010, “Sustainability analysis of the Ahuachapan geothermal field: management and modeling”, Geothermics, 39, pp 370-381.

[7] Κανονισμός Γεωθερμικών Εργασιών, Υ.Α. προς διαβούλευση, https://ypen.gov.gr/diavoulefsi-epi-tis-y-a-gia-tin-egkrisi-tou-neos-kanonismou-geothermikon-ergasion/, 2021.

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΡΙΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΑΝΤΛΙΩΝ ΜΕ ΗΛΙΑΚΗ ΥΠΟΒΟΗΘΗΣΗ

Γ. Ασπετάκης και Ν. Ανδρίτσος

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος
e-mail: gaspetakis@uth.gr, nandrits@uth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο κτιριακός τομέας αποτελεί έναν από τους μεγαλύτερους καταναλωτές ενέργειας στην Ευρώπη και διαθέτει μεγάλες δυνατότητες εξοικονόμησης ενέργειας. Έρευνες έχουν δείξει ότι η εξοικονόμηση ενέργειας και η ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στα συστήματα θέρμανσης και ψύξης των κτιρίων αποτελούν μία από τις πλέον αποδοτικές μεθόδους για τη μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου. Στην Ελλάδα η ηλιακή ενέργεια αποτελεί την ιδανική λύση για αυτό, λόγω του υψηλού ηλιακού δυναμικού της χώρας. Ο συνδυασμός της ηλιακής ενέργειας με άλλες Α.Π.Ε, όπως η γεωθερμία, με τις διάφορες εφαρμογές της, ενισχύει ακόμα περισσότερο την εξοικονόμηση ενέργειας. Σε αυτήν την εργασία διερευνώνται τρία διαφορετικά συστήματα γεωθερμικών αντλιών θερμότητας (ΓΑΘ) με ηλιακή υποβοήθηση αποτελούμενα από ηλιακούς θερμικούς συλλέκτες, φωτοβολταϊκά και υβριδικούς συλλέκτες ως αναβαθμίσεις του εξοπλισμού θέρμανσης/ψύξης κτιριακών εγκαταστάσεων του Πανεπιστημίου στο Βόλο. Τα συστήματα προσομοιώθηκαν στο περιβάλλον δυναμικής προσομοίωσης TRNSYS και έπειτα αναλύθηκαν ως προς την ενεργειακή και την οικονομική τους απόδοση, με στόχο να εκτιμηθεί η πιο προσιτή και φιλική προς το περιβάλλον εναλλακτική λύση. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το σύστημα ΓΑΘ με φωτοβολταϊκά αποτελεί τη βέλτιστη λύση, διότι εξοικονομεί σημαντικά ποσά ενέργειας και παρουσιάζει μικρότερο συνολικό κόστος συγκριτικά με το σύστημα των υβριδικών συλλεκτών.

Λέξεις Κλειδιά: κτιριακός τομές, εξοικονόμηση ενέργειας, προσομοίωση συστημάτων, μείωση εκπομπών θερμοκηπίου

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σύμφωνα με δεδομένα της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, ο κτιριακός τομέας ευθύνεται για το 40% της τελικής κατανάλωσης ενέργειας και 36% των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Βελτιώνοντας την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων θα οδηγήσει σε μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και των αντίστοιχων εκπομπών κατά 5% [1]. Η εξοικονόμηση ενέργειας αποτελεί την πιο οικονομικά αποδοτική μέθοδο για τη μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου [2]. Η οδηγία 2010/31/ΕΕ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων απαιτεί ότι από το τέλος του 2020 όλα τα νέα κτίρια θα πρέπει να είναι σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης, προωθώντας την αξιοποίηση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας για την κάλυψη του μεγαλύτερου μέρους των ενεργειακών αναγκών αυτών των κτιρίων. Αυτή τη στιγμή η θέρμανση χώρων και το ζεστό νερό χρήσης (ΖΝΧ) ευθύνονται για το 66% της κατανάλωσης ενέργειας στα κτίρια, ενώ οι ανάγκες για κλιματισμό αυξάνονται κάθε χρόνο [3]. Η ενσωμάτωση ΑΠΕ στη θέρμανση και ψύξη των κτιρίων αποτελεί την ιδανική λύση για τον περιορισμό της κατανάλωσης των ορυκτών καυσίμων. Μέχρι το τέλος του 2018 το ποσοστό κάλυψης από ΑΠΕ της θέρμανσης/ψύξης κτιρίων ήταν 19,7% [4]. Η ηλιακή ενέργεια και η αβαθής γεωθερμία αποτελούν εύκολα προσβάσιμες ΑΠΕ που μπορούν να συνεισφέρουν στη θέρμανση/ψύξη των κτιρίων μέσω σχετικά απλών συσκευών, όπως η αντλία θερμότητας. Οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας (ΓΑΘ) έχουν υψηλό συντελεστή απόδοσης (COP) και χαμηλό κόστος λειτουργίας. Το επόμενο βήμα είναι ο συνδυασμός ηλιακής ενέργειας και γεωθερμίας μέσω μιας ΑΘ, δημιουργώντας έτσι βιώσιμα και οικονομικά συστήματα. Αυτός ο συνδυασμός ονομάζεται γεωθερμικές αντλίες θερμότητας με ηλιακή υποβοήθηση (Solar Assisted Ground Source Heat Pumps, SAGSHPs) οι οποίες τη μειώνουν τη κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας και τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου που προκύπτει από τη μειωμένη χρήση ορυκτών καυσίμων. Η ηλιακή ενέργεια είτε συνεισφέρει στη ροή θερμότητας από την πηγή (υπόγεια νερά, υπέδαφος κλπ.) ή παράγει ενέργεια την οποία απευθείας καταναλώνει η ΓΑΘ. Τα τελευταία 20 χρόνια η συνέργεια ΓΑΘ και ηλιακής ενέργειας έχει μελετηθεί αρκετά (ενδεικτικά [5-7]). Η Ελλάδα έχει από τα υψηλότερα ηλιακά δυναμικά στην ΕΕ, με μέση δυνατή ηλιακή παραγωγή 1600 kWh/m^2 ανά χρόνο [8]. Στο τέλος του 2019, τα φωτοβολταϊκά κάλυψαν περίπου το 7% της κατανάλωσης ηλεκτρισμού της χώρας, φέρνοντας την Ελλάδα στην τέταρτη θέση διεθνώς σε ότι αφορά στη συμβολή των φωτοβολταϊκών στη συνολική ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας [9].

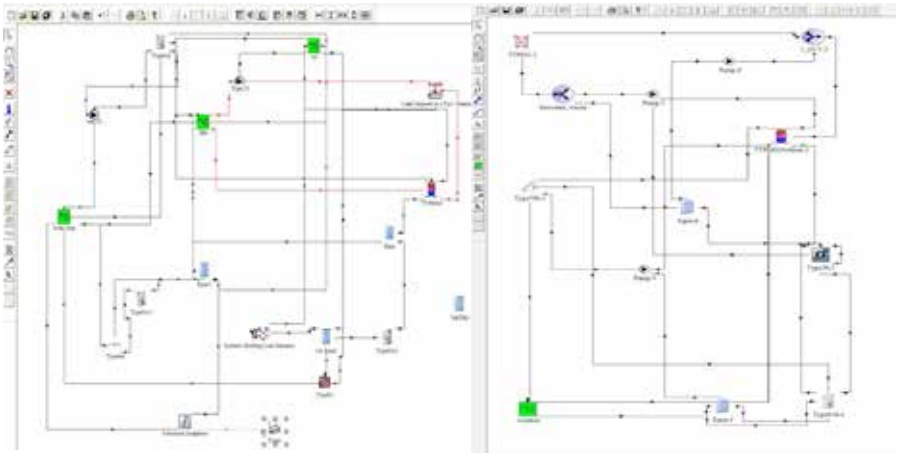
2. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Για να εξεταστεί το δυναμικό των SAGSHPs εξετάζονται τρία συστήματα θέρμανσης/ψύξης SAGSHP ως αναβαθμίσεις του υπάρχοντος εξοπλισμού σε δύο κτίρια του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Τα κτίρια βρίσκονται στο Βόλο και πρόκειται να στεγάσουν το τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών της Πολυτεχνικής Σχολής. Τα δυο τετραώροφα κτίρια έχουν συνολική επιφάνεια 2644 m^2. Το μεγαλύτερο εκ των δυο περιλαμβάνει το αμφιθέατρο, αίθουσες διδασκαλίας και τα εργαστήρια. Στο άλλο βρίσκονται τα γραφεία, η Γραμματεία του Τμήματος και αίθουσες συνεδριάσεων. Σύμφωνα με τον Κ.Εν.Α.Κ. βρίσκονται στη κλιματική ζώνη Β [10]. Έχουν ήδη εγκατασταθεί δύο αντλίες θερμότητας νερού-νερού, μία σε κάθε κτίριο, οι οποίες θα αντλούν υπόγειο υφάλμυρο νερό μέσης θερμοκρασίας 17,1 °C όλο τον χρόνο. Από ενημέρωση της Τεχνικής Υπηρεσίας του Π.Θ. οι δύο αντλίες είναι τα μοντέλα CWW/K/WP 302P και CWW/K/WP 393P της CLINT με ονομαστική ισχύ θέρμανσης/ψύξης 121/97,2 kW και 159/130 kW αντίστοιχα. Τα τρία συστήματα που προσομοιώθηκαν είναι τα ακόλουθα: (1) Σύστημα με θερμικούς συλλέκτες που θερμαίνουν ελαφρώς το νερό θερμοκρασίας 17,1 °C πριν από την είσοδό του στην ΑΘ, (2) Σύστημα με φωτοβολταϊκους συλλέκτες όπου το παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα είτε χρησιμοποιείται για τις ΑΘ ή τροφοδοτείται το δίκτυο με πράσινη ενέργεια μέσω «net metering» και (3) Σύστημα με υβριδικούς συλλέκτες στο οποίο συνδυάζονται οι λειτουργείες των δυο προηγούμενων. Όλοι οι συλλέκτες μπορούν να εγκατασταθούν στην οροφή του νότιου κτιρίου επιφάνειας 400 m^2. Ο προσανατολισμός του κτιρίου είναι 20° από τον άξονα Βορρά-Νότου, προσφέροντας εξαιρετική δυνατότητα εγκατάστασης των συλλεκτών σε νότιο προσανατολισμό (αζιμούθιο 0°). Δεν σκιάζονται καθόλου οι συλλέκτες, αφού το κτίριο αποτελεί το ψηλότερο κτίσμα στη περιοχή και δεν καλύπτεται ο ορίζοντας από ορεινές μάζες από τη νότια μεριά. Για όλες τις προσομοιώσεις υλοποιήθηκε χρονικό βήμα 3 λεπτών για μια περίοδο 8760 ωρών, από 1 Ιανουαρίου 00:00 έως 31 Δεκεμβρίου 24:00, ένα έτος δηλαδή. Τα στοιχεία ακτινοβολίας και οι καιρικές συνθήκες για το υπό εξέταση σημείο έχουν ληφθεί από τη βάση δεδομένων PVGIS, που αναπτύχθηκε από το Κοινό Κέντρο Ερευνών (JRC) της Ευρωπαϊκής Επιτροπής [11]. Το PVGIS προσφέρει εκτός από δεδομένα για τη κατασκευή ηλιακών πάρκων και αρχεία «typical meteorological year» (TMY), στα

οποία περιέχονται ωριαίες τιμές ακτινοβολίας, θερμοκρασίας, υγρασίας, ταχύτητας ανέμου και άλλα. Τα δεδομένα των ΑΘ, όπως τα ποσά θερμότητας που μεταφέρονται ανάλογα με τη θερμοκρασία, η κατανάλωση και οι παροχές νερού πάρθηκαν από το τεχνικό φυλλάδιο της CLINT. Διαμέσου του αυτόματου ελέγχου η διαφορά ανάμεσα στην προσαγωγή και την επιστροφή της αντλίας θερμότητας παραμένει σταθερά στους 5°C. Ο K.Ev.A.K αναφέρει ότι τα πανεπιστήμια στην Ελλάδα λειτουργούν για 10 μήνες (κλειστά Ιούλιο και Αύγουστο), 5 μέρες την εβδομάδα, 13 ώρες τη μέρα (8:00 με 21:00). Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται συνοπτικά τα κύρια στοιχεία (Types) του TRNSYS που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις.

Πίνακας 1: Στοιχεία του TRNSYS

Water-to-Water Heat Pump, Type 668	Variable Speed Pump, Type 110
Synthetic Building Load Generator, Type 686	Heat Exchanger with Constant Effectiveness, Type 91
Holiday Calculator, Type 95	Solar Collector component, Type 1
Heating and Cooling Loads Imposed on a Flow Stream, Type 682	Photovoltaic Array, Type 94
Storage Tank, Uniform Losses, Type 60	PV/T Collector, Type 50
ON/OFF Differential Controller, Type 2	Weather Data Processor, Type 15



Εικόνα 1: Στιγμιότυπα από το Deck view των συστημάτων στο TRNSYS.

Η ροή του νερού ξεκινάει όποτε υπάρχουν θερμικά/ψυκτικά φορτία μέσω μιας αντλίας, περνάει από το στοιχείο 682 που εφαρμόζει αυτά τα φορτία στη ροή, ψύχοντας ή θερμαίνοντάς το. Έπειτα εισέρχεται από το στοιχείο 60, δηλαδή τη δεξαμενή που προσομοιώνει το νερό στο δίκτυο θέρμανσης/ψύξης, για να μεταβάλλει τη θερμοκρασία του ανάλογα με το φορτίο. Το νερό στο δίκτυο έχει θεωρηθεί ότι είναι 2 m^3. Στο τέλος περνάει από την ΑΘ, στοιχείο 668, για να θερμανθεί/ψυχθεί ανάλογα με την πτώση/αύξηση της θερμοκρασίας στο προηγούμενο στάδιο. Ο βρόχος κλείνει σε αυτό το σημείο. Ο αυτόματος έλεγχος πραγματοποιείται με τον διαφορικό ελεγκτή, στοιχείο 2, που κατά την περίοδο θέρμανσης διατηρεί τη θερμοκρασία του νερού στο δίκτυο στους 45°C +/- 1 και κατά τη περίοδο ψύξης στους 7°C +/- 1.

2.1. Σύστημα με θερμικούς συλλέκτες (FPC)

Σε αυτό το σύστημα οι θερμικοί συλλέκτες θερμαίνουν νερό το οποίο οδηγείται μια δεξαμενή. Όταν η θερμοκρασία του φτάσει στους 25°C ενεργοποιείται μια αντλία έτσι ώστε αυτό το νερό μέσω εναλλάκτη θερμότητας να θερμαίνει το υπόγειο νερό θερμοκρασίας 17,1 °C πριν αυτό οδηγηθεί στην ΓΑΘ. Η διεργασία αυτή έχει προφανώς αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας του νερού, η οποία με τη σειρά της οδηγεί σε υψηλότερο COP, άρα και σε μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας. Ο

θερμικός συλλέκτης που προσομοιώθηκε είναι ο ελληνικής κατασκευής ΦΑΕΘΩΝ της SOL Ε.Π.Ε. (Κωδ. 1186). Δεδομένα για την απόδοση του συλλέκτη έχουν ληφθεί από την έκθεση δοκιμών του εργαστηρίου δοκιμών ηλιακών συστημάτων του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος». Διαφορετικές κλίσεις του συλλέκτη δοκιμάστηκαν και βρέθηκε ότι η βέλτιστη είναι 45°, με αζιμούθιο ίσο προφανώς με το μηδέν. Παρομοίως, δοκιμάστηκαν και διάφοροι όγκοι της δεξαμενής νερού και δεν βρέθηκε σημαντική διαφορά πάνω από το 1 m^3. Η αντλία νερού του συλλέκτη ενεργοποιείται μόνο αν η ακτινοβολία που προσπίπτει πάνω του είναι άνω του 80 W/m^2. Η λειτουργεία του συστήματος περιορίζεται μόνο την περίοδο θέρμανσης. Τις υπόλοιπες μέρες του χρόνου χρησιμοποιείται για ΖΝΧ.

2.2. Σύστημα με φωτοβολταϊκούς συλλέκτες (PV)

Αυτό το σύστημα θεωρεί την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών στην ταράτσα του κτιρίου, τα οποία και τροφοδοτούν με ηλεκτρική ενέργεια τις ΓΑΘ. Με την μερική ή την πλήρη κάλυψη των ηλεκτρικών απαιτήσεων των ΓΑΘ υπάρχει σημαντική μείωση του κόστους λειτουργίας των ΓΑΘ. Λόγω της χρονικής αναντιστοιχίας της παραγωγής και της ζήτησης του ηλεκτρισμού θα γίνεται ο ενεργειακός συμψηφισμός (net metering). Δεν επιλέχθηκε η χρήση μπαταριών λόγω του πρόσθετου κόστους και της πτώσης της απόδοσης τους με τον χρόνο. Η ενέργεια που παράγεται είτε τροφοδοτείται απευθείας στις ΓΑΘ ή στο δίκτυο, ανάλογα με τις ανάγκες θέρμανσης/ψύξης. Όταν δεν παράγεται ενέργεια, παρέχει το δίκτυο ότι απαιτείται. Στο τέλος του μήνα ή έτους γίνεται συμψηφισμός της ενέργειας που παράχθηκε και καταναλώθηκε. Για ΝΠΔΔ με κοινωφελείς ή άλλου δημοσίου συμφέροντος σκοπούς, η ισχύς κάθε φωτοβολταϊκού συστήματος μπορεί να φτάσει έως και στο 100% της κατανάλωσης (αλλιώς επιτρέπεται μόνο στο 50%) [12].

Στην παρούσα εργασία εξετάστηκαν τα πάνελ DualSun Flash 310M. Αυτό έγινε γιατί η DualSun προσφέρει το ίδιο πάνελ σε φωτοβολταϊκό και σε υβριδικό συλλέκτη με την ίδια φωτοβολταϊκή απόδοση. Με αυτό τον τρόπο αναλύεται καλύτερα η αξιοποίηση της θερμικής ενέργειας από το PV/T. Οι παράμετροι του πάνελ στη προσομοίωση βρέθηκαν στο τεχνικό φυλλάδιο του.

2.3. Σύστημα με υβριδικούς φωτοβολταϊκούς/θερμικούς συλλέκτες (PV/T)

Σε αυτό το σύστημα τα υβριδικά πάνελ παράγουν τόσο ηλεκτρική όσο και θερμική ενέργεια. Η λειτουργία τους αποτελεί συνδυασμό των προηγούμενων συστημάτων, με την (μερική ή πλήρη) τροφοδοσία ηλεκτρικής ενέργειας στις ΓΑΘ, αλλά και με τη μικρή θέρμανση του νερού προσαγωγής στις ΓΑΘ, αλλά αυτή τη φορά με μια συσκευή.

Υλοποιείται ξανά το «net metering» και η δεξαμενή αποθήκευσης νερού έχει όγκο 1 m^3. Η συνδεσμολογία είναι η ίδια με αυτή των προηγούμενων συστημάτων. Το τεχνικό φυλλάδιο των πάνελ περιέχουν τα ηλεκτρικά και τα θερμικά χαρακτηριστικά. Το σύστημα υλοποιεί δυο λειτουργίες ανάλογα με την περίοδο. Στην περίοδο θέρμανσης, εάν η θερμοκρασία του νερού στη δεξαμενή φτάσει τους 25 °C, ενεργοποιείται η αντλία που τροφοδοτεί με ζεστό νερό τον εναλλάκτη. Στην περίοδο ψύξης, δεν υπάρχει ανάγκη θέρμανσης της ροής της πηγής. Έτσι, όταν το νερό στη δεξαμενή φτάσει τους 45 °C, εκκενώνεται το περιεχόμενο για να χρησιμοποιηθεί ως ΖΝΧ, και αντικαθίσταται με νερό θερμοκρασίας 23 °C (μέση θερμοκρασία νερού δικτύου για Βόλο το καλοκαίρι κατά το Κ.Ενε.Α.Κ). Με αυτό τον τρόπο ψύχονται τα πάνελ προσφέροντας μια αύξηση παραγόμενης ισχύος από 5% μέχρι 15%. Το μοντέλο που προσομοιώθηκε είναι το DualSun Spring 310M.

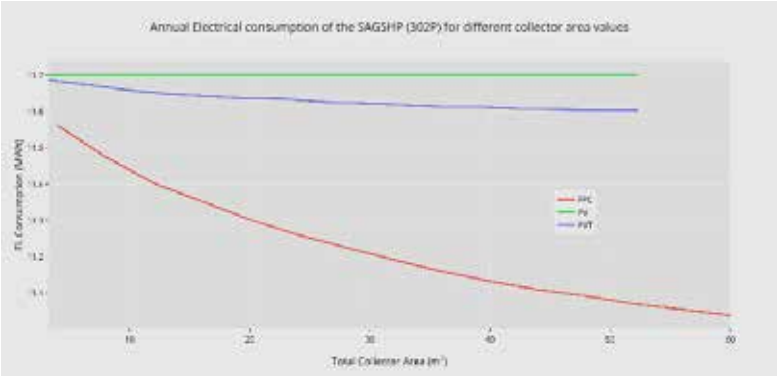
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1. Ενεργειακή Ανάλυση

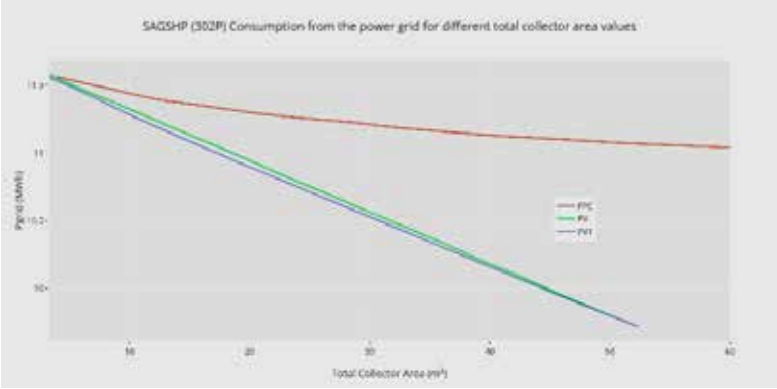
Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται η συνολική κατανάλωση ενέργειας σε συνάρτηση με την ολική επιφάνεια των ηλιακών πεδίων για τα τρία συστήματα. Το σύστημα θερμικών συλλεκτών έχει τη μικρότερη συνολική κατανάλωση ενέργειας, με διαφορά έως και 800 kWh. Με αυτά τα δεδομένα θα μπορούσε να συμπεράνει κανείς ότι αυτό το σύστημα αποτελεί το πιο ενεργειακά αποδοτικό, αν και στη συνέχεια αποδεικνύεται το αντίθετο.

Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται η κατανάλωση ενέργειας από το δίκτυο για διαφορετικά μεγέθη τω συλλεκτών. Γίνεται αμέσως σαφές ότι το σύστημα των θερμικών συλλεκτών καταναλώνει σημαντικά περισσότερη ενέργεια από το δίκτυο σε σχέση με τα άλλα δυο, παρά τη χαμηλή συνολική του κατανάλωση. Τα συστήματα των φωτοβολταϊκών και των υβριδικών συλλεκτών έχουν παραπλήσιες επιδόσεις, με το τελευταίο να διατηρεί μια ελάχιστα μικρότερη κατανάλωση λόγω της πολύ μικρής αύξησης του COP. Αυτά τα δύο συστήματα έχουν τη δυνατότητα να εξοικονομήσουν έως και 1,5 MWh

ενέργειας από το δίκτυο σε σχέση με το σύστημα θερμικών συλλεκτών και 2 MWh σε σχέση με το συμβατικό.

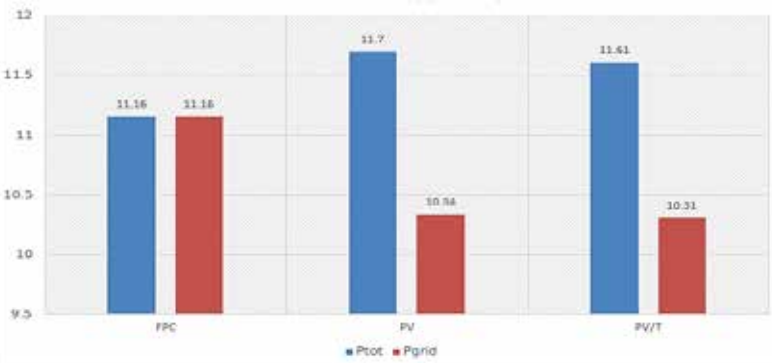


Σχήμα 1: Συνολική κατανάλωση ενέργειας ως συνάρτηση της επιφάνειας των ηλιακών πεδίων.

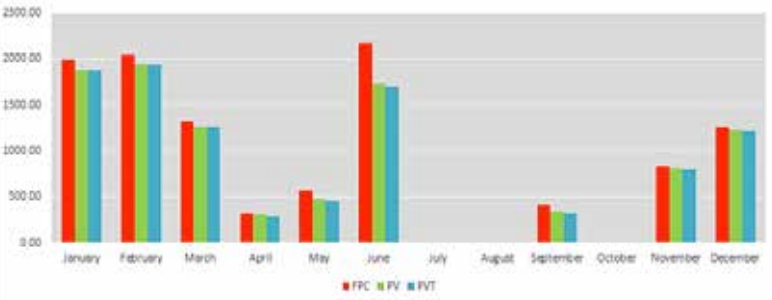


Σχήμα 2: Κατανάλωση ενέργειας από το δίκτυο

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένα παράδειγμα για ηλιακά πεδία μεγέθους 36 m^2. Η επιφάνεια αυτή αποτελεί την βέλτιστη οικονομικά επιλογή για τα συστήματα με PV και PV/T όπως αναλύεται παρακάτω.

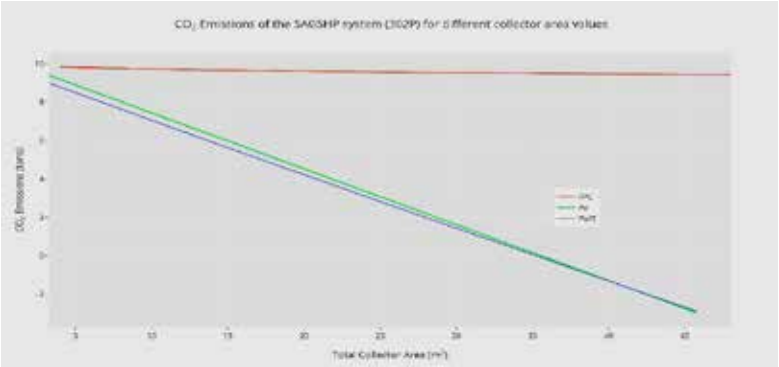


Σχήμα 3: Σύγκριση της συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας (MWh) και της κατανάλωσης από το δίκτυο σε ετήσια βάση για τα τρία συστήματα με ηλιακό πεδίο 36 m^2 .



Σχήμα 4: Μηνιαία κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας (kWh) από το δίκτυο για επιφάνεια πεδίου 36 m^2.

Η χρήση θερμικών συλλεκτών οδηγεί σε μείωση της συνολικής κατανάλωσης, ενώ τα άλλα συστήματα τροφοδοτούν απευθείας τις ΓΑΘ με ηλεκτρικό ρεύμα, μειώνοντας έτσι την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο. Στο σχήμα 3 παρουσιάζεται η συνολική κατανάλωση ενέργειας και η κατανάλωση από το δίκτυο για τα 3 συστήματα με ηλιακό πεδίο 36 m^2 . Γίνεται άμεσα αντιληπτό ότι παρά τη μειωμένη συνολική κατανάλωση του συστήματος με FPC, τα συστήματα με PV, PV/T καταναλώνουν σημαντικά λιγότερη ενέργεια από το δίκτυο. Για να εξεταστεί η πιθανότητα βελτίωσης της λειτουργίας του συστήματος με θερμικούς συλλέκτες, προσομοιώθηκαν και μεγαλύτερα ηλιακά πεδία, έως και 120 m^2, αλλά δεν κατάφεραν να μειώσουν την κατανάλωση από το δίκτυο όσο τα συστήματα φωτοβολταϊκών και υβριδικών συλλεκτών με επιφάνεια ηλιακού πεδίου 36 m^2. Στο σχήμα 4 παρουσιάζεται το προφίλ κατανάλωσης από το δίκτυο για ένα έτος. Η μεγαλύτερη διαφοροποίηση των 3 συστημάτων εντοπίστηκε τον Ιούνιο. Σε αυτό οφείλεται η αυξημένη κατανάλωση από το δίκτυο του συστήματος θερμικών συλλεκτών. Αυτό συμβαίνει διότι δεν είναι ικανό να αξιοποιήσει το ζεστό νερό που παράγει για θέρμανση την περίοδο αυτή. Η προσθήκη ενός chiller ζεστού νερού σε συνδυασμό με ένα μεγάλο ηλιακό πεδίο (>100 m^2) θα είχε τη δυνατότητα να αντισταθμίσει τη διαφορά στην περίοδο ψύξης και θέρμανσης, αυξάνοντας όμως το κόστος και τη πολυπλοκότητα του συστήματος. Θα πρέπει να σημειωθεί όμως ότι σε αυτήν την ανάλυση δεν έχει ληφθεί υπόψη το σημαντικό ποσό ενέργειας που παράγουν τα PV, PV/T όταν δεν υπάρχουν φορτία, δηλαδή είτε το χρονικό διάστημα ανάμεσα σε περιόδους ψύξης/θέρμανσης ή όταν το Πανεπιστήμιο παραμένει κλειστό. Στον υπολογισμό των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου έχει συνυπολογιστεί αυτή η ενέργεια όμως η οποία προσφέρει σημαντικά οφέλη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5 που απεικονίζονται οι εκπομπές CO_2. Δεν εκπέμπεται μόνο CO_2 προφανώς αλλά έχει συνυπολογιστεί το αποτύπωμα όλων των αερίων που είναι 850 g CO_2/kWh ηλεκτρικής ενέργειας σε περιοχές που είναι διασυνδεδεμένες με το ηπειρωτικό ηλεκτρικό δίκτυο, όπως αναφέρει ο Κ.Ev.Α.Κ. Είναι εμφανές ότι αυτά τα συστήματα μειώνουν δραστικά τις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου.



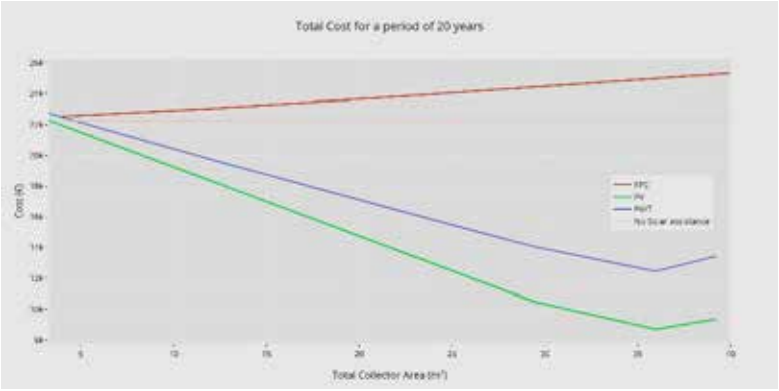
Σχήμα 5: Εκπομπές CO_2 σε τόνους ανά έτος ως συνάρτηση της επιφάνειας των ηλιακών πεδίων.

3.2. Οικονομική Ανάλυση

Για το συνολικό κόστος λήφθηκαν υπόψη το αρχικό κεφάλαιο και το κόστος λειτουργίας. Τα κόστη εργατοωρών, εγκατάστασης και συντήρησης θεωρήθηκαν ότι είναι ίδια μεταξύ των τριών συστημάτων και δεν συμπεριλήφθηκαν στον υπολογισμό. Οι υπολογισμοί έγιναν για 20 έτη με προεξοφλητικό επιτόκιο 4% και μία μέση τιμή ρεύματος από τους διάφορους παρόχους 0,14 €/kWh [π.χ. 13].

Στο Σχήμα 6 απεικονίζεται το συνολικό κόστος των συστημάτων για μία περίοδο 20 ετών σε συνάρτηση με την επιφάνεια των ηλιακών πεδίων. Το κόστος του συστήματος με FPC είναι πολύ υψηλό, μεγαλύτερο ακόμα και από αυτό του συμβατικού. Τα φωτοβολταϊκά αποτελούν την πιο προσιτή επιλογή λόγω του συνδυασμού σχετικά φθηνών πάνελ και καλής παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος. Τα υβριδικά έχουν παραπλήσιο ενεργειακό προφίλ αλλά το υψηλότερο αρχικό κόστος τους τα καθιστά πιο ακριβά σε σχέση με τα PV. Η αύξηση που παρατηρείται μετά τα 36 m^2 είναι και το μέγιστο δυνατό νόμιμο μέγεθος πεδίου. Μετά από αυτό δεν συνυπολογίζεται η περίσσεια ενέργεια που παράγεται στον συμψηφισμό.

Ένα ηλιακό πεδίο φωτοβολταϊκών 36 m^2 αποτελεί την βέλτιστη οικονομική λύση, αφού μειώνει το συνολικό κόστος μέσω της σημαντικής παραγωγής ενέργειας.



Σχήμα 6: Συνολικό κόστος των συστημάτων για 20 έτη ως συνάρτηση της επιφάνειας των ηλιακών πεδίων τους.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία προσομοιώθηκαν μέσω του TRNSYS τρία συστήματα γεωθερμικών αντλιών με ηλιακή υποβοήθηση και μελετήθηκε η απόδοσή τους για τη μείωση του ενεργειακού αποτυπώματος του νέου κτιριακού συγκροτήματος των ΗΜΜΥ του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Τα συστήματα αποτελούνται από θερμικούς, φωτοβολταϊκούς και υβριδικούς συλλέκτες αντίστοιχα, συνδεμένοι με το υπάρχον σύστημα θέρμανσης/ψύξης. Η ενεργειακή ανάλυση έδειξε ότι τα συστήματα PV και PV/T είχαν σημαντικά καλύτερα αποτελέσματα ως προς την κατανάλωση από το δίκτυο και τις εκπομπές CO_2 σε σχέση με το FPC σύστημα. Η οικονομική ανάλυση για 20 έτη έδειξε ότι η πιο προσιτή επιλογή είναι το σύστημα με φωτοβολταϊκά, λόγω της καλής απόδοσης των πάνελ με μικρό κόστος αγοράς. Αυτά τα δεδομένα καθιστούν το σύστημα με φωτοβολταϊκά ως το βέλτιστο. Είναι σαφές ότι οι γεωθερμικές αντλίες με ηλιακή υποβοήθηση έχουν τη δυνατότητα να μειώσουν ή να μηδενίσουν το ενεργειακό αποτύπωμα της θέρμανσης/ψύξης των κτιρίων στην Ελλάδα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] EC, “New Rules for Greener and Smarter Buildings Will Increase the Quality of Life for All Europeans”, 2019, European Commission. [Available from: https://ec.europa.eu]

[2] Prindle, W., 2009, “Energy Efficiency as a Low-Cost Resource for Achieving Carbon Emissions Reductions”, National Action Plan for Energy Efficiency, Environmental Protection Agency. [Available from: http://www.epa.gov/eeactionplan]

[3] Rousselot, M. 2018, “Energy efficiency trends in buildings”, Odyssee-Mure project, European Union. [Available from: https://www.odyssee-mure.eu]

[4] Eurostat, (2020), SHARES Data, European Commission.

[5] Yao, J., Liu, W., Zhang, L., Tian, B., Dai, Y., and Huang, M., 2020, “Performance analysis of a residential heating system using borehole heat exchanger coupled with solar assisted PV/T heat pump”, Renewable Energy 160, pp. 160-175.

[6] Sarbu, I., and Sebarchievici, C, 2014, “General review of ground-source heat pump systems for heating and cooling of buildings”, Energy and Buildings, 70, pp. 441–454.

[7] He, Y., and Bu, X., 2020, “Performance of Hybrid Single Well Enhanced Geothermal System and Solar Energy for Buildings Heating”, Energies, 13, 2473.

[8] Kouremenos, D. A., Antonopoulos, K. A., and Domazakis, E. S., 1985, “Solar radiation correlations for the Athens, Greece, area”, Solar Energy, 35(3), p.p. 259-269.

[8] 2020, Statistics of the Photovoltaic market for 2019 (In Greek). Hellenic Association Of Photovoltaic Companies HELAPCO. [Available from: https://helapco.gr/]

[10] K.EN.A.K Regulation for Energy Efficiency in Buildings. T.E.E. [Available from: http://portal.tee.gr/portal/page/portal/SCIENTIFIC_WORK/GR_ENERGEIAS/kenak]

[11] PVGIS Database and Resource map. Joint Research Lab, European Union. [Available from: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/#TMY]

[12] Νόμος: ΥΑΑΠΕΗΛ/Α/Φ1/οικ.24461 (ΦΕΚ Β’ 3583/31.12.2014).

[13] «Τιμές Πωλήσεως ηλεκτρικής ενέργειας υπό χαμηλή τάση”, Public Power Corporation in Greece. [Available from: www.dei.gr, https://www.dei.gr/Documents/xt.tim.1.7.08.pdf]

ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΤΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΧΡΗΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ ΚΑΙ ΤΟΝ ΚΟΣΜΟ

Μαρία Παπαχρήστου[1*], Νικόλαος Ανδρίτσος[2], Απόστολος Αρβανίτης[3], Πασχάλης Δαλαμπάκης[4], Δημήτριος Μενδρινός[5]

[1*] Τμήμα Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης,
[2] Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος,
[3] Ελληνική Αρχή Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, Αθήνα
[4]Ινστιτούτο Εγγείων Βελτιώσεων, ΕΛΓΟ «ΔΗΜΗΤΡΑ», Σίνδος
[5]Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας-ΚΑΠΕ, Πικέρμι
*e-mail: mariap@geo.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εγκατεστημένη ισχύς από γεωθερμικές χρήσεις στην Ελλάδα ανήλθε στο τέλος του 2020 στα 263 MW_{th}, παρουσιάζοντας μικρή αύξηση (4%) κατά την τελευταία τριετία. Η γεωθερμική ενέργεια αξιοποιείται στη χώρα μας μόνο σε άμεσες χρήσεις, κυρίως στα αβαθή συστήματα γεωθερμίας, στη λουτροθεραπεία και για θέρμανση θερμοκηπίων. Εκτός των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας (ΓΑΘ), οι σημαντικότερες πρόσφατες δραστηριότητες αφορούν σε νέες επενδύσεις στον γεωργικό τομέα και σε κάποια, υπό εξέλιξη, έργα έρευνας και αξιοποίησης της γεωθερμικής ενέργειας στη Βόρεια Ελλάδα. Συγκεκριμένα, την τελευταία τριετία η γεωθερμική μονάδα θερμοκηπίων στο Νέο Εράσμιο Ξάνθης επεκτάθηκε από τα 120 στα 200 στρέμματα, ενώ κάποιες άλλες μονάδες είναι υπό εξέταση. Επιπλέον, το πρώτο έργο γεωθερμικής τηλεθέρμανσης στην Ελλάδα βρίσκεται στο στάδιο κατασκευής στο Αρίστηνο Έβρου. Η γεωθερμική ηλεκτροπαραγωγή παραμένει μηδενική, παρότι έχουν γίνει κάποια θετικά βήματα τα τελευταία χρόνια. Γεωθερμική έρευνα πραγματοποιείται σε πεδία της Βόρειας Ελλάδας (Λεκάνη Στρυμόνα, Δέλτα Έβρου, Στρυμονικός Κόλπο κλπ) με στόχο την περαιτέρω διερεύνηση γνωστών περιοχών. Σε παγκόσμιο επίπεδο, στις αρχές του 2020 η εγκατεστημένη γεωθερμική ισχύς από ηλεκτροπαραγωγή ανερχόταν σε 16 GWe, σημειώνοντας αύξηση σχεδόν 30% τα τελευταία πέντε χρόνια. Η αντίστοιχη ισχύς από άμεσες χρήσεις σε έφτασε τα 108GW_{th}. Παρουσιάζονται επίσης οι νέες τάσεις που παρατηρούνται διεθνώς, όπως είναι τα Βελτιωμένα Γεωθερμικά Συστήματα.

Λέξεις Κλειδιά: γεωθερμικό δυναμικό, ηλεκτροπαραγωγή, άμεσες χρήσεις, γεωθερμικές αντλίες θερμότητας

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η γεωθερμική ενέργεια αξιοποιείται παγκοσμίως για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος ή απευθείας χρήση της θερμικής ενέργειας σε 90 χώρες [1] & [2]. Σχεδόν σε όλες (88) χρησιμοποιείται ως θερμική ενέργεια και σε 29 από αυτές και για ηλεκτροπαραγωγή.

Η εγκατεστημένη ισχύς από **ηλεκτροπαραγωγή** προσεγγίζει πλέον τα 16 GWe παγκοσμίως [1], καταγράφοντας αύξηση 29,8% κατά την πενταετία 2015-2020. Παρόλα αυτά, οι ρυθμοί ανάπτυξης προβλέπεται να είναι μειωμένοι για την επόμενη πενταετία και δεν θα ξεπεράσουν το 19% [1], ενώ το Παγκόσμιο Συμβούλιο Ενέργειας (World Energy Council) προβλέπει για το διάστημα 2015-2060 ακόμη μικρότερη ετήσια αύξηση της εγκατεστημένη ισχύος από γεωθερμική ηλεκτροπαραγωγή, που θα κυμανθεί μεταξύ 3,4% και 5,4% [1]. Η συνολική εγκατεστημένης ισχύς από **άμεσες** γεωθερμικές εφαρμογές ήταν περίπου 108 GWth στο τέλος του 2019 [2]. Η μέση ετήσια αύξηση για την πενταετία 2015-2020 ήταν 8,73%.

Όσον αφορά στην Ελλάδα, η ανάπτυξη των ΑΠΕ αποτελεί, κυρίως την τελευταία δεκαετία, έναν από τους μεγαλύτερους στόχους της εθνικής ενεργειακής πολιτικής. Με βάση το αναθεωρημένο Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΦΕΚ Β'4893/31-12-2019), ο στόχος για το μερίδιο συμμετοχής των ΑΠΕ στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας για το έτος 2030 τέθηκε στο 35% (61% για την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και 43% για Θέρμανση και Ψύξη), χωρίς να προσμετράται το μερίδιο χρήσης των αντλιών θερμότητας. Η συμμετοχή της γεωθερμίας στην καθαρή ηλεκτροπαραγωγή προβλέπεται στις 0,63TWhe (0,1 GWe), ενώ για την κάλυψη θερμικών αναγκών στην τελική κατανάλωση τα 906 ktoe, σε σύνολο 2460ktoe.

Οι φιλόδοξοι στόχοι που είχαν τεθεί το 2010 για τη γεωθερμία, με βάση το Εθνικό Σχέδιο Δράσης για τις ΑΠΕ [3], προέβλεπαν για το έτος 2020, 120 MWe εγκατεστημένης ισχύος από ηλεκτροπαραγωγή, 51 ktoe για την κάλυψη θερμικών αναγκών και 50 ktoe από γεωθερμικές αντλίες θερμότητας (τελική κατανάλωση). Στην πραγματικότητα μόνο οι ΓΑΘ ανταποκρίθηκαν στους στόχους αυτούς, ενώ η γεωθερμική ηλεκτροπαραγωγή είναι μηδενική και η συμμετοχή της γεωθερμίας στην κάλυψη θερμικών αναγκών παραμένει εξαιρετικά μικρή, παρά την σχετική αύξηση που παρατηρήθηκε στον γεωργικό τομέα. Στο τέλος του 2019, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς από άμεσες χρήσεις στην Ελλάδα έφτασε τα 263 MW_{th}, εκ των οποίων το 66% αφορά στην αξιοποίηση της αβαθούς γεωθερμίας [4]. Εκτιμάται ότι δεν υπήρξε κάποια αξιοσημείωτη μεταβολή μέσα στο 2020, εξαιτίας της πανδημίας COVID-19 και της πολύμηνης αναστολής των περισσότερων γεωθερμικών έργων και δραστηριοτήτων. Η αντίστοιχη ισχύς το 2015 ήταν 220,5 MWth [5], σημειώθηκε δηλαδή αύξηση 18% μέσα σε πέντε έτη, η οποία όμως οφείλεται αποκλειστικά στις ΓΑΘ.

2. Η ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ ΣΤΟΝ ΚΟΣΜΟ

2.1. Γεωθερμική Ηλεκτροπαραγωγή

Στο τέλος του 2019, 29 χώρες χρησιμοποιούσαν τη γεωθερμική ενέργεια για παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος (Εικόνα 1), πέντε περισσότερες σε σχέση με το 2015. Ανάμεσα στις χώρες στις οποίες πραγματοποιήθηκε για πρώτη φορά γεωθερμική ηλεκτροπαραγωγή την τελευταία πενταετία είναι και τρεις Ευρωπαϊκές: το Βέλγιο (0,8 MWe), η Κροατία (16,5 MWe) και η Ουγγαρία (3 MWe).

Οι δέκα (10) χώρες με τη μεγαλύτερη εγκατεστημένη ισχύ είναι οι ΗΠΑ (3,7 GWe), η Ινδονησία (2,29 GWe), οι Φιλιππίνες (1,92 GWe), η Τουρκία (1,59 GWe), η Κένυα (1,19 GWe), το Μεξικό (1,1 GWe), η Νέα Ζηλανδία (1,06 GWe), η Ιταλία (916 MWe), η Ιαπωνία (550 MWe) και η Ισλανδία (755 MWe).

Η αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος κατά 3,66 GWe σε σχέση με το 2015, οφείλεται κυρίως στην συμβολή της Ινδονησίας (+949 MWe), της Κένυας (+599 MWe) και της Τουρκίας (+1200 MWe).

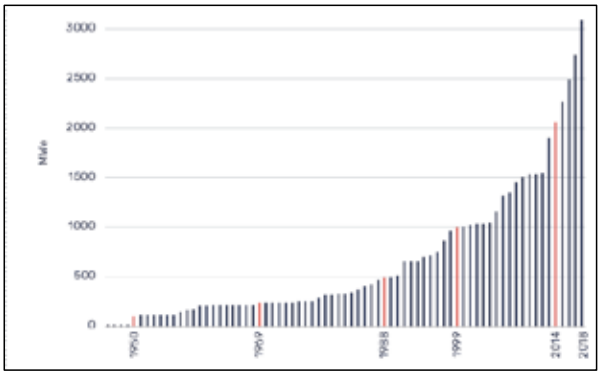
Η μεγαλύτερη μονάδα ηλεκτροπαραγωγής παγκοσμίως (375 MWe) βρίσκεται στην Ινδονησία, η οποία, με βάση το ρυθμό αξιοποίησης του γεωθερμικού της δυναμικού, αναμένεται να ξεπεράσει τις ΗΠΑ πριν το τέλος της τρέχουσας δεκαετίας [6].

Εντυπωσιακή είσοδο στο top-10 της παγκόσμιας κατάταξης έχει κάνει η Τουρκία, αυξάνοντας την εγκατεστημένη ισχύ από γεωθερμική ηλεκτροπαραγωγή από μόλις 82 MWe το 2010 [7] σε 1590 MWe στο τέλος του 2020 [8], παρουσιάζοντας μάλιστα αύξηση μεγαλύτερη του 50% την τελευταία μόνο πενταετία. Σήμερα, η συμμετοχή της γεωθερμίας στην τελική κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος στην Τουρκία ανέρχεται στο 3%. Η πολύ μεγάλη ανάπτυξη της γεωθερμίας στη γειτονική χώρα οφείλεται σε

δύο κυρίως παράγοντες: στην ευνοϊκή νομοθεσία για την προώθηση των ΑΠΕ (χρηματοδότηση, μειωμένη φορολογία για τουλάχιστον μία δεκαετία και άλλα κίνητρα), και στην αύξηση της τιμής της γεωθερμικής κιλοβατώρας (Feed in Tariff) από €55/MWh σε US$105/MWh, και επιπλέον US$27/MWh εφόσον ο εξοπλισμός κατασκευάζεται στην Τουρκία.

Εικόνα 1: Γεωθερμικές ηλεκτροπαραγωγικές μονάδες στον κόσμο (πηγή: ThinkGeoEnergy)

Όσον αφορά στην Κένυα, πρόκειται για τη χώρα με τον ταχύτερο ρυθμό γεωθερμικής ανάπτυξης στον κόσμο, μετά την Τουρκία. Προβλέπεται ότι η συνολική ηλεκτρική ισχύς από γεωθερμία να ανέλθει στα 5 GWe μέχρι το 2030 [1]. Όπως στην Τουρκία, έτσι και στην Κένυα οι υψηλοί ρυθμοί ανάπτυξης οφείλονται κατά βάση σε νέες ενεργειακές πολιτικές που ευνοούν και στηρίζουν τις ιδιωτικές επενδύσεις στον τομέα της γεωθερμίας, μεταξύ των οποίων και αύξηση των οικονομικών κινήτρων, των φοροαπαλλαγών, μειώσεις δασμών για τον γεωθερμικό εξοπλισμό κλπ.



Εικόνα 2: Εγκατεστημένη γεωθερμική ισχύς από ηλεκτροπαραγωγή στην Ευρώπη, συμπεριλαμβανομένης και της Τουρκίας [9]

Στην Ευρώπη λειτουργούν σήμερα 130 μονάδες γεωθερμικής ηλεκτροπαραγωγής σε 11 χώρες, με συνολική εγκατεστημένη ισχύ που ανέρχεται σε 3,3 GWe (Εικόνα 2). Στην ευρωπαϊκή αγορά κυριαρχούν η Τουρκία, η Ιταλία και η Ισλανδία. Γεωθερμικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής υπάρχουν επίσης στη Γερμανία, στην Πορτογαλία, στην Κροατία, στη Γαλλία, στην Ουγγαρία, στην Αυστρία, στη Ρουμανία και στο Βέλγιο. Επιπλέον, άλλες 36 μονάδες βρίσκονται υπό κατασκευή (σε χώρες που ήδη παράγουν ηλεκτρική ισχύ από γεωθερμία και στη Μεγάλη Βρετανία), ενώ 124 στη φάση σχεδιασμού [9]. Φαίνεται λοιπόν ότι, με βάση ένα αισιόδοξο σενάριο, ο αριθμός των εν λειτουργία μονάδων θα μπορούσε έως και να διπλασιαστεί τα επόμενα 5-8 έτη.

Οι περισσότερες μονάδες που λειτουργούν στην Ευρώπη, όπως επίσης και όλες οι νέες μονάδες που κατασκευάστηκαν τα τελευταία χρόνια, λειτουργούν με την τεχνολογία του δυαδικού κύκλου, στην συντριπτική τους πλειονότητα με Οργανικό Κύκλο Rankine (ORC). Μονάδες ξηρού ατμού υπάρχουν στην Ιταλία, ενώ μονής ή διπλής εκτόνωσης ατμού στην Τουρκία, στην Ισλανδία, στην Ιταλία και στην Γουαδελούπη (Γαλλία).

Τα Βελτιωμένα Γεωθερμικά Συστήματα (Enhanced Geothermal Systems-EGS) υπόσχονται την απόληψη τεράστιων ποσοτήτων θερμικής ενέργειας ακόμη και από περιοχές χωρίς φυσικούς υδροθερμικούς πόρους. Παρά τα σημαντικά βήματα που έγιναν για την ανάπτυξη της αναγκαίας τεχνολογίας για την αξιοποίησή τους, το αντίστοιχο κόστος κεφαλαίου παραμένει υψηλό και αποθαρρύνει τους ενδιαφερόμενους επενδυτές. Όμως, η τεχνολογία αυτή βρήκε εφαρμογή και στην αξιοποίηση των υδροθερμικών συστημάτων, συμβάλλοντας ουσιαστικά στην αύξηση της γεωθερμικής ηλεκτροπαραγωγής.

Ο όρος EGS στη διεθνή βιβλιογραφία [10] αναφέρεται είτε σε γεωθερμικά συστήματα όπου ο γεωθερμικός ταμιευτήρας δημιουργήθηκε εξαρχής τεχνητά (συνήθως μέσω της υδραυλικής θραύσης ενός αδιαπέρατου θερμού και ξηρού πετρώματος) είτε σε συμβατικούς υδροθερμικούς πόρους, στους οποίους ενισχύθηκε η υπάρχουσα περατότητα και πάλι μέσω υδραυλικής ή χημικής διέγερσης.

Στην πρώτη περίπτωση ανήκει το εμβληματικό Ευρωπαϊκό EGS πρόγραμμα στο Soultz-sous-Forêts στη Γαλλία, το οποίο ξεκίνησε τη δεκαετία του 1980 [11] όπου από το 2016 λειτουργεί μία νέα ηλεκτροπαραγωγική μονάδα 1,7 MWe, μετά από σχεδόν τρεις δεκαετίες μελετών και πιλοτικών εφαρμογών. Στην ίδια κατηγορία ανήκει και ένα από τα πιο φιλόδοξα προγράμματα EGS παγκοσμίως, αυτό στην λεκάνη Cooper στην Αυστραλία, το οποίο τελικά τερματίστηκε για οικονομικούς λόγους, παρά τον αρχικό σχεδιασμό για παραγωγή ισχύος 450 MWe.

Στη δεύτερη περίπτωση, εντάσσονται τα συστήματα και οι γεωθερμικές ηλεκτροπαραγωγικές μονάδες στο Landau και στο Insheim (Γερμανία) αλλά και σε άλλες χώρες (Ιαπωνία, Ισλανδία, Αυστραλία, ΗΠΑ κλπ). ‘Ένα από τα πιο φιλόδοξα προγράμματα EGS παγκοσμίως, αυτό στην λεκάνη Cooper στην Αυστραλία, τελικά τερματίστηκε για οικονομικούς λόγους, παρά τον αρχικό σχεδιασμό για παραγωγή ισχύος 450 MWe.

Στην δεύτερη περίπτωση, εντάσσονται ο γεωθερμικός σταθμός του Rittershoffen, ο οποίος απέχει μόλις 7 km από τη μονάδα EGS του Soultz και τροφοδοτεί με υπέρθερμο νερό (170°C) ισχύος 24 MWth γειτονικό εργοστάσιο παραγωγής αμύλου [12], τα συστήματα και οι γεωθερμικές ηλεκτροπαραγωγικές μονάδες στο Landau και στο Insheim (Γερμανία) αλλά και σε άλλες χώρες (Ιαπωνία, Ισλανδία, Αυστραλία, ΗΠΑ κλπ). ‘

Ένα πολύ σημαντικό ζήτημα που ευθύνεται για πολλές από τις επιφυλάξεις έναντι της ανάπτυξης των EGS, είναι η επαγόμενη σεισμικότητα κατά το στάδιο δημιουργίας τεχνητής διαπερατότητας με υδραυλική θραύση [13]. Υπάρχουν αρκετές καταγεγραμμένες περιπτώσεις, με πιο χαρακτηριστικά παραδείγματα αυτές της Βασιλείας (Ελβετία) και της Pohang (Νότια Κορέα), όπου έγιναν σεισμοί μεγέθους ML=3,4 (2006) και ML=5,5 (2017), αντίστοιχα, και οι οποίοι συνδέθηκαν, με τη λειτουργία των έργων EGS. Και στις δύο περιοχές, οι εργασίες διακόπηκαν οριστικά. Τα Βελτιωμένα Γεωθερμικά Συστήματα δεν συνδέονται πάντα με αύξηση της σεισμικότητας, καθώς αυτό εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως το βάθος των γεωτρήσεων, το είδος του γεωλογικού υποβάθρου και των διατρηθέντων σχηματισμών, η ήδη υπάρχουσα σεισμικότητα της περιοχής, η πίεση επανεισαγωγής κλπ [13].

Πολλά προγράμματα EGS βρίσκονται σήμερα σε εξέλιξη σε όλον τον κόσμο. Στις ΗΠΑ, στο Ηνωμένο Βασίλειο, στην Ισλανδία, στην Κίνα και στη Γερμανία τα έργα αυτά είναι σε πιο ώριμη φάση έρευνας ή ανάπτυξης, ενώ σε άλλες χώρες, όπως το Βέλγιο, αντίστοιχα γεωθερμικά συστήματα είναι υπό διερεύνηση. Η Τουρκία έχει προχωρήσει σε διάνοιξη ερευνητικών γεωτρήσεων σε βάθη μέχρι 4500m, ενώ εκτιμάται ότι το γεωθερμικό δυναμικό της από EGS ξεπερνά τα 20 GWe. Σε κάθε περίπτωση, η εξάλειψη ή η μείωση του κινδύνου της επαγόμενης σεισμικότητας, η τεχνολογική ωρίμανση, η μείωση και η κάλυψη του γεωλογικού ρίσκου και η διαθέσιμη αγορά ενέργειας, αποτελούν κάποιες από τις μεγαλύτερες προκλήσεις για την περαιτέρω ανάπτυξη των EGS και τη μετάβασή τους από την πιλοτική στη βιομηχανική εφαρμογή.

2.2. Άμεσες Χρήσεις

Όπως προαναφέρθηκε, η αξιοποίηση της γεωθερμίας σε άμεσες (θερμικές) χρήσεις πραγματοποιείται σε τουλάχιστον 88 χώρες παγκοσμίως, έξι περισσότερες σε σχέση με το 2015. Από αυτές, οι περισσότερες (34) βρίσκονται στην Ευρώπη, και ακολουθούν η Ασία, η Αμερική, η Αφρική και η

Ωκεανία. Οι πιο σημαντικές εφαρμογές αυτής της κατηγορίας είναι η τηλεθέρμανση, η λουτροθεραπεία, η θέρμανση θερμοκηπίων και εδάφους, οι υδατοκαλλιέργειες, η ξήρανση, και οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας. Η συνολική εγκατεστημένη γεωθερμική ισχύς ανήλθε στο τέλος του 2019 σε 107,727 GWth, καταγράφοντας αύξηση 52% την τελευταία πενταετία. Η πιο διαδεδομένη άμεση εφαρμογή παραμένει η εκμετάλλευση της αβαθούς γεωθερμίας μέσω των ΓΑΘ, των οποίων η εγκατεστημένη ισχύς αποτελεί το 71,6% της συνολικής.

Οι χώρες με τη μεγαλύτερη εγκατεστημένη γεωθερμική ισχύ συνοψίζονται στον Πίνακα 1, ενώ στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται οι χώρες με τη μεγαλύτερη εγκατεστημένη ισχύ ανά 1000 κατοίκους, όπου μακράν πρώτη είναι η Ισλανδία και στη συνέχεια οι Σκανδιναβικές χώρες και η Ελβετία, κυρίως λόγω της πολύ διαδεδομένης χρήσης των ΓΑΘ. Αν εξαιρεθούν οι ΓΑΘ, τότε την πρώτη θέση με διαφορά καταλαμβάνει η Κίνα (με 14.160 MWth) και ακολουθούν η Τουρκία, η Ιαπωνία, η Ισλανδία, η Ιταλία και η Ουγγαρία.

Πίνακας 1: Χώρες με τη μεγαλύτερη εγκατεστημένη γεωθερμική ισχύ από άμεσες χρήσεις συμπεριλαμβανομένων των ΓΑΘ [2]

Χώρα	**MWth**	**TJ/year**
Κίνα	40.610	443.492
ΗΠΑ	20.713	152.810
Σουηδία	6.680	62.400
Γερμανία	4.806	29.139
Τουρκία	3.488	54.584

Πίνακας 2: Χώρες με τη μεγαλύτερη εγκατεστημένη γεωθερμική ισχύ από άμεσες χρήσεις ανά 1000 κατοίκους [2]

Χώρα	**MWth**	**TJ/year**
Ισλανδία	7	99,10
Σουηδία	0,67	6,22
Φινλανδία	0,42	4,23
Ελβετία	0,26	2,34
Νορβηγία	0,21	2,12

Συστήματα αβαθούς γεωθερμίας (ΓΑΘ): βρίσκονται εγκατεστημένα σε 54 χώρες, με συνολική εγκατεστημένη ισχύ **77,5 GWth**, τα οποία αντιστοιχούν σε περίπου 6,5 εκατομμύρια εγκατεστημένες μονάδες (λαμβάνοντας ως μέση ισχύ τα 12kW). Ο μέσος συντελεστής απόδοσης (COP) είναι 3.5 και ο συντελεστής χρήσης 0.23 [2]. Ο αριθμός των εγκατεστημένων μονάδων ΓΑΘ διπλασιάστηκε την τελευταία δεκαετία ενώ το 83,5% αυτών να βρίσκεται στην Κίνα, στις ΗΠΑ, στη Σουηδία, στη Γερμανία και την Φινλανδία. Οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας χρησιμοποιούνται τόσο για θέρμανση/ψύξη όσο και για παροχή ζεστού νερού χρήσης.

Θέρμανση μεμονωμένων χώρων και τηλεθέρμανση: Η εγκατεστημένη ισχύς ανήλθε παγκοσμίως σε **12,77 GWth**, εκ των οποίων το 91% αφορά στην τηλεθέρμανση. Συστήματα γεωθερμικής τηλεθέρμανσης υπάρχουν σε 29 χώρες, με κυρίαρχες την Κίνα, την Ισλανδία, την Τουρκία, την Γαλλία και τη Γερμανία [2]. Στην Ευρώπη υπάρχουν 327 δίκτυα τηλεθέρμανσης και δροσισμού σε περισσότερες από 20 χώρες, με συνολική εγκατεστημένη ισχύ 5,5 GWth [9].

Θέρμανση θερμοκηπίων και εδάφους: Η συνολική εγκατεστημένη γεωθερμική ισχύς από θέρμανση θερμοκηπίων και εδάφους (καλυμμένων καλλιεργειών) σε 32 χώρες παγκοσμίως, έφτασε **τα 2,5 GWth** (35.826 TJ/yr), καταγράφοντας αύξηση περίπου 24% την τελευταία πενταετία. Το 83% της γεωθερμικής ισχύος από τέτοιες εφαρμογές αφορά εγκαταστάσεις που βρίσκονται στην Τουρκία, στην Κίνα, στην Ολλανδία, στη Ρωσία και στην Ουγγαρία. Η συνολική έκταση των θερμαινόμενων με γεωθερμία θερμοκηπίων έφτανε στα τέλη του 2019 στα 18.000 στρέμματα [2].

Ιχθυοκαλλιέργειες και υδατοκαλλιέργειες: Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς ανέρχεται στα **950 MWth** και αφορά εγκαταστάσεις σε 21 χώρες. Τα είδη που συνήθως εκτρέφονται είναι σολομός, λαβράκι, πέστροφα, και πέρκα, καθώς και τροπικά ψάρια, αστακοί και γαρίδες.

Ξήρανση αγροτικών προϊόντων: Πραγματοποιείται σε 15 χώρες και περιλαμβάνει ξήρανση κυρίως φυκών, δημητριακών, φρούτων, τριφυλλιού και ξυλείας. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς είναι 257 MWth, καταγράφοντας αύξηση περίπου 60% τα τελευταία πέντε χρόνια. Οι χώρες με τις μεγαλύτερες εγκαταστάσεις γεωθερμικής ξήρανσης είναι η Κίνα, η Γαλλία, η Ουγγαρία, οι ΗΠΑ και η Ιαπωνία.

Βιομηχανικές χρήσεις: Σε αυτήν την κατηγορία γεωθερμικών χρήσεων εντάσσονται ιδιαίτερα ενεργοβόρες εφαρμογές όπως επεξεργασία σκυροδέματος, εμφιάλωση νερού και ανθρακούχων ποτών, παστερίωση γάλακτος, βυρσοδεψία, επεξεργασία χαρτιού, παραγωγή βορικού οξέως κλπ. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς ξεπέρασε στο τέλος του 2019 τα **850 MWth** σε 14 χώρες.

Λουτροθεραπεία και κολύμβηση: Παρά το γεγονός ότι στις περισσότερες χώρες δεν κρατούνται κάποια αρχεία ή στατιστικά στοιχεία για τη χρήση των γεωθερμικών ρευστών σε εγκαταστάσεις λουτροθεραπείας, spa ή κολυμβητηρίων, με βάση κάποιες παραδοχές (π.χ. παροχή 3-5 l/s και ΔT=10°C), η συνολική εγκατεστημένη ισχύς εκτιμάται ότι ανέρχεται σε **12,2 GWth** σε περισσότερες από 55 χώρες, με κυρίαρχες στον τομέα αυτόν την Κίνα, την Ιαπωνία, την Τουρκία, τη Βραζιλία και το Μεξικό.

Αντιπαγετική προστασία και δροσισμός χώρων: Τέτοιες εφαρμογές υπάρχουν σε πολύ λίγες χώρες, όπως στην Ισλανδία, Ιαπωνία, Αργεντινή, ΗΠΑ και Σλοβενία ενώ στις Βουλγαρία, Βραζιλία, Αυστραλία, Σλοβενία, Αλγερία, Αλβανία και Ινδία γίνεται και δροσισμός χώρων. Η εγκατεστημένη ισχύς είναι **415 MWth** και **20 MWth**, αντίστοιχα.

Λοιπές χρήσεις: Περιλαμβάνονται γεωθερμικές εφαρμογές όπως κτηνοτροφία, καλλιέργεια σπιρουλίνας, αφαλάτωση, αποστείρωση γυάλινων φιαλών, άρδευση κλπ. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς ανέρχεται σε **106 MWth** και αφορά στοιχεία από 14 χώρες.

3. Η ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Οι γεωθερμικές χρήσεις στην Ελλάδα περιλαμβάνουν μόνο άμεσες εφαρμογές, ενώ η ηλεκτροπαραγωγή παραμένει μηδενική. Η μικρή (4%) αύξηση στην συνολική εγκατεστημένη γεωθερμική ισχύ της τελευταίας τριετίας οφείλεται εξ' ολοκλήρου στη χρήση των ΓΑΘ.

Οι συνολικές επενδύσεις που έγιναν στην Ελλάδα την τελευταία πενταετία για την έρευνα και την αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας (εκτός ΓΑΘ) ξεπέρασαν τα 35 εκ. ευρώ, ποσό υπερδιπλάσιο εκείνου που επενδύθηκε την περίοδο 2010-2015.

3.1. Γεωθερμική ηλεκτροπαραγωγή

Οι βεβαιωμένοι γεωθερμικοί πόροι υψηλής ενθαλπίας στη Μήλο και τη Νίσυρο παραμένουν ανεκμετάλλευτοι. Όποια προσπάθεια έγινε για πραγματοποίηση σχετικών έργων έρευνας και παραγωγής σε άλλες περιοχές που θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν για ηλεκτροπαραγωγή, δεν απέδωσε, λόγω ιδιαιτεροτήτων της εγχώριας αγοράς.

Η μηδενική γεωθερμική ηλεκτροπαραγωγή οφείλεται σε έναν συνδυασμό παραγόντων, μεταξύ των οποίων ο σκεπτικισμός και η ισχυρή αντίδραση των τοπικών κοινωνιών στις περιοχές όπου υπάρχουν βεβαιωμένοι και κατάλληλοι γεωθερμικοί πόροι. Επιπλέον, η αποτυχία υπέρβασης των γραφειοκρατικών ή τεχνικών και οικονομικών εμποδίων (που χαρακτήρισε όλες τις προσπάθειες που έγιναν μέχρι σήμερα), το ασταθές επενδυτικό περιβάλλον κατά την τελευταία δεκαετία και η απροθυμία ή, έστω, διστακτικότητα των εμπλεκόμενων φορέων για την άμεση και πιο αποτελεσματική πρόοδο των διαδικασιών εκμετάλλευσης των βεβαιωμένων ή πιθανών πόρων υψηλής θερμοκρασίας, οδήγησαν στη σημερινή κατάσταση.

Η ΔΕΗ Α.Ε. εξακολουθεί να έχει τα δικαιώματα έρευνας ή έρευνας/εκμετάλλευσης του δυναμικού υψηλής θερμοκρασίας (>100°C) στα δύο βεβαιωμένα πεδία της χώρας (Μήλος και Νίσυρος) καθώς και στη Λέσβο και τα Μέθανα που είναι υπό έρευνα περιοχές. Τον Ιούλιο του 2018, ολοκληρώθηκε ο διαγωνισμός που είχε ξεκινήσει το 2017 από τη ΔΕΗ για την εύρεση στρατηγικού εταίρου με σκοπό την ανάπτυξη και διαχείριση των γεωθερμικών πεδίων στις παραπάνω περιοχές και την κατασκευή πιλοτικών γεωθερμικών ηλεκτροπαραγωγικών μονάδων, ισχύος 5-8 MWe εκάστη. Ο διαγωνισμός κατακυρώθηκε στην εταιρία ΗΛΕΚΤΩΡ του ομίλου ΕΛΛΑΚΤΩΡ, η οποία θα έχει το 51% της εταιρείας «Γεωθερμικός Στόχος Δύο ΙΙ», ειδικού σκοπού που ίδρυσε η ΔΕΗ που θα χρηματοδοτήσει,

εγκαταστήσει και λειτουργήσει τις μονάδες παραγωγής. Το χρονοδιάγραμμα εργασιών προβλέπει ότι εντός της επόμενης πενταετίας θα έχει λειτουργήσει η πρώτη ηλεκτροπαραγωγική μονάδα 5 MWe, αν και κάτι τέτοιο μάλλον θεωρείται ως πολύ αισιόδοξο σενάριο, ιδιαίτερα μετά την αναστολή όλων των δραστηριοτήτων το μεγαλύτερο διάστημα του 2020, λόγω COVID-19.

3.2. Άμεσες χρήσεις

Σε αντίθεση με την ηλεκτροπαραγωγή, οι άμεσες γεωθερμικές χρήσεις παρουσιάζουν καλύτερη εικόνα, που συνδέεται αφενός με τις επενδύσεις που έγιναν στον αγροτικό τομέα (γεωθερμικά θερμοκήπια στη Βόρεια Ελλάδα) και, αφετέρου, στην συνεχώς αυξανόμενη χρήση των ΓΑΘ. Ιδιαίτερα θετική εξέλιξη θα πρέπει να θεωρείται το πρώτο έργο γεωθερμικής τηλεθέρμανσης στο Αρίστηνο Έβρου, και ίσως αποτελέσει παράδειγμα για τη δημιουργία αντίστοιχων δικτύων και σε άλλες περιοχές της Ελλάδας.

Οι κυριότερες άμεσες χρήσεις των γεωθερμικών ρευστών στην Ελλάδα είναι η λουτροθεραπεία και η θέρμανση θερμοκηπίων, ενώ η θέρμανση εδάφους, μεμονωμένων χώρων και υδατοκαλλιεργειών αφορά πολύ περιορισμένες εφαρμογές, τόσο από άποψη εγκατεστημένη ισχύος όσο και από αριθμό εγκαταστάσεων. Πέραν αυτών, υπάρχει η αξιοποίηση της αβαθούς γεωθερμίας με γεωθερμικές αντλίες θερμότητας, των οποίων η εγκατεστημένη ισχύς ανέρχεται στο 67% επί συνόλου 260 MWth (Πίνακας 3).

Η αξιοποίηση των γεωθερμικών πεδίων στη Βόρεια Ελλάδα οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στη θετική στάση της τοπικής αυτοδιοίκησης και των τοπικών κοινωνιών, και τη γενική αντίληψη ότι η γεωθερμία μπορεί να αποτελέσει πηγή οικονομικών αλλά και περιβαλλοντικών οφελών. Ο τομέας των ΓΑΘ παραμένει ο πιο δυναμικός στην εγχώρια γεωθερμική αγορά, για λόγους που θα μπορούσαν να συνοψιστούν στην ώριμη τεχνολογία, στις απλοποιημένες διαδικασίες αδειοδότησης, στην πολύ μεγάλη εξοικονόμηση ενέργειας και χρημάτων, και, τέλος, στη θέσπιση μιας σειράς μέτρων και κανονισμών που στοχεύουν στην πλήρη απεξάρτηση των συστημάτων θέρμανσης από τα ορυκτά καύσιμα.

Λουτροθεραπεία: Στην Ελλάδα υπάρχουν περισσότερα από 70 κέντρα λουτροθεραπείας και εγκαταστάσεις spa καθώς και αρκετές (~25) εξωτερικές πισίνες που λειτουργούν με γεωθερμικά νερά. Οι θερμές και μεταλλικές πηγές σε όλη τη χώρα είναι πάνω από 750, οι μισές εκ των οποίων χαρακτηρίζονται και ως ιαματικές. Η θερμοκρασία των θερμών πηγών κυμαίνεται από 25 έως 92°C, ενώ η θερμοκρασία των θερμών νερών στις εγκαταστάσεις λουτροθεραπείας δεν ξεπερνά τους 39°C.
Οι παραδοσιακές λουτροπόλεις λειτουργούν σχεδόν όλες από τον Ιούνιο μέχρι τον Οκτώβριο, και μόνο ελάχιστες είναι αυτές που παραμένουν ανοιχτές καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Τα γεωθερμικά ρευστά σε αυτές τις εγκαταστάσεις έχουν αποκλειστικά ιαματική χρήση και δεν χρησιμοποιούνται για θέρμανση των χώρων λουτροθεραπείας ή φιλοξενίας των επισκεπτών, εκτός από μία περίπτωση, αυτή των λουτρών Τραϊανούπολης. Πρόσφατη δυσάρεστη εξέλιξη αποτέλεσε η διακοπή της λειτουργίας των Λουτρών Βόλβης (Θεσσαλονίκη) τον Μάρτιο του 2019, για οικονομικούς λόγους. Στη συγκεκριμένη λουτρόπολη, γεωθερμικά ρευστά με θερμοκρασία περίπου 58°C χρησιμοποιούνταν από το 2005 για τη θέρμανση των εγκαταστάσεων.
Η χρήση της γεωθερμικής ενέργειας στις λουτροθεραπευτικές μονάδες στην Ελλάδα δεν μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια, καθώς δεν υπάρχει συστηματική καταγραφή των απαραίτητων δεδομένων. Με μια συντηρητική εκτίμηση, θα μπορούσε να εκτιμηθεί ότι ανέρχεται σε 260TJ/yr, που αντιστοιχεί σε εγκατεστημένη ισχύ 43 MWth.

Θέρμανση θερμοκηπίων: Τα περισσότερα γεωθερμικά θερμοκήπια βρίσκονται στη Βόρεια Ελλάδα (Μακεδονία και Θράκη). Συνολικά υπάρχουν 18 μονάδες με θερμαινόμενη έκταση περίπου 400 στρέμματα (στοιχεία 2019). Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς υπολογίζεται στα 38 MWth (χρήση ενέργειας 407 TJ/yr). Οι πιο σημαντικές επενδύσεις στον τομέα αυτό έγιναν στα γεωθερμικά πεδία Νέου Ερασμίου Ξάνθης και Χρυσούπολη Καβάλας.
Στο Νέο Εράσμιο τα γεωθερμικά θερμοκήπια υδροπονικής καλλιέργειας τομάτας και αγγουριού καταλαμβάνουν πλέον έκταση 200 στρεμμάτων. Η συνολική επένδυση από την εταιρεία «Πλαστικά Θράκης Α.Ε.» ξεπέρασε τα 20 εκατ. ευρώ, ενώ δημιουργήθηκαν περίπου 150 θέσεις εργασίας. Για τη θέρμανση των χώρων καλλιέργειας και συσκευασίας χρησιμοποιούνται ρευστά θερμοκρασίας 58-60°C, που προέρχονται από πέντε γεωτρήσεις συνολικής παροχής 500 m^3/h. Μετά τη χρήση τους, τα ρευστά επανεισάγονται στον ταμιευτήρα με θερμοκρασία 30-33°C. Η εγκατεστημένη ισχύς ανέρχεται σε 15 MWth περίπου.
Στο πεδίο Ερατεινού-Χρυσούπολης, η τοπική αυτοδιοίκηση έχει επενδύσει περισσότερο από 10 εκατ. ευρώ για τη γεωθερμική έρευνα και τη δημιουργία των απαραίτητων υποδομών, ενώ είναι υπεύθυνη

και για τη διαχείριση του πεδίου. Υπάρχουν δύο βαθιές παραγωγικές γεωτρήσεις και μία επανεισαγωγής, ενώ έχουν επίσης κατασκευαστεί θερμικοί σταθμοί και δίκτυο διανομής των θερμών ρευστών συνολικού μήκους 18 km. Τα ρευστά διατίθενται αποκλειστικά για χρήση στον αγροτικό τομέα. Προς το παρόν, η μόνη αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας γίνεται από το 2016 σε μία ιδιωτική θερμοκηπιακή μονάδα 35 στρεμμάτων με έρριζα μοσχεύματα φυτών. Η θερμοκρασία στον γεωθερμικό ταμιευτήρα είναι περίπου 70-75°C, ενώ η θερμοκρασία των ρευστών που κυκλοφορούν μέσα στις μονάδες είναι 30-50°C, ανάλογα με τις ανάγκες των φυτών. Η απόρριψη των ρευστών μετά τη χρήση τους γίνεται στους 25°C. Η μέση απαιτούμενη παροχή για τη θέρμανση του θερμοκηπίου είναι μικρή και δεν ξεπερνά τα 9 m^3/h. Η εγκατεστημένη ισχύς είναι περίπου 2,4 MWth (24,27 TJ/yr). Η εταιρεία SELECTA Hellas έχει επενδύσει περίπου 7 εκατ. ευρώ για την κατασκευή και λειτουργία του θερμοκηπίου, ενώ αναμένεται τα επόμενα χρόνια να γίνει επέκταση της μονάδας με 25 επιπλέον στρέμματα.

Θέρμανση εδάφους: Η χρήση θερμών νερών για τη θέρμανση ανοικτών καλλιεργειών ξεκίνησε για πρώτη φορά στην Ελλάδα στο Νέο Εράσμιο Ξάνθης. Μια παρόμοια εγκατάσταση υπάρχει και στο Μυρωδάτο της Ξάνθης από το 2005. Και στις δύο περιπτώσεις η γεωθερμία χρησιμοποιείται για τη θέρμανση φυτειών λευκού και πράσινου σπαραγγιού. Στο Νέο Εράσμιο χρησιμοποιούνται ρευστά έως 58°C. Η θερμαινόμενη έκταση έφτασε το μέγιστο (200 στρέμματα) στις αρχές της δεκαετίας του 2000, ενώ σήμερα οι νέες φυτείες καταλαμβάνουν 10 στρέμματα. Η σημαντική αυτή μείωση δεν σχετίζεται με τη γεωθερμία. Στο Μυρωδάτο, η συνολική θερμαινόμενη έκταση με ρευστά θερμοκρασίας 50°C είναι 30 στρέμματα. Η μέθοδος λειτουργίας και η τεχνική του συστήματος θέρμανσης εδάφους, έχουν περιγραφεί αναλυτικά από τους Δαλαμπάκης κ. ά. (2018) [14]. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς είναι περίπου 0,8 MWth (χρήση ενέργειας 10,5 TJ/yr).

Καλλιέργεια σπιρουλίνας: Υπάρχουν τρεις εγκαταστάσεις καλλιέργειας του άλγους σπιρουλίνα με τη χρήση της γεωθερμίας, όλες στην περιοχή των Θερμών Νιγρίτας (Λεκάνη Σερρών). Η συνολική έκταση των δεξαμενών προσεγγίζει τα 9.000m^2. Η μέση απαιτούμενη παροχή γεωθερμικών ρευστών για τη διατήρηση της θερμοκρασίας του νερού στις δεξαμενές στους 33-36°C είναι 20-21 m^3/h, ενώ μπορεί να φτάσει τα 35-40 m^3/h τις ψυχρές ημέρες του έτους. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς από τις τρεις αυτές εγκαταστάσεις φτάνει τα 0,75 MWth.

Αφυδάτωση/Ξήρανση αγροτικών προϊόντων: Η μοναδική γεωθερμική μονάδα ξήρανσης προϊόντων στην Ελλάδα, λειτουργεί από το 2001 στο Νέο Εράσμιο της Ξάνθης. Μέχρι σήμερα η παραγωγή έχει ξεπεράσει τους 300 τόνους αφυδατωμένης τομάτας, ενώ τα τελευταία χρόνια ξηραίνονται και άλλα είδη λαχανικών (ελιές, σπαράγγια, πιπεριές, μελιτζάνες) και φρούτων (μήλα, λεμόνια κλπ). Η μονάδα λειτουργεί κατά βάση μεταξύ Ιουνίου και Σεπτεμβρίου για τη ξήρανση τομάτας, αλλά και σε άλλες περιόδους μέσα στο έτος ανάλογα με τις ανάγκες που προκύπτουν. Τα γεωθερμικά ρευστά που χρησιμοποιούνται έχουν θερμοκρασία 58°C και απαιτείται παροχή περίπου 30 m^3/h. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς της μονάδας είναι 0.3 MWth. Η συγκεκριμένη εφαρμογή περιγράφεται αναλυτικά από τους Δαλαμπάκη κ. ά. (2015) [14].

Θέρμανση μεμονωμένων χώρων: Επιτελείται με ρευστά γεωθερμία χαμηλής θερμοκρασίας στην μονάδα λουτροθεραπείας της Τραϊανούπολης, στους διοικητικούς χώρους της θερμοκηπιακής μονάδας στο Νέο Εράσμιο, έκτασης περίπου 2000m^2, και μερικές κατοικίες σε άλλα σημεία της Ελλάδας. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς είναι 1,65 MWth.

Τηλεθέρμανση: Παρόλο που η γεωθερμική τηλεθέρμανση είναι αρκετά διαδεδομένη σε αρκετές Ευρωπαϊκές χώρες, ακόμη και σε λιγότερο ευνοημένες από γεωθερμική άποψη, στην Ελλάδα δεν υπάρχει ακόμη κανένα εν λειτουργία δίκτυο με γεωθερμικά ρευστά. Επί της ουσίας, το μοναδικό έργο τηλεθέρμανσης βρίσκεται υπό κατασκευή στο γεωθερμικό πεδίο Αρίστηνου Έβρου και αναμένεται να ξεκινήσει την πιλοτική του λειτουργία στο τέλος του 2021. Θα αφορά τη διανομή θερμικής ενέργειας ισχύος 10 MWth, κατά 80% σε αγροτικές χρήσεις (κυρίως θερμοκήπια) και το υπόλοιπο για τη θέρμανση διαφόρων δημοτικών και δημόσιων κτιρίων καθώς και κάποιων οικισμών. Οι υποδομές περιλαμβάνουν δύο παραγωγικές γεωτρήσεις με συνολική παροχή 150m^3/h και μέση θερμοκρασία 89°C, θερμικούς σταθμούς, γεωτρήσεις επανεισαγωγής και τρία δίκτυα διανομής των ρευστών συνολικού μήκους 16 km. Η επιφάνεια των κτιρίων που θα θερμαίνονται θα προσεγγίζει τα 8000m^2. Η συνολική επένδυση που έχει γίνει από τον Δήμο Αλεξανδρούπολης, ο οποίος κατέχει τα δικαιώματα εκμετάλλευσης και διαχείρισης του πεδίου, είναι 6 εκατ. ευρώ.

Γεωθερμικές Αντλίες Θερμότητας: Οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας εξακολουθούν να καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο μερίδιο της γεωθερμικής αγοράς στην Ελλάδα, όπως άλλωστε συμβαίνει και σε όλο τον κόσμο. Η πρώτη καταγεγραμμένη εγκατάσταση συστήματος αξιοποίησης αβαθούς γεωθερμίας στην Ελλάδα έγινε στις αρχές της δεκαετίας του 1990, αλλά σημαντική αύξηση

της χρήσης των ΓΑΘ παρατηρείται από τη δεκαετία του 2000. Παρόλο που είναι πολύ δύσκολη η συλλογή των σχετικών δεδομένων, εκτιμάται ότι μέχρι σήμερα έχουν εγκατασταθεί περισσότερες από 3500 μονάδες ΓΑΘ με συνολική εγκατεστημένη ισχύ 175 MWth. Η ανοδική τάση της αγοράς των ΓΑΘ παρουσίασε κάμψη κατά την δεκαετία της οικονομικής κρίσης στην Ελλάδα, παρόλα αυτά παρέμεινε αυξητική. Τα τελευταία χρόνια, υπάρχει σημαντική διείσδυση των ΓΑΘ στη θέρμανση μεγάλων ιδιωτικών και δημόσιων κτιρίων (super market, γυμναστήρια, κολυμβητήρια, ξενοδοχεία, σχολεία, δημόσιες υπηρεσίες κλπ). Αντίθετα, σε κατοικίες και μικρά κτίρια υπάρχει ισχυρός «ανταγωνισμός» με το φυσικό αέριο και τις αερόψυκτες αντλίες θερμότητας. Οι τελευταίες είναι σε αναλογία 10 προς 1 σε σχέση με τις γεωθερμικές.

Η χρήση των ΓΑΘ στον αγροτικό τομέα παραμένει σχεδόν μηδενική. Υπάρχει μόνο μία τέτοια, ιδιαίτερα επιτυχημένη, εφαρμογή στη Χρυσούπολη Καβάλας, όπου εδώ και 14 χρόνια η αβαθής γεωθερμία αξιοποιείται για την πρωίμιση σπαραγγιών σε φυτείες συνολικής έκτασης 190 στρεμμάτων.

Σύμφωνα με ενδεικτικά στοιχεία που συλλέχθηκαν από εφαρμογές ΓΑΘ σε κτίρια διαφορετικών χρήσεων (super market, ξενοδοχεία, κατοικίες, δημόσια κτίρια) [15] & [16], μετά από τουλάχιστον 10ετή λειτουργία για θέρμανση, δροσισμό και παροχή ζεστού νερού χρήσης, η ετήσια εξοικονόμηση ξεπερνά το 70% σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα (πετρέλαιο για θέρμανση και μονάδες κλιματισμού -air-condition- για δροσισμό). Ανάλογα με το μέγεθος και το είδος του κτιρίου που βρίσκονται εγκατεστημένες οι ΓΑΘ, η περίοδος απόσβεσης της αρχικής επένδυσης είναι μεταξύ τριών και εννέα ετών. Κάποιες χαρακτηριστικές περιπτώσεις εγκατάστασης συστημάτων ΓΑΘ στην Ελλάδα είναι στο νέο κτίριο της Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας (850 kW), το οποίο όμως δεν λειτουργεί, το δίκτυο τηλεθέρμανσης/τηλεψύξης στη Νέα Ιωνία Αττικής (1350 kW), η αντιπαγετική προστασία των πεζοδρομίων στο κέντρο του Καρπενησίου, η θέρμανση και ο δροσισμός ενός οινοποιείου στην Πελοπόννησο, και το βιοκλιματικό κτίριο του ΚΑΠΕ στην Αττική [4].

Πίνακας 3: Αξιοποίηση της γεωθερμίας στην Ελλάδα (Δεκέμβριος 2020)

Χρήση	**Εγκατεστημένη Ισχύς (MW)**
Ηλεκτροπαραγωγή	**0**
Λουτροθεραπεία	43
Θέρμανση θερμοκηπίων	37,83
Θέρμανση εδάφους	4,5
Θέρμανση χώρων (εκτός ΓΑΘ)	1,75
Ξήρανση/Αφυδάτωση	0,3
Υδατοκαλλιέργειες	0,75
Αβαθής γεωθερμία (ΓΑΘ)	**175**
ΣΥΝΟΛΟ	**263,43**

4. ΥΠΟ ΕΞΕΛΙΞΗ ΕΡΓΑ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ

Εκτός από το πρόγραμμα γεωθερμικής ηλεκτροπαραγωγής από τη ΔΕΗ και την τηλεθέρμανση στο Αρίστηνο Έβρου που αναλύθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, τα δύο πιο σημαντικά υπό εξέλιξη έργα αξιοποίησης της γεωθερμίας αφορούν τις κάτωθι περιοχές:

Γεωθερμικό πεδίο Ακροποτάμου : Ο Δήμος Παγγαίου έχει αποκτήσει τα δικαιώματα εκμετάλλευσης και διαχείρισης του πεδίου και σχεδιάζει να επενδύσει περίπου 10 εκατ. ευρώ για δίκτυα τηλεθέρμανσης και την διανομή θερμικής ενέργειας σε ημι-αστικές περιοχές, θερμοκήπια και εγκαταστάσεις spa. Το έργο βρίσκεται ακόμη σε πρώιμη φάση εκπόνησης μελετών κλπ.

Γεωθερμικό πεδίο Λιθότοπου: Τα δικαιώματα έρευνας του πεδίου έχουν μισθωθεί στο Δήμο Ηράκλειας. Η γεωθερμική έρευνα που είχε ανατεθεί στην ΕΑΓΜΕ ολοκληρώθηκε πρόσφατα και είχε σχετικά καλά αποτελέσματα. Ο Δήμος έχει αποφασίσει να αξιοποιήσει τη γεωθερμία στην περιοχή και είναι σε φάση υποβολής των μελετών σκοπιμότητας για την ανάπτυξη του πεδίου, ώστε να αποκτήσει και το δικαίωμα εκμετάλλευσης και διαχείρισης του γεωθερμικού δυναμικού.

5. ΘΕΣΜΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

Τα τελευταία χρόνια, η αναμόρφωση του ενεργειακού τομέα αποτέλεσε εθνική στρατηγική για τη χώρα μας. Μεταξύ άλλων, περιελάμβανε την προώθηση των ΑΠΕ μέσω της υιοθέτησης οικονομικών κινήτρων για χρήση τους, την ίδρυση των Ενεργειακών Κοινοτήτων, τη θέσπιση εναλλακτικών τρόπων χρηματοδότησης της επιχειρηματικότητας (π.χ. μέσω της συμμετοχικής χρηματοδότησης) αλλά και την εφαρμογή νέου θεσμικού πλαισίου για την έρευνα και αξιοποίηση του γεωθερμικού δυναμικού. Είναι ίσως αρκετά πρώιμο να κριθεί η αποτελεσματικότητα όλων αυτών των νομικών παρεμβάσεων, όμως γενικά μπορεί να θεωρηθεί ότι έγιναν κάποια βασικά βήματα για τον εκσυγχρονισμό των κανόνων που διέπουν την εκμετάλλευση της γεωθερμίας στη χώρα μας.

Τον Μάρτιο του 2019 τέθηκε σε ισχύ ο νέος νόμος-πλαίσιο για τη γεωθερμία (Ν.4602/2019 «Έρευνα, Αξιοποίηση και Διαχείριση του γεωθερμικού δυναμικού της χώρας»). Οι διαδικασίες και οι όροι μίσθωσης και οι λοιπές διατάξεις καθορίζονται από μια σειρά ΚΥΑ που αναμένεται να δημοσιευτούν σύντομα. Οι σημαντικότερες αλλαγές που περιλαμβάνονται στη νέα νομοθεσία, συνοψίζονται ως εξής:

- Η κατώτερη θερμοκρασία χαρακτηρισμού του δυναμικού ως γεωθερμικό είναι 30°C, αντί των 25°C που ήταν με τον προηγούμενο νόμο.
- Τα γεωθερμικά πεδία ταξινομούνται πλέον ως «τοπικού» και «εθνικού» ενδιαφέροντος, για θερμοκρασίες 30-90°C και >90°C, αντίστοιχα.
- Εισάγεται η έννοια της «περιοχής γεωθερμικού ενδιαφέροντος».
- Γίνεται διαχωρισμός μεταξύ δικαιωμάτων εκμετάλλευσης και διαχείρισης ενός γεωθερμικού πεδίου.
- Αυξήθηκε η μέγιστη διάρκεια των δικαιωμάτων εκμετάλλευσης ή εκμετάλλευσης και διαχείρισης από 35 σε 50 έτη.
- Η παραγωγή θερμικής ή ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να ξεκινήσει πιλοτικά ακόμη και κατά την περίοδο έρευνας.

Μια ακόμη σημαντική εξέλιξη στον τομέα της παραγωγής ενέργειας στην Ελλάδα, που σαφώς επηρεάζει και την ανάπτυξη της γεωθερμίας, είναι ο Νόμος 4513/2018, ο οποίος εισάγει το θεσμικό πλαίσιο ίδρυσης και λειτουργίας των Ενεργειακών Κοινοτήτων στην Ελλάδα. Σκοπός των Ενεργειακών Κοινοτήτων, είναι η προώθηση της κοινωνικής και αλληλέγγυας οικονομίας και καινοτομίας στον ενεργειακό τομέα, η αντιμετώπιση της ενεργειακής ένδειας, η προώθηση της αειφορίας κλπ, με τελικό στόχο της προώθηση της ενεργού συμμετοχής των πολιτών, της τοπικής αυτοδιοίκησης και μικρών επιχειρήσεων στην παραγωγή ενέργειας.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας παρουσιάζει αυξητική τάση παγκοσμίως, με όλο και περισσότερες χώρες να αξιοποιούν τους γεωθερμικούς τους πόρους. Η γεωθερμική ηλεκτροπαραγωγή αυξήθηκε σημαντικά (~30%) σε σχέση με το 2015, αλλά ο αριθμός των χωρών που την εφαρμόζουν εξακολουθεί να είναι μικρός. Η αύξηση που καταγράφεται συνδέεται άμεσα με τη διεθνή τάση για μεγαλύτερη συμμετοχή των ΑΠΕ στα ενεργειακά ισοζύγια των κρατών, αλλά και με την ανάπτυξη ευνοϊκότερων θεσμικών πλαισίων και τη θέσπιση οικονομικών κινήτρων για την ανάπτυξη της γεωθερμίας. Παρόλα αυτά, οι ρυθμοί ανάπτυξης προβλέπεται να μειωθούν τα επόμενα χρόνια, κάτι που οφείλεται κυρίως στον ισχυρό ανταγωνισμό από άλλες ΑΠΕ (π.χ. ηλιακή και αιολική ενέργεια) και από το φυσικό αέριο, εξαιτίας του μικρότερου μεταλλευτικού ρίσκου που εμπεριέχουν, της συντομότερης περιόδου απόσβεσης της αρχικής επένδυσης και του χαμηλότερου κόστους της παραγόμενης kWh.

Σημαντική αξιοποίηση της γεωθερμίας σε άμεσες χρήσεις γίνεται στην Κίνα, στις ΗΠΑ, στη Σουηδία, στην Τουρκία, στην Ιαπωνία, στη Γαλλία, στη Γερμανία, στην Ισλανδία και στον Καναδά. Στις περισσότερες από τις υπόλοιπες χώρες, η ανάπτυξη του τομέα αυτού γίνεται με αργό ρυθμό, λόγω κυρίως του υψηλού επενδυτικού κόστους και του ανταγωνισμού με τα ορυκτά καύσιμα.

Στην Ελλάδα, η κατάσταση τα τελευταία χρόνια είναι σχετικά στάσιμη. Η αξιοποίηση της γεωθερμίας παραμένει πολύ μικρή σε σχέση με το επιβεβαιωμένο δυναμικό της χώρας και ο μόνος τομέας που παρουσιάζει θετική εξέλιξη είναι η χρήση των ΓΑΘ. Παρά τις σημαντικές επενδύσεις, την αναμόρφωση του ενεργειακού τομέα και τον εκσυγχρονισμό του θερμικού πλαισίου, προς το παρόν η γεωθερμία παραμένει η λιγότερο ανεπτυγμένη και η λιγότερο γνωστή ΑΠΕ στην Ελλάδα. Ανάμεσα στις πρωτοβουλίες που πρέπει να ληφθούν, κυρίως από το κράτος, για την προώθηση της γεωθερμίας (π.χ. πραγματική πολιτική βούληση, επενδύσεις κλπ), ιδιαίτερη έμφαση θα πρέπει να δοθεί σε

οικονομικά κίνητρα με παράλληλη κάλυψη του γεωλογικού ρίσκου, καθώς και στην ενημέρωση των πολιτών για θετικές συνέπειες από την αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας. Η κοινωνική αντίληψη, ιδιαίτερα σε κάποιες περιοχές, είναι ιδιαίτερα προβληματική, γι αυτό, και αν υπάρχει πραγματικός σχεδιασμός για επίτευξη ή και υπέρβαση των στόχων που έθεσε η ίδια η πολιτεία, ο δημόσιος διάλογος είναι απαραίτητος ώστε να καταρριφθούν οι μύθοι και να διορθωθούν οι στρεβλώσεις που έχουν δημιουργεί εδώ και πολλές δεκαετίας και αποδυνάμωσαν την μακροπρόθεσμη συνεισφορά της γεωθερμίας στο ενεργειακό ισοζύγιο της χώρας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Huttrer, G., 2020, “Geothermal Power Generation in the World 2015-2020 Update Report”, Proc. World Geothermal Congress 2020, Reykjavik, Iceland.

[2] Lund, J., and Toth, A., 2020, “Direct Utilization of Geothermal Energy 2020 Worldwide Review”, Proc. World Geothermal Congress 2020, Reykjavik, Iceland

[3] NREAP: Ministry of Environment Energy & Climate Change: National Renewable Energy Action Plan in the Scope of the Directive 2009/28/EC (2010), pp. 112, available at http://ec.europa.eu/energy/renewables/action_plan_en.htm

[4] Papachristou, M., Dalampakis, P., Arvanitis, A., Mendrinos, D., Andritsos, N., 2020, “Geothermal developments in Greece-Country Update 2015-2020”, Proc. World Geothermal Congress 2020, Reykjavik, Iceland

[5] Andritsos, N., Dalambakis, P., Arvanitis, A., Papachristou, M., Fytikas, M., 2015, “Geothermal developments in Greece-Country Update 2010-2014”, Proc. World Geothermal Congress 2015, Australia

[6] Darma, S., Imani, Y. L., Shidqi, N. A., Dwikorianto, T., and Daud, Y., 2020, “Country Update: the Fast Growth of Geothermal Energy Development in Indonesia”, Proc. World Geothermal Congress 2020, Reykjavik, Iceland.

[7] Mertoglu, O., Simsek, S., and Basarir, N., 2020, “Geothermal Energy Use – Projections, Country Update for Turkey, Proc. World Geothermal Congress 2020, Reykjavik, Iceland.

[8] Kaya, T., 2020, “An overview on Geothermal Power in Turkey, 2020”, GRC 2020 Virtual Annual Meeting & Expo, October 18-23, 2020 (available on demand at: https://grc2020.mygeoenergynow.org)

[9] European Geothermal Energy Council, 2020, “Geothermal Market Report 2019” available at www.egec.com

[10] Zarrouk, S., MacLean, K., 2019, “Geothermal Systems”, in Geothermal Well Test Analysis, Academic Press, Elsevier Inc., pp. 13-38, Chap. 2

11] Baria, R., Baumgärtner, J., Gérard, A., Jung, R., Garnish, J. (1991), “European HDR research programme at Soultz-sous-Forêts (France) 1987–1996”, *Geothermics*, 28, 4–5, pp. 655-669.

[12] Mouchot, J., Genter, A., Cuenot, N., Scheiber, J., Seibel, O., Bosia, C., Ravier, G., (2018), “First Year of Operation from EGS geothermal Plants in Alsace, France: Scaling Issues”, Proc., 43rd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, February 12-14.

[13] Buijze, L., van Bijsterveldt, L., Cremer H., Paap B., Veldkamp, H., Wassing, BBT., van Wees, J-D., van Yperen GCN., ter Heege. J., 2019, “Review of induced seismicity in geothermal systems worldwide and implications for geothermal systems in the Netherlands”, Netherlands Journal of Geosciences, Vol. 98, e13, Cambridge University Press, https://doi.org/10.1017/njg.2019.6

[14] Δαλαμπάκης, Π., Παπαχρήστου, Μ., Κολιός, Π., Αρβανίτης, Α., Κολιός, Ν., 2015, “Αξιοποίηση των γεωθερμικών ρευστών στο Νέο Εράσμιο Ξάνθης”, Πρακτικά 9ου Πανελλήνιου Συνεδρίου Γεωργικής Μηχανικής, Θεσσαλονίκη, 8-9 Οκτωβρίου 2015

[15] Σαββίδης, Θ., 2018, “Αξιοποίηση της αβαθούς γεωθερμίας με τη χρήση ΓΑΘ-Παραδείγματα από τη Βόρεια και Δυτική Ελλάδα”, Πτυχιακή Εργασία, Τμήμα Γεωλογίας ΑΠΘ.

[16] Πλατιόπουλος, Α., 2020, “Γεωθερμικές Αντλίες Θερμότητας-Παραδείγματα από τη Βόρεια Ελλάδα”, Πτυχιακή Εργασία, Τμήμα Γεωλογίας ΑΠΘ.

ΝΕΑ ΠΟΙΟΤΙΚΑ ΚΑΙ ΠΟΣΟΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΩΝ Γ/Θ ΡΕΥΣΤΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΑΚΡΟΠΟΤΑΜΟΥ.

Π. Δαλαμπάκης[1] , Η. Κουφογιάννης[2], Μ. Παπαχρήστου[3], Ν. Ανδρίτσος[4], Α. Αρβανίτης[2], Κ. Λυμπερόπουλος[5], Π. Κολιός[6]

[1]Ινστιτούτο Εδαφοϋδατικών Πόρων, ΕΛΓΟ ΔΗΜΗΤΡΑ, Σίνδος
[2] Ελληνική Αρχή Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, Αθήνα
[3]Τμήμα Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη
[4]Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος
[5]Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης, ΔΠΘ, Ξάνθη
6Γεωθερμική Ελλάδος ΙΚΕ, Νέο Εράσμιο, Ξάνθη
e-mail: p.dalampakis@swri.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η γεωθερμική περιοχή του Ακροποτάμου βρίσκεται στο ΝΑ περιθώριο της λεκάνης του ποταμού Στρυμόνα, η οποία αποτελεί ένα τυπικό μετα-ορογενετικό βύθισμα. Σύμφωνα με τα δεδομένα της γεωτρητικής έρευνας του ΙΓΜΕ κατά την περίοδο 2002-2003 αποτυπώθηκε η παρουσία ενός κυρίαρχου γεωθερμικού συστήματος με θερμοκρασίες 80-90°C.

Με τις συστηματικές δοκιμές παραγωγής στις γεωτρήσεις ΑΚΡ-1 και ΑΚΡ-3 αποτυπώθηκε το πλούσιο γεωθερμικό δυναμικό του κατώτερου και πλέον θερμού συστήματος. Οι δοκιμές έγιναν με ελεύθερη ροή λόγω του έντονου αρτεσιανισμού, ο οποίος αποδίδεται στην παρουσία μεγάλων ποσοτήτων CO_2 εν διαλύσει και τις υψηλές θερμοκρασίες χωρίς να γνωρίζουμε τη συμμετοχή ή μη της παραμέτρου του υδραυλικού φορτίου. Οι γεωτρήσεις αποδίδουν, σε συνθήκες ελεγχόμενου περιορισμού της πίεσης στις κεφαλές (1-1,3 bar), 230 και 130 m^3/h αντίστοιχα, οι οποίες θεωρούνται ως οι ελάχιστες αξιοποιήσιμες. Κύριο χαρακτηριστικό της παραγωγικής διαδικασίας γ/θ ρευστών σε συνθήκες ελεύθερης ροής είναι η έντονα τάση σχηματισμού ανθρακικών επικαθίσεων. Οι κρυσταλλικές φάσεις που κυριαρχούν είναι τα πολύμορφα του $CaCO_3$ ασβεστίτης και αραγωνίτης σε ποσοστό έως 98%, ενώ καταγράφεται μικρή παρουσία διοξειδίου του πυριτίου (SiO_2), αργιλικών ορυκτών και οξειδίων του σιδήρου.

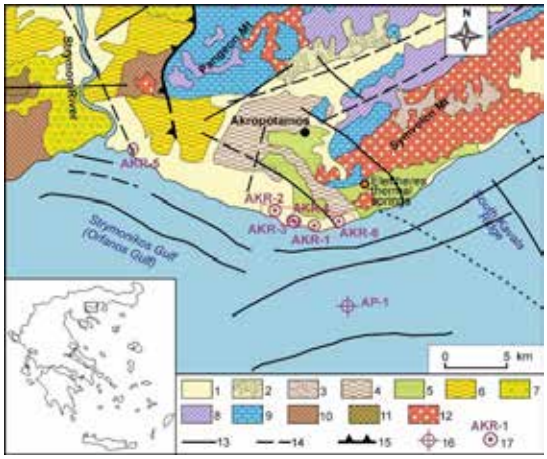
Η ποσοτική ανάλυση της αέριας φάσης έγινε στις γεωτρήσεις ΑΚΡ-1 και ΑΚΡ-3 με κινητό σύστημα διαχωρισμού των φάσεων. Κύριο συστατικό είναι το CO_2 σε ποσοστό 99,5%. Η περιεκτικότητα του CO_2 στην ΑΚΡ-1 ανέρχεται σε 5,0 kg/m^3 νερού, περιεκτικότητα που είναι η μεγαλύτερη που έχει καταγραφεί στη Βόρεια Ελλάδα. Η αντίστοιχη περιεκτικότητα στη γεώτρηση ΑΚΡ-3 ανέρχεται σε 1,7 kg/m^3 νερού.

Η διαχείριση των ρευστών του γεωθερμικού πεδίου Ακροποτάμου και ιδιαίτερα η αντιμετώπιση του σοβαρού προβλήματος των ανθρακικών επικαθίσεων απαιτεί την εξεύρεση βιώσιμης και λειτουργικής λύσης αποφυγής διαχωρισμού της αέριας φάσης με τη χρήση αντλητικών συγκροτημάτων εντός των γεωτρήσεων ή με τη χρήση χημικών προσθέτων. Ο τρόπος αξιοποίησης και διαχείρισης πρέπει να λαμβάνει υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της κάθε γεώτρησης και η τελική επιλογή οφείλει να βασίζεται στο μικρότερο δυνατό κόστος λειτουργίας και επιβάρυνσης των διατάξεων άντλησης-εναλλαγής και επανεισαγωγής.

Λέξεις Κλειδιά: γεωθερμικό πεδίο Ακροποτάμου, δοκιμές παραγωγής, διαχωρισμός και ανάλυση αέριας φάσης, αναλύσεις γεωθερμικών ρευστών, δημιουργία επικαθίσεων

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το γεωθερμικό πεδίο Ακροποτάμου αναπτύσσεται στην ανατολική παράκτια ζώνη του Στρυμωνικού Κόλπου στο Νομό Καβάλας. Πρόκειται για το πλέον πρόσφατα ερευνημένο και βεβαιωμένο πεδίο τοπικού ενδιαφέροντος. Η έρευνα διαξήχθη από το ΙΓΜΕ την περίοδο 2000-2006 και περιέλαβε, μεταξύ άλλων, την κατασκευή έξι (6) νέων γεωτρήσεων έρευνας-παραγωγής σε βάθη 185-545 μ. Οι γεωτρήσεις ορύχθηκαν όλες πλησίον της ακτογραμμής σε γραμμική διάταξη μήκους 17 χιλ. και οριοθετούν ερευνητικά την παρόχθια ζώνη 3 χιλ. ανατολικά του Δέλτα του ποταμού Στρυμώνα και 2 χιλ. δυτικά των εκβολών του χειμάρου Μαρμαρά στο ύψος των θερμών πηγών Ελευθερών (Εικόνα 1). Στη φάση ανάπτυξης των γεωτρήσεων διαπιστώθηκε, σε δύο από αυτές, αρτεσιανή ροή με μεγάλες παροχές θερμού νερού και έντονη παρουσία αερίων. Η κύρια συστατική φάση των αερίων αποτελείται από CO_2 σε ποσοστό >99%. Μετά το πέρας των ερευνητικών εργασιών του ΙΓΜΕ βεβαιώθηκε ο αποκλειστικός γεωθερμικός χώρος (exclusive area) συνολικής έκτασης 6.9 km^2, βάθος ταμιευτήρων έως 515 μ. και θερμοκρασία ρευστών από 45°C έως 90°C. Για το γεωθερμικό πεδίο Ακροποτάμου έχει εκπονηθεί περιορισμένος αριθμός επιστημονικών εργασιών και μελετών [1], [2], [3], [4], [5], οι οποίες όμως αποτελούν μια αρκετά συνεκτική βάση για την προσέγγιση των θερμοδυναμικών και υδραυλικών χαρακτηριστικών του γεωθερμικού συστήματος, των ποιοτικών και ποσοτικών χαρακτηριστικών της αέριας φάσης, της έντονα αποθετικής τάσης ανθρακικών αλάτων των ρευστών και της ποιοτικής εκτίμησης αυτών.



Εικόνα 1: Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης περιοχής Ακροποτάμου με τις θέσεις των γεωτρήσεων της γεωθερμικής έρευνας του ΙΓΜΕ [2]

Το 2018 η Δημοτική Επιχείρηση Ύδρευσης Αποχέτευσης Άρδευσης Παγγαίου (Δ.Ε.Υ.Α.Α. ΠΑΓΓΑΙΟΥ) μίσθωσε το δικαίωμα διαχείρισης του γ/θ πεδίου. Στο πλαίσιο αυτό υλοποιήθηκαν ερευνητικές εργασίες εκτίμησης και αξιολόγησης των παραμέτρων εκμετάλλευσης του πεδίου [4], έρευνα ποιοτικής αξιολόγησης και σχεδιασμός βέλτιστης διαχείρισης των γ/θ ρευστών [5]. Στη βάση όλων αυτών έχει εκπονηθεί μία ολοκληρωμένη τεχνικο-οικονομική μελέτη εφαρμογής για την πρώτη φάση αξιοποίησης των γεωθερμικών ρευστών, η οποία περιλαμβάνει κατασκευή νέων γεωτρήσεων παραγωγής-επανεισαγωγής, σταθμών θερμοεναλλαγής και συστήματα μεταφοράς και διανομής θερμικής ενέργειας σε διατάξεις αστικής και αγροτικής τηλεθέρμανσης στη βάση ενός ενιαίου διαχειριστικού μοντέλου.

Κατά τη διενέργεια των συστηματικών δοκιμών παραγωγής και τις αντλήσεις διαπιστώθηκε ότι μόνο τρεις από τις πέντε μισθωμένες γεωτρήσεις (ΑΚΡ1, ΑΚΡ3 & ΑΚΡ4) παρέχουν τη δυνατότητα παρατηρήσεων και μετρήσεων ποιοτικών και ποσοτικών χαρακτηριστικών των ρευστών. Οι ποσοτικές

μετρήσεις στις γεωτρήσεις οριοθετούνται αναγκαστικά από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά τους (τηλεσκοπική παραγωγική σωλήνωση, μικρή τελική διάμετρος, παραγωγικοί σχηματισμοί μερικώς διατρηθέντες κ.ά.). Σύμφωνα με τις πλέον πρόσφατες ερευνητικές εργασίες επιβεβαιώνονται οι θερμοκρασίες των ρευστών ως ακολούθως: 48°C για το ανώτερο υδροφόρο σύστημα, 84°C για το άνω τμήμα του κατώτερου συστήματος εντός ασβεστολιθικών κροκαλοπαγών, και 90,0°C για το κατώτερο τμήμα του κατώτερου συστήματος εντός αμμούχων ψαμμιτών. Επιβεβαιώθηκε η παρουσία σημαντικών ποσοτήτων διαχωριζόμενης αέριας φάσης και η έντονα αποθετική τάση στερεού υπολείμματος με τη μορφή ανθρακικών αλάτων, είτε πέριξ των αγωγών εκροής είτε στα σημεία απόρριψης των ρευστών.

Το ανώτερο υδραυλικό σύστημα δεν παρουσιάζει αρτεσιανισμό. Η μοναδική μη αρτεσιανή γεώτρηση, η οποία παρήχε εγγυήσεις ικανής υδροφορίας και αντλήθηκε συστηματικά είναι η ΑΚΡ4. Οι γεωτρήσεις ΑΚΡ2 και ΑΚΡ6 έδωσαν αποτελέσματα μη αξιοποιήσιμα, είτε λόγω έμφραξης της παραγωγικής σωλήνωσης, είτε λόγω κατασκευαστικών αστοχιών.

Η ποιοτική προσέγγιση της υγρής φάσης των ρευστών έγινε με πλήρεις χημικές αναλύσεις και των επικαθίσεων με χημικές αναλύσεις ξηρού υπολείμματος και με τη μέθοδο περίθλασης ακτίνων Χ (XRD). Η ποιοτική και ποσοτική εκτίμηση της αέριας φάσης έγινε μετά από διαχωρισμό της μέσω κινητής διάταξης διαχωρισμού. Οι μετρήσεις παροχής της αέριας φάσης διεξήχθησαν επί τόπου με χρήση βαθμονομημένων ροταμέτρων και οι χημικές αναλύσεις με αέρια χρωματογραφία.

2. ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΕΣ ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ

Με βάση τα αποτελέσματα της συστηματικής και λεπτομερούς γεωθερμικής έρευνας που υλοποίησε το ΙΓΜΕ την περίοδο 2002-2003, σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν 6 γεωθερμικές γεωτρήσεις έρευνας-παραγωγής. Οι πέντε από αυτές βρίσκονται εντός της αποκλειστικής γεωθερμικής περιοχής (βεβαιωμένου γ/θ πεδίο τοπικού ενδιαφέροντος) και αποτυπώνονται στην εικόνα 1.

Πίνακας 1: Ποσοτικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά γεωθερμικών γεωτρήσεων στην περιοχή Ακροποτάμου (Πηγή: Ι.Γ.Μ.Ε., 2006 [1]; ΕΛΓΟ ΔΗΜΗΤΡΑ., 2018 [4])

Γεώτρηση	Θέση (ΕΓΣΑ '87)	Βάθος (m)	Βάθος Οροφής Ταμιευτήρα (m)	T (°C)	Παροχή (m^3/h)	Χημισμός
ΑΚΡ-1	X=504423 Ψ=4507391	275	240	84	230 (αρτ)	Na-Cl
ΑΚΡ-2	X=501353 Ψ=4508475	420	300	46	<15 (αντ)	Na-HCO_3-Cl
ΑΚΡ-3	X=502858 Ψ=4507783	515	450-480	90	130 (αρτ)(*)	Na-Cl
ΑΚΡ-4	X=502862 Ψ=4507796	180	120-130	47	55 (αντ)	Na-Cl
ΑΚΡ-6	X=506291 Ψ=4507527	545	500-520	38	Αδυναμία Άντλησης	Na-Cl

αρτ: Αρτεσιανισμός παρουσία CO_2, αντ: Άντληση, (*) Παροχή με στραγγαλισμό της κεφαλής και πίεση εκροής 0,5 bar. Με ελεύθερη ροή (πίεση 1,1 bar) η παροχή μετρήθηκε 160 m^3/h.

Τα κύρια χαρακτηριστικά των γεωτρήσεων αναφέρονται στον Πίνακα 1, όπως αποτυπώθηκαν στην έκθεση του ΙΓΜΕ [1] και τροποποιήθηκαν ως προς τις μέγιστες θερμοκρασίες και παροχές από τις δοκιμές παραγωγής που εκτέλεσε ο ΕΛΓΟ ΔΗΜΗΤΡΑ [4]. Από τις γεωτρήσεις ΑΚΡ2 και ΑΚΡ6 στάθηκε αδύνατον να ληφθούν αξιόπιστα αποτελέσματα διότι και οι δύο παρουσιάζουν κατασκευαστικές αστοχίες. Μοναδική αξιόπιστη μέτρηση λαμβάνεται μόνο η θερμοκρασία του νερού

στη γεώτρηση ΑΚΡ2. Η θερμοκρασία των 38°C, η οποία αναφέρεται στη γεώτρηση ΑΚΡ6 είναι μέτρηση σε βάθος 360 μ. Με δεδομένη τη μορφή του θερμοκρασιακού προφίλ της γεώτρησης είναι πολύ πιθανόν η θερμοκρασία στον πυθμένα της γεώτρησης να είναι αρκετά μεγαλύτερη.

Οι στρωματογραφικές τομές, θερμοκρασιακά προφίλ και κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των γεωτρήσεων περιγράφονται λεπτομερώς στις εργασίες που αναφέρονται στην Εισαγωγή.

3. ΥΔΡΑΥΛΙΚΑ – ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ - ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Στην περίπτωση της γεώτρησης ΑΚΡ4, η οποία είναι η μοναδική που παρείχε εγγυήσεις ορθής εφαρμογής των πρωτοκόλλων μιας δοκιμαστικής άντλησης με χρήση υποβρύχιου αντλητικού συγκροτήματος, εκτελέσθηκαν δοκιμές μεταβαλλόμενης βαθμίδας, δοκιμές σταθερής παροχής και μετρήσεις επαναφοράς της στάθμης. Για την ανάλυση και επεξεργασία των δεδομένων των αντλήσεων χρησιμοποιήθηκαν οι απλοποιημένες μαθηματικές εκφράσεις της μεθόδου Theis για τον υπολογισμό της μεταβιβαστικότητας, όπως προσαρμόστηκαν από τους Cooper & Jacob, αλλά και τη μέθοδο που προτάθηκε από τους Papadopoulos & Cooper και την αντίστοιχη μέθοδο υπολογισμού κατά Theis από τις μετρήσεις επαναφοράς της στάθμης των γεωτρήσεων (Theis recovery method).

Στην περίπτωση των γεωτρήσεων ΑΚΡ1 και ΑΚΡ3 δεν κατέστη τεχνικά δυνατόν να γίνουν αντίστοιχες δοκιμές εξαιτίας του έντονου αρτεσιανισμού, των πολύ μεγάλων παροχών, των υψηλών θερμοκρασιών και της ταχείας επικάθισης αλάτων στις βάνες ελέγχου των γεωτρήσεων. Οι δοκιμές παραγωγής διενεργήθηκαν είτε με ελεύθερη ροή (περίπτωση ΑΚΡ1), είτε με στραγγαλισμό της κεφαλής (περίπτωση ΑΚΡ3) διότι σε καθεστώς ελεύθερης ροής ανέρχονταν με ταχύτητα έως την κεφαλή λιθάρια του υποβάθρου με διάμετρο έως και 5 cm. Για την εκτέλεση συστηματικών μετρήσεων προσαρμόστηκε στις κεφαλές των δύο γεωτρήσεων ειδική διάταξη αποτελούμενη από: τον κύριο αγωγό εκροής, δευτερεύον πλευρικό αγωγό, βάνες ασφαλείας και βάνες ελέγχου και εκτροπής της ροής, μανόμετρο και πλαστική δεξαμενή ογκομέτρησης 1000 lt (Εικόνα 2). Για τις συστηματικές μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν τα ακόλουθα όργανα: Για την παρακολούθηση της στάθμης ηλεκτρικό σταθμήμετρο 150 μ., για τις παροχές της υγρής φάσης στις γεωτρήσεις ΑΑ2 και ΑΑ4 ηλεκτρομαγνητικό παροχόμετρο και επικουρικά παροχόμετρο υπερήχων, για τις θερμοκρασίες ψηφιακό-καταγραφικό θερμόμετρο Pt100, για την αγωγιμότητα και το pH φορητό πολυπαραμετρικό όργανο.

Εικόνα 2: Διάταξη δοκιμής παραγωγής στη γεώτρηση ΑΚΡ1

3.1. Γεώτρηση ΑΚΡ4

Η δοκιμαστική άντληση μεταβαλλόμενης παροχής έγινε σε τέσσερα βήματα διάρκειας 2 ωρών το καθένα με παροχές 30, 40, 50 και 60 m^3/h αντίστοιχα. Η 48 ωρη δοκιμή σταθερής παροχής έγινε με παροχή 55 m^3/h. Κατά τη διαδικασία επαναφοράς της στάθμης διαπιστώνεται υπολειμματική στάθμη περίπου 2 μ., γεγονός που μπορεί να αποδοθεί σε μέτρια υδραυλικά χαρακτηριστικά του ταμιευτήρα, ιδιαίτερα σε ότι αφορά την μεταβιβαστικότητα (transmissivity) ή σε σταδιακή εξάντληση (dewatering) κατά την άντληση τμημάτων του υδροφόρου συστήματος και η συμμετοχή τους στην επαναφόρτιση

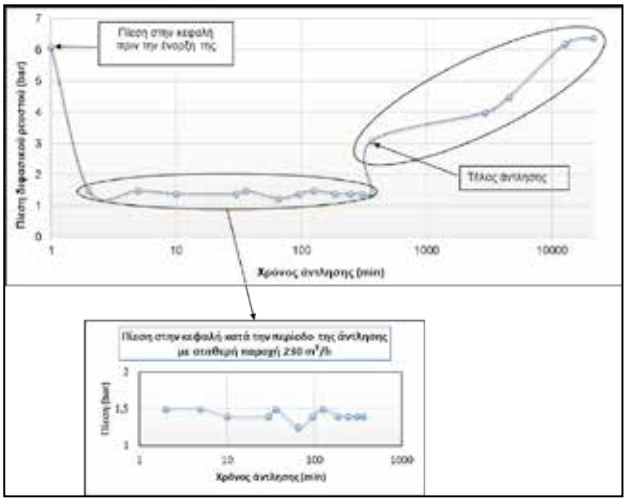
του συστήματος είναι ιδιαίτερα αργή ή δεν έχουν αναπτυχθεί (development) σωστά μετά την κατασκευή της γεώτρησης.

Με βάση τα αποτελέσματα από την εφαρμογή της αναλυτικής μεθόδου κατά Cooper-Jacob, η οποία είναι πλέον αξιόπιστη για την ύστερη περίοδο της αντλητικής διαδικασίας (t>80 min) προκύπτει τιμή μεταβιβαστικότητας (T) ίση με 2,09X10-2 m^2/min, η οποία επαληθεύτηκε και από την γραφική επίλυση της δοκιμής επαναφοράς με τη μέθοδο κατά Theis και συντελεστής αποθηκευτικότητας (S) ίση με 7.54 X 10^{-7}. Οι παραπάνω τιμές των δύο αυτών βασικών υδραυλικών παραμέτρων παραπέμπουν σε ταμιευτήρα με μέτρια έως φτωχά υδραυλικά χαρακτηριστικά.

Σε ότι αφορά την συστηματική παρακολούθηση της θερμοκρασίας και της αγωγιμότητας κατά τη διάρκεια της άντλησης με σταθερή παροχή διαπιστώθηκε σταθερότητα των τιμών με πολύ μικρές αποκλίσεις. Η θερμοκρασία σε διάστημα 30 ωρών παρέμεινε σχεδόν σταθερή στους 47°C, όπως και η ηλεκτρική αγωγιμότητα στα 43 mS/cm. Η σταθερότητα των τιμών αποδίδεται στο γεγονός ότι τα αντλούμενα υδροφόρα στρώματα αποτελούν κατ'ουσία ένα ομογενοποιημένο υδραυλικό σύστημα.

3.2. Γεώτρηση ΑΚΡ1

Η γεώτρηση ΑΚΡ1 ορύχθηκε σε βάθος 275 μ. πλησίον της θάλασσας. Φιλτροσωλήνες τοποθετήθηκαν στα τελευταία 40 μ. μέσα σε ασβεστολιθικά κροκαλοπαγή, τα οποία αποτελούν ένα πολύ σημαντικό γεωθερμικό ταμιευτήρα και φιλοξενούν ρευστά με θερμοκρασία 84-85°C. Η γεώτρηση παρουσιάζει έντονο αρτεσιανισμό (Εικόνα 2) με πολύ μεγάλες παροχές (>200 m^3/h).
Ο αρτεσιανισμός ενεργοποιείται σε δύο διακριτά στάδια. Αρχικά με το άνοιγμα της βάνας παρατηρείται εκροή αερίου με υψηλή ταχύτητα και για διάστημα 5-10''. Στη συνέχεια η ροή γίνεται διφασική. Σε αντίθεση με τη δυναμική κατάσταση εκροής όπου αναπτύσσεται στήλη διφασικού ρευστού, στην κατάσταση μη εκροής ρευστού και μετά το κλείσιμο της γεώτρησης επέρχεται, μετά από σημαντικό χρονικό διάστημα, διαχωρισμός και ισορροπία μεταξύ υγρής και αέριας φάσης. Η στήλη νερού και αερίου μέσα στη γεώτρηση εξισορροπεί την πίεση που δέχεται από το υδραυλικό φορτίο του θερμού ταμιευτήρα.

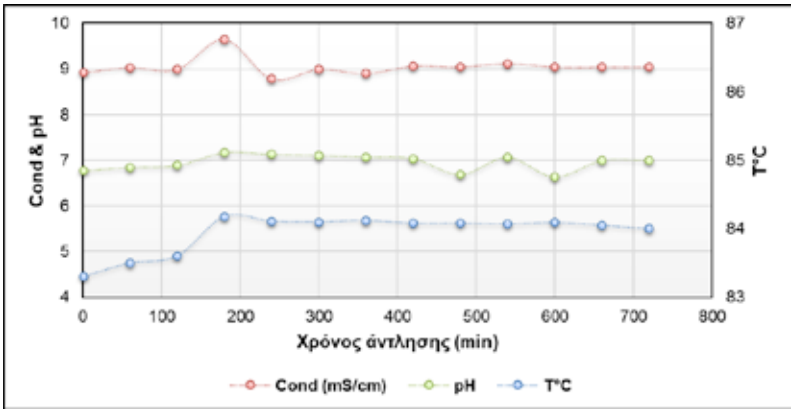


Εικόνα 3. Λογαριθμικό διάγραμμα μεταβολής της πίεσης στην κεφαλή, πριν, κατά τη διάρκεια και μετά την παύση της δοκιμής παραγωγής συναρτήσει του χρόνου

Στο διάγραμμα της Εικόνας 3 αποτυπώνονται οι συστηματικές μετρήσεις της πίεσης που ελήφθησαν στην κεφαλή της γεώτρησης. Πριν την έναρξη της άντλησης η πίεση μετρήθηκε στα 6,1 bar. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής παραγωγής η πίεση παρέμεινε σταθερή στο 1,4 bar γεγονός που αντανακλάται και στη σταθερότητα της παροχής στα 230 m^3/h. Στο τέλος της άντλησης με το κλείσιμο της βάνας η

πίεση αυξήθηκε απότομα στα 3,1 bar. Στη συνέχεια η πίεση αυξήθηκε σταδιακά έως τα 6,4 bar μετά από 15 ημέρες.

Η σταδιακή αύξηση της πίεσης οφείλεται στον διαχωρισμό της αέριας από την υγρή φάση. Η αέρια φάση στο άνω μέρος της στήλης αφενός λειτουργεί ως έμβολο και "πιέζει" την υγρή φάση πιο βαθιά μέσα στη γεώτρηση, αφετέρου μεταφέρει την υδραυλική πίεση που ασκείται από το υδροφόρο και δεν εξισορροπείται από τη στήλη νερού στο μανόμετρο της κεφαλής. Όσο περισσότερο αέριο συγκεντρώνεται στο πάνω μέρος του θαλάμου τόσο υποβιβάζεται η στάθμη του νερού, και μειώνεται το μέρος του φορτίου του υδροφόρου που εξισορροπείται από τη στήλη του νερού, και τόσο αυξάνει η πίεση στην κεφαλή. Στην κεφαλή μετρούμε τη διαφορά μεταξύ του φορτίου του υδροφόρου και της στάθμης του νερού μέσα στη γεώτρηση, η οποία στην περίπτωσή μας είναι άγνωστη.



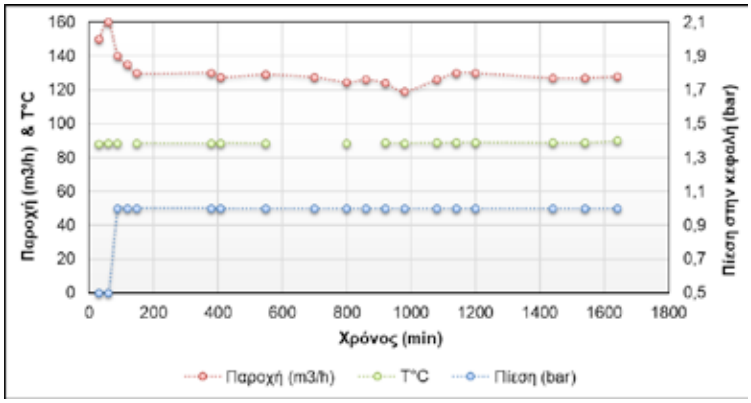
Εικόνα 4. Μεταβολή φυσικοχημικών χαρακτηριστικών με τον χρόνο της δοκιμής παραγωγής

Στην Εικόνα 4 αποτυπώνονται οι μεταβολές της θερμοκρασίας, της αγωγιμότητας και του pH σε συνάρτηση με τον χρόνο της δοκιμής παραγωγής (άντλησης). Η αγωγιμότητα και η θερμοκρασία σταθεροποιούνται, μετά από 12 περίπου ώρες, σε τιμές 9,0 mS/cm και 84°C αντίστοιχα. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η συμπεριφορά του pH. Στην πρώτη περίοδο άντλησης το pH ακολουθεί αυξητική τάση από 7,01 έως 7,56. Αντίστοιχη συμπεριφορά διαπιστώνεται και στην αρχική φάση της δεύτερης περιόδου άντλησης. Στο αρχικό στάδιο των αντλήσεων διαπιστώνουμε σταδιακή, έστω και μικρή, αύξηση της θερμοκρασίας. Η διαλυτότητα του CO_2 μειώνεται σταδιακά. Το γεγονός αυτό αντανακλάται στο pH, του οποίου η τιμή διαμορφώνεται από την ποσότητα του CO_2 που βρίσκεται εν διαλύσει μέσα στην υγρή φάση. Η σταδιακή αύξηση της ποσότητας του περιεχόμενου CO_2 που απελευθερώνεται οδηγεί σε σταδιακή αύξηση του pH του ρευστού.
Ο μηχανισμός που μπορεί να αιτιολογήσει την αυξητική τάση απελευθέρωσης του CO_2 είναι πιθανά και η σταδιακή μετατόπιση σε μεγαλύτερο βάθος εντός της γεώτρησης του σημείου, πάνω από το οποίο ξεκινά η μετατροπή, της κατά 100% μονοφασικής σε διφασική ροή και ξεκινάει ο διαχωρισμός της αέριας από την υγρή φάση, γνωστό ως σημείο φυσαλίδας «bubble point». Η μετατόπιση του σημείου φυσαλίδας προς τα κάτω μέσα στη γεώτρηση κατά το αρχικό στάδιο μπορεί να οφείλεται στη σταδιακή μείωση της υδροστατικής πίεσης εντός της γεώτρησης. Το παραπάνω οδηγεί σε σταδιακή αύξηση των ποσοτήτων CO_2 που απελευθερώνονται από το γεωθερμικό ρευστό εντός της γεώτρησης.

3.3. Γεώτρηση ΑΚΡ3

Η γεώτρηση ΑΚΡ3 ορύχθηκε σε βάθος 515 μ. πλησίον της ακτογραμμής. Διατρήθηκαν άμμοι, άργιλοι, ψαμμίτες και κροκαλοπαγή. Στο διάστημα 480-515 μ. εντοπίστηκε παραγωγικός σχηματισμός αποτελούμενος από αμμούχους ψαμμίτες, ο οποίος φιλοξενεί γεωθερμικά ρευστά με θερμοκρασία 90°C. Παρουσιάζει έντονο αρτεσιανισμό ο οποίος, σε αντίθεση με αυτόν της γεώτρησης ΑΚΡ1, ενεργοποιείται σταδιακά και φτάνει σε πλήρη ροή μετά από 60 λεπτά από το άνοιγμα της κεφαλής και

η θερμοκρασία λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της μετά από 24 ώρες συνεχούς ροής. Η σταδιακή, έστω και με αργό ρυθμό, αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε σταδιακή μείωση της διαλυτότητας του CO_2 με συνέπεια τη σταδιακή απελευθέρωση μεγαλύτερων ποσοτήτων αέριας φάσης, γεγονός που αντανακλάται στην αύξηση έντασης του αρτεσιανισμού.



Εικόνα 5: Μεταβολή φυσικοχημικών παραμέτρων με τον χρόνο της δοκιμής παραγωγής

Από το διάγραμμα της Εικόνας 5 διαπιστώνεται ότι η παροχή, σε καθεστώς στραγγαλισμού, παρέμεινε σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια της άντλησης στα 130 m^3/h και η πίεση στην κεφαλή στα 0,5 bar. Στην αρχική φάση και σε καθεστώς ελεύθερης ροής η παροχή μετρήθηκε στα 160 m^3/h. Η θερμοκρασία του ρευστού ακολούθησε αυξητική πορεία από τους 88°C έως τους 90°C, τιμή η οποία επετεύχθη στο τέλος της 24ωρης άντλησης. Η αγωγιμότητα του ρευστού παρέμεινε σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια της άντλησης με τιμές από 4,3 mS/cm έως και 4,5 mS/cm. Το pH δεν έγινε δυνατόν να μετρηθεί επί τόπου λόγω δυσλειτουργίας του οργάνου.

4. ΑΕΡΙΑ ΦΑΣΗ – ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ – ΜΕΤΡΗΣΗ ΠΑΡΟΧΗΣ

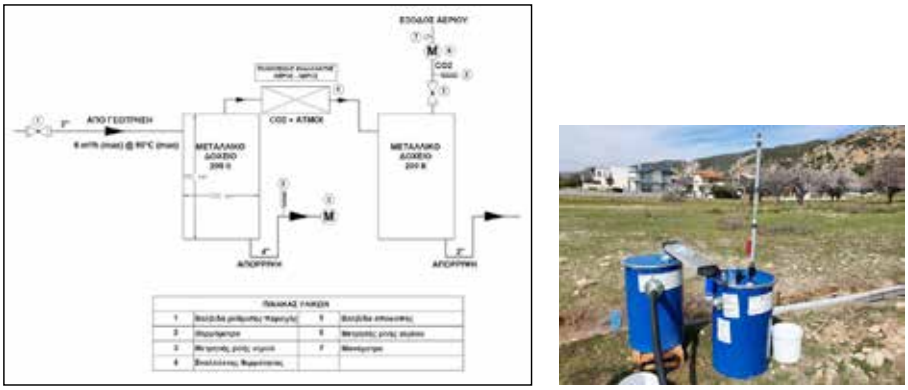
4.1. Αέρια φάση – Γενικά

Σε κάθε φάση αξιοποίησης ενός γ/θ πεδίου με διφασικό ρευστό είναι αναγκαία η γνώση των παροχών των διαχωριζόμενων φάσεων διότι: (α) αποτελούν βασικό συστατικό της εκτίμησης της τάσης των ρευστών για σχηματισμό επικαθίσεων (scaling) και της τάσης για διάβρωση των μεταλλικών επιφανειών (corrosion) και συνακόλουθα της επιλογής των μεθόδων αντιμετώπισης αυτών, (β) είναι απαραίτητα δεδομένα εκτίμησης της πίεσης του σημείου φυσαλίδας (bubble point), το βάθος του οποίου είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας των ρευστών, της ποσότητας των μη συμπυκνώσιμων αερίων στην αέρια φάση και των καθεστώτων ροής στο τμήμα της διφασικής ροής εντός της γεώτρησης και (γ) αποτελούν κρίσιμο παράγοντα στην κατανόηση της προέλευσης και της χημικής εξέλιξης των γ/θ ρευστών. Η αέρια φάση στις γεωτρήσεις ΑΚΡ1 και ΑΚΡ3 αποτελείται κυρίως από CO_2 (>99%) και υδρατμούς. Από ερευνητικές εργασίες και μετρήσεις σε γεωθερμικά πεδία στην Ελλάδα έχει διαπιστωθεί ότι ο λόγος των παροχών των δύο φάσεων είναι σταθερός και δεν μεταβάλλεται με την παροχή του υγρού ή με τον χρόνο άντλησης [6]. Ως εκ τούτου οι μετρήσεις των παροχών των δύο φάσεων στο γ/θ πεδίο Ακροποτάμου πραγματοποιήθηκαν με περιορισμένους όγκους ρευστών.

4.2. Διαχωρισμός Αέριας φάσης

Σχεδιάστηκε και συναρμολογήθηκε μια ευέλικτη διάταξη διαχωρισμού [5] όπως παρουσιάζεται στο σχηματικό διάγραμμα και τη φωτογραφία της Εικόνας 6. Το σύστημα διαχωρισμού συνδέθηκε στην έξοδο κάθε γεώτρησης με σωλήνα Φ50 mm μήκους 3 m. Από το άνω τμήμα του διαχωριστή η αέρια φάση οδηγούνταν με σωλήνα Φ50 mm στον συμπυκνωτή, όπου αφαιρούνταν το μεγαλύτερο μέρος των υδρατμών. Από τον συμπυκνωτή το διφασικό πλέον μείγμα διοχετεύονταν στον δεύτερο διαχωριστή. Για τη μέτρηση της παροχής της αέριας φάσης τοποθετήθηκαν δύο ροόμετρα μεταβλητής

διαμέτρου με μέγιστη παροχή αέρα 11 και 17 m^3/h στους 20°C και 1 atm. Η παροχή της υγρής φάσης μετρήθηκε ογκομετρικά με βαθμονομημένο δοχείο 18 L ή με ζύγιση σε ζυγό 10 kg, θεωρώντας ότι η πυκνότητα του νερού στους 80°C και για διαλυμένα στερεά 5 g/L είναι 0,975 kg/m^3.



Εικόνα 6: (α) Αριστερά, σχηματικό διάγραμμα συστήματος διαχωρισμού και (β) δεξιά φωτογραφία της διάταξης σε θέση λειτουργίας

4.3. Μέτρηση παροχής της αέριας φάσης

Η μέτρηση της αέριας παροχής έγινε με τη βοήθεια δύο βαθμονομημένων (για αέρα) ροταμέτρων (ροόμετρα μεταβλητής διατομής, FIP FLIV 32 T/V 1). Παράλληλες μετρήσεις της θερμοκρασίας του αέριου ρεύματος στην έξοδο του συστήματος για διάφορους χρόνους λειτουργίας έδωσαν τιμές από 30°C έως 45°C, εξαρτώμενες από την παροχή της αέριας φάσης και την παροχή του ψυχρού νερού για τη διαβροχή του συμπυκνωτή. Η παροχή της αέριας φάσης αναφέρεται στις συνθήκες εξόδου από το ροτάμετρο μετά τη βάνα και η περιεκτικότητα των νερών σε CO_2 υπολογίστηκε από τη σχέση:

$$m_{CO_2} = Q_G y_{CO_2} \rho_{CO_2} / Q_{wat} \quad (kg\ CO_2 / m^3\ \text{νερού}) \qquad (1)$$

όπου Q_G είναι η διορθωμένη παροχή της αέριας φάσης (μείγμα ατμού-CO_2) ως προς την τιμή που δίνει η ένδειξη του ροταμέτρου, ρ_{CO2} η πυκνότητα του CO_2 στις συνθήκες εξόδου και y_{CO2} είναι το γραμμομοριακό κλάσματα του CO_2 στο μείγμα. Το γραμμομοριακό κλάσμα του ατμού (1-y_{CO2}) θεωρείται ότι είναι ο λόγος της τάσης ατμών του νερού στη θερμοκρασία εξόδου (σε atm) προς τη πίεση στην έξοδο του ροταμέτρου, η οποία είναι 1 atm.

Τα αποτελέσματα για τις δύο γεωτρήσεις ΑΚΡ-1 και ΑΚΡ-3 επιβεβαιώνουν σε μεγάλο βαθμό την υπόθεση ότι ο λόγος των παροχών δεν μεταβάλλεται αξιοσημείωτα με τον χρόνο και με την υγρή παροχή (εν προκειμένω για μικρό εύρος παροχών). Η περιεκτικότητα του CO_2 στην ΑΚΡ-1 ανέρχεται σε 5,0 kg/m^3 νερού, η οποία είναι η μεγαλύτερη που έχει καταγραφεί σε γ/θ πεδίο στη Βόρεια Ελλάδα. Η αντίστοιχη παροχή στην ΑΚΡ-3 είναι κατά πολύ μικρότερη στα 1,7 kg/m^3 νερού. Τα παραπάνω αποτελέσματα ήταν αναμενόμενα ως προς την απόκλισή τους με βάση και τις πιέσεις που μετρήθηκαν στις κεφαλές των γεωτρήσεων μετά τη διακοπή της ροής.

5. ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΕΠΙΚΑΘΙΣΕΩΝ

Κατά τη διάρκεια των δοκιμών παραγωγής στις γεωτρήσεις ΑΚΡ-1 και ΑΚΡ-3 διαπιστώθηκε η έντονη τάση για δημιουργία ανθρακικών επικαθίσεων από τα νερά του γ/θ πεδίου Ακροποτάμου, η οποία είναι αναμενόμενη, ιδιαίτερα για τα νερά της ΑΚΡ-1, γεγονός που αποτυπώνεται στον Πίνακα 2, στον οποίο παρουσιάζονται οι λόγοι υπερκορεσμού ως προς τον ασβεστίτη (την πλέον δυσδιάλυτη μορφή του ανθρακικού ασβεστίου) και άλλοι πρακτικοί δείκτες κορεσμού που συχνά λαμβάνονται υπόψη. Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση των λόγων υπερκορεσμού είναι ο κώδικας PHREEQC (της USGS). Σημειώνεται ότι σύμφωνα με τα αποτελέσματα, υπερκορεσμός υπολογίζεται

και για τον χαλαζία (SiO_2) και τον δολομίτη. Είναι λογικό να ανιχνεύεται SiO_2 σε θέσεις κατάντη της εγκατάστασης, επειδή απαιτείται κάποιο στάδιο πολυμερισμού για την καταβύθισή του. Επίσης, παρουσιάζονται και οι τιμές για τους δείκτες Langelier (LSI), Ryznar (RI) και Stiff & Davies (SDSI), αν και οι δύο πρώτοι δεν μπορούν να εφαρμοστούν για νερά με μέση/υψηλή περιεκτικότητα σε διαλυμένα στερεά και βέβαια οι εκτιμήσεις με αυτούς τους δείκτες δεν είναι πάντα αξιόπιστες. Για να δειχθεί η σημαντική επίδραση της αντίστροφης διαλυτότητας του ανθρακικού ασβεστίου με τη θερμοκρασία, παρουσιάζεται ο λόγος υπερκορεσμού των νερών της ΑΚΡ1 σε θερμοκρασία 40°C, η οποία μπορεί να είναι κοντά στη θερμοκρασία επανεισαγωγής των ρευστών.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Πίνακα 2, υπάρχει τάση για σχηματισμό ανθρακικών επικαθίσεων και στις δύο γεωτρήσεις, και ιδιαίτερα στην ΑΚΡ-1. Ο κυριότερος λόγος είναι η αύξηση του pH των νερών με τον διαχωρισμό και την απελευθέρωση του διαλυμένου CO_2. Οι λόγοι υπερκορεσμού μειώνονται σημαντικά με τη μείωση της θερμοκρασίας και τη μείωση του pH. Θα πρέπει να τονιστεί πάντως ότι για να σχηματισθούν επικαθίσεις απαιτείται να ξεπερασθεί κάποιος κρίσιμος λόγος υπερκορεσμού. Ο λόγος αυτός είναι μεγαλύτερος όσο πιο δυσδιάλυτο είναι το άλας προς καταβύθιση. Εργαστηριακά πειράματα έχουν δείξει ότι ο κρίσιμος λόγος υπερκορεσμού αναφορικά με τον ασβεστίτη είναι γύρω στο 4 [7], αν και η ελληνική εμπειρία από μονάδες χαμηλής ενθαλπίας έδειξε ότι ο λόγος αυτός είναι μικρότερος, στην περιοχή 2,5-3.

Πίνακας 2. Χαρακτηριστικά των νερών από τις γεωτρήσεις ΑΚΡ1 & ΑΚΡ3 του γ/θ πεδίου Ακροποτάμου αναφορικά με την τάση για σχηματισμό επικαθίσεων ασβεστίτη. Το ποσοστό του $CaCO_3$ στις επικαθίσεις υπερβαίνει το 91%.

Γεώτρηση	ΑΚΡ-1	ΑΚΡ-1	ΑΚΡ-3	ΑΚΡ-3
Θερμοκρασία (°C)	84	40	90	40
pH (στους 25°C)	7,1	7,1	6,8	6,8
Αγωγιμότητα (μS/cm) (στους 25°C)	8619	8619	4283	4283
Λόγος υπερκορεσμού, S				
Κώδικας PHREEQC (ασβεστίτης)	5,3	3,1	2,9	1,3
Δείκτες κορεσμού				
Δείκτης Langelier (LSI)	1,9	1,3	1,3	0,7
Δείκτης Ryznar (RI)	3,2	4,5	4,0	5,5
Δείκτης Stiff & Davies (SDSI)	2,6	1,0	2,4	0,6

Για την περαιτέρω αναλυτική μελέτη των επικαθίσεων ακολουθήθηκε μια πολυπαραμετρική προσέγγιση, με την εφαρμογή ορυκτολογικής και χημικής ανάλυσης σε στερεά δείγματα, καθώς και μέσω της συσχέτισης με τα αντίστοιχα δείγματα γεωθερμικών ρευστών. Δείγματα των επικαθίσεων σε κρυσταλλική μορφή ελήφθησαν τόσο στο εσωτερικό τοίχωμα αγωγού PVC (Εικόνα 7α), όσο και στο σημείο πτώσης των ρευστών (Εικόνα 7β).

Εικόνα 7: (α) Αριστερά, φωτογραφία του αγωγού εξόδου της ΑΚΡ-3 με λεπτό υμένα ανθρακικών αλάτων πάχους 2 mm και (β) δεξιά, φωτογραφία ανθρακικών αλάτων σε μορφή ασύνδετης πούδρας επάνω σε κροκάλες πάχους 3 mm

Τα ακτινογραφήματα με τη μέθοδο XRD καθώς και η μικροσκοπική παρατήρηση κατέδειξαν την ανθρακική σύσταση των επικαθίσεων. Οι φάσεις που κυριαρχούν είναι τα πολύμορφα του $CaCO_3$, ασβεστίτης, σε ποσοστό >90% και αραγωνίτης, όπως άλλωστε αναμενόταν από την παρουσία σημαντικών ποσοτήτων CO_2 στα ρευστά. Η ημι-ποσοτική ανάλυση που παρέχει η περιθλασιμετρία ακτίνων Χ έδειξε ότι οι επικαθίσεις στην περίπτωση της ΑΚΡ3 αποτελούνται κυρίως από ασβεστίτη, ενώ οι κρυσταλλικές φάσεις που δημιουργούνται κατά την πτώση των γεωθερμικών νερών σε παρακείμενα πετρώματα είναι αραγωνίτης και ασβεστίτης. Επίσης, σε μικρές ποσότητες ταυτοποιήθηκε η παρουσία διοξειδίου του πυριτίου (SiO_2) και οξείδια του σιδήρου. Τα αποτελέσματα του XRD για τη γεώτρηση ΑΚΡ-1 έδειξαν επίσης την έντονη παρουσία του $CaCO_3$ (91% σύμφωνα με την ημι-ποσοτική ανάλυση), που συνοδεύεται από μια μικρή παρουσία SiO_2 (9% σύμφωνα με την ημι-ποσοτική ανάλυση).

Τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων στα στερεά δείγματα έδειξαν την συντριπτική επικράτηση του CaO έναντι των υπολοίπων οξειδίων, με ποσοστά 53,1% για το δείγμα AKR-1, 54,55% για το δείγμα AKR-3a και 53,5% για το δείγμα AKR-3b. Τα ιχνοστοιχεία με αξιοσημείωτη παρουσία είναι τα Fe, Mn, Sr και για τα τρία δείγματα. Τα στοιχεία Fe και Mn μπορούν να συμμετέχουν στη δομή των ανθρακικών αλάτων (φερροασβεστίτης και μαγγανιούχος ασβεστίτης) ή να σχηματίζουν οξείδια/υδροξείδια, τα οποία παρατηρήθηκαν κατά τη μικροσκοπική παρατήρηση. Στο δείγμα AKR-1 αυξημένα καταγράφονται επιπλέον και τα στοιχεία As, Zn και Ba, με το As να ανέρχεται σε 1,43 g/kg ξηράς ουσίας. Από τις αναλύσεις των αντίστοιχων γεωθερμικών ρευστών παρατηρείται η αυξημένη παρουσία του As (4,8 mg/L).

6. ΠΡΟΤΑΣΗ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΥ Γ/Θ ΠΕΔΙΟΥ ΑΠΟ ΤΟΝ ΔΗΜΟ ΠΑΓΓΑΙΟΥ

Ο Δήμος Παγγαίου μέσω της ΔΕΥΑΑ Παγγαίου έχει υποβάλει επενδυτική πρόταση για τη σταδιακή αξιοποίηση του γ/θ πεδίου σε τρία διακριτά στάδια ως ακολούθως:

Στάδιο Α: (α) Υποδομές άντλησης και μεταφοράς της θερμικής ενέργειας στην ευρύτερη περιοχή της Δ.Ε. Ορφανού, (β) Παραγωγική γεώτρηση, Πρωτεύον δίκτυο 1.800 m, Θερμικός σταθμός, Γεωτρήσεις επανεισαγωγής, δίκτυο μεταφοράς 5.100 m, θερμικός υποσταθμός, δίκτυο διανομής 4 Km.

Χρήσεις: Αστική τηλεθέρμανση (κατοικίες, δημοτικά/δημόσια κτίρια), μεταποιητικές μονάδες, θερμοκηπιακές εγκαταστάσεις.

Στάδιο Β: (α) Ανάπτυξη μεταφοράς της θερμικής ενέργειας στην περιοχή της Παραλίας Οφρυνίου, Η/Μ εξοπλισμός υποσταθμού Κάριανης, δίκτυο μεταφοράς 6.800 m, θερμικός υποσταθμός, μονάδα ψύκτη, δίκτυο διανομής & ψύξης 2.500 m,

Χρήσεις: Τουριστικά καταλύματα, δημόσια/δημοτικά κτίρια

Στάδιο Γ: (α) Ανάπτυξη υποδομών άντλησης μεταφοράς της θερμικής ενέργειας στην περιοχή των Λουτρών Ελευθερών, (β) Παραγωγική γεώτρηση, Πρωτεύον δίκτυο 100 m, Θερμικός σταθμός, Γεωτρήσεις επανεισαγωγής, δίκτυο μεταφοράς 4.500 m

Χρήσεις: Το στάδιο αυτό συνδέεται με τη δυνατότητα αξιοποίησης της δημοτικής έκτασης 9.000 στρεμμάτων. Συνδέεται επίσης με τη δυνατότητα αξιοποίησης των ιαματικών ιδιοτήτων του γεωθερμικού ρευστού

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Το γεωθερμικό πεδίο Ακροποτάμου Καβάλας αποτελεί ένα πολύ υποσχόμενο πεδίο για την αξιοποίηση των θερμών νερών που μπορούν να αντληθούν σε μεγάλες ποσότητες για ποικίλες άμεσες χρήσεις (ενδεικτικά: θέρμανση θερμοκηπίων, ιαματικός τουρισμός, ξήρανση αγροτικών προϊόντων). Περαιτέρω έρευνα σε μεγαλύτερα βάθη βεβαίως μπορεί να οδηγήσει στην εύρεση ρευστών μέσης ενθαλπίας κατάλληλα και για ηλεκτροπαραγωγή. Ορισμένα συμπεράσματα και προτάσεις από την παρούσα μελέτη είναι:

1) Η ανόρυξη νέων παραγωγικών γεωτρήσεων (προς αντικατάσταση των υπαρχουσών, πρόχειρων σχετικά, γεωτρήσεων του ΙΓΜΕ) προτείνεται να γίνουν σε κοντινά σημεία και σε αντίστοιχα βάθη των γεωτρήσεων ΑΚΡ-1 και ΑΚΡ-3.

2) Τα ρευστά του γ/θ πεδίου Ακροποτάμου περιέχουν σημαντικές ποσότητες CO_2, κάτι που επηρεάζει σημαντικά τον σχεδιασμό και τη λειτουργία των εγκαταστάσεων αξιοποίησης των ρευστών. Λόγω της

απελευθέρωσης του CO_2 και της συνακόλουθης αύξησης του pH έχει προβλεφθεί και παρατηρηθεί έντονη τάση για σχηματισμό ανθρακικών επικαθίσεων. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος προτείνεται είτε η χρήση χημικών προσθέτων - αντικαθαλατωτικών, εφόσον αυτό επιτρέπεται από την περιβαλλοντική μελέτη, ή η αποφυγή διαχωρισμού της αέριας φάσης, κάτι που επιτυγχάνεται με τη χρήση αντλίας σε βάθος στο οποίο η πίεση είναι αρκούντως μεγαλύτερη της πίεσης του σημείου φυσαλίδας. Η πίεση αυτή αυξάνει με την περιεκτικότητα σε CO_2 και για την AKP-1 υπολογίζεται στις 10 atm, ενώ είναι σημαντικά μικρότερη για την AKP-3 (4 atm). Με κάποια επιφύλαξη μπορεί να θεωρηθεί και ως λύση για τα νερά της AKP-3 ο στραγγαλισμός της ροής στις επιφανειακές εγκαταστάσεις με αναμενόμενα προβλήματα μόνο μέσα στους εναλλάκτες θερμότητας.

3) Τα δεδομένα για το πεδίο Ακροποτάμου συγκλίνουν στο γεγονός ότι θα ήταν προτιμητέα μία παραγωγική γεώτρηση με τα χαρακτηριστικά της AKP-3 παρά με τα χαρακτηριστικά της AKP-1.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η συγγραφική ομάδα της παρούσας δημοσίευσης ευχαριστεί θερμά το Διοικητικό Συμβούλιο της ΔΕΥΑΑ ΠΑΓΓΑΙΟΥ για την αμέριστη τεχνική και οικονομική υποστήριξη χωρίς τις οποίες δεν θα ήταν εφικτή η υλοποίηση της πληθώρας των πειραματισμών, μετρήσεων και αναλύσεων που παρατίθενται στο κείμενο. Ιδιαίτερη μνεία οφείλουμε να κάνουμε στον Δήμαρχο Παγγαίου κ. Φίλιππο Αναστασιάδη και τον Διευθυντή της ΔΕΥΑΑ ΠΑΓΓΑΙΟΥ κ. Ιορδάνη Χατζησπύρογλου για την ουσιαστική υποστήριξή τους καθ' όλη τη διάρκεια των εργασιών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Κολιός, Ν., Κουτσινός, Σ., Καρυδάκης, Γ. και Αρβανίτης, Α., 2006, Αποτελέσματα της γεωθερμικής έρευνας στην περιοχή Ακροποτάμου Ν. Καβάλας. Τεχνική Έκθεση, ΙΓΜΕ, Θεσσαλονίκη, Νοέμβριος 2006

[2] Kolios, N., Arvanitis, A., Karydakis, G., and Koutsinos, S., 2010, Geothermal Drilling Activity in the Akropotamos area (Macedonia, Northern Greece). Bulletin of the Geological Society of Greece, 43(5), 2246-2256.

[3] Arvanitis, A., Dotsika, E., Kolios, N., 2016, Geochemical Characteristics of the Geothermal Fluids in the Akropotamos Area (Macedonia, Northern Greece). Bulletin of the Geological Society of Greece, 50(2), 596-605.

[4] Δαλαμπάκης, Π., et al., 2018, Ερευνητικές Εργασίες Εκτίμησης και Αξιολόγησης των Παραμέτρων Εκμετάλλευσης του γ/θ Πεδίου Ακροποτάμου. Τεχνική Έκθεση, Ινστιτούτο Εδαφοϋδατικών Πόρων, Ελληνικός Γεωργικός Οργανισμός «ΔΗΜΗΤΡΑ», σ. 102.

[5] Κολιός, Π., Μποντόζογλου, Β., Ανδρίτσος, Ν., 2020, Ποιοτική Αξιολόγηση και Σχεδιασμός για τη Βέλτιστη Διαχείριση των Γεωθερμικών Ρευστών του Γεωθερμικού Πεδίου Ακροποτάμου του Δήμου Παγγαίου, Τελική Έκθεση, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, σ. 67.

[6] Andritsos, N., Karabelas, A.J., Emmanouel, Ch, and Karydakis. G., 1994, "Characterization of fluids from low enthalpy geothermal fields in Greece", Proceedings of Int. Symposium Geothermics 94 in Europe, Orléans, France, Febr. 8-9, pp. 91-97.

[7] Andritsos, N., Kontopoulou, M., Karabelas, A.J. and Koutsoukos, P.G. (1996) $CaCO_3$ deposit formation under isothermal conditions. Can. J. Chem. Eng., 74, 911-919.

ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΡΟΦΙΚΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΥΠΟ ΤΟ ΠΡΙΣΜΑ ΤΗΣ ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ

Ι. Παυλίδου[1], Γ. Περκουλίδης[1], Ν. Μουσιόπουλος[1], Α. Μαλαμάκης[1], Γ. Μπανιάς[2]

[1] Εργαστήριο Μετάδοσης Θερμότητας και Περιβαλλοντικής Μηχανικής
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, ΑΠΘ, ΤΘ 483, 541 24 Θεσσαλονίκη
[2] Ινστιτούτο Βιο-Οικονομίας και Αγρο-Τεχνολογίας, Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης
e-mail: gperk@auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία διερευνώνται οι μέθοδοι επεξεργασίας και αξιοποίησης των τροφικών αποβλήτων για την ανάκτηση ενέργειας από αυτά υπό το πρίσμα της Κυκλικής Οικονομίας. Αρχικά παρατίθενται οι ορισμοί των σχετικών εννοιών και πραγματοποιείται ανασκόπηση της βιβλιογραφίας που καλύπτει τη σχετική θεματολογία. Στη συνέχεια, καταγράφονται τα στάδια προεπεξεργασίας των τροφικών αποβλήτων προς αναερόβια ζύμωση και αναλύονται οι διεργασίες, οι παράμετροι και τα είδη των αντιδραστήρων που χρησιμοποιούνται για τη βιώσιμη παραγωγή βιοαερίου και λιπάσματος. Αναφέρονται οι τρόποι αξιοποίησης του βιοαερίου καθώς και η σημασία, η χρησιμότητα και τα οφέλη της κυκλικής οικονομίας σε σχέση με την αναερόβια ζύμωση. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το προτεινόμενο σύστημα αξιολόγησης για τη διαχείριση των τροφικών αποβλήτων υπό το πρίσμα της κυκλικής οικονομίας, και διαμορφώνονται δύο σενάρια διαχείρισης των τροφικών αποβλήτων στο νησί της Θάσου. Το πρώτο αφορά στην αναβάθμιση του βιοαερίου, την αποθήκευση και τη μεταφορά του σε πρατήριο καυσίμων, ενώ το δεύτερο αφορά στην αξιοποίηση του παραγόμενο βιοαερίου εντός του νησιού. Παρουσιάζονται τα δυνατά και τα αδύνατα σημεία τους, καθώς και τα οικονομικά στοιχεία και πραγματοποιείται αξιολόγηση των επενδυτικών σχεδίων μέσω της καθαρής παρούσας αξίας στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας.

Λέξεις Κλειδιά: *Τροφικά απόβλητα, αναερόβια ζύμωση, βιοαέριο*

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το ενδιαφέρον για την πρόληψη των τροφικών αποβλήτων αντανακλάται στον αυξανόμενο αριθμό μελετών από το 2000, οι οποίες υπογραμμίζουν την οικονομική σημασία της σπατάλης τροφίμων. Η ώθηση για αλλαγή αντικατοπτρίζεται στην ιεράρχηση των μέτρων για τη μείωση των τροφικών αποβλήτων μέσω της πρόληψης και της εναλλακτικής χρήσης (παραγωγή ζωοτροφών) ως προτιμότερες επιλογές. Παρόλα αυτά, παράγονται αναπόφευκτα σημαντικές ποσότητες μη εδώδιμων τροφίμων, οι οποίες ενδείκνυνται για ανάκτηση ενέργειας και συστατικών. Καίρια ζητήματα όπως η κλιματική αλλαγή και η σταδιακή κατάργηση της χρήσης ορυκτών καυσίμων, όπως επίσης και η εφαρμογή των πολιτικών που οδηγούν στη μείωση των εκπομπών ρύπων, οδηγούν προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (φωτοβολταϊκά, αιολικά, βιοαέριο) [1].

Με στόχο την ανάκτηση ενέργειας, έχουν αναπτυχθεί και συγκριθεί βιολογικές και θερμοχημικές μέθοδοι με κριτήρια επιλογής τις εκπομπές ρύπων, τις οσμές που απελευθερώνονται κατά τις διεργασίες, τον απαιτούμενο χρόνο, την απόδοση της ανάκτησης ενέργειας και το συνεπαγόμενο κόστος.

Η αποτέφρωση περιλαμβάνει την καύση και τη μετατροπή των αποβλήτων σε θερμική ενέργεια, για τη λειτουργία ατμοστροβίλων ή εναλλακτών θερμότητας στη βιομηχανία ή για ηλεκτροπαραγωγή [2]. Ο όγκος των αποβλήτων μειώνεται έως και 85 % όμως οι τοξικές ατμοσφαιρικές εκπομπές που συνεπάγονται της καύσης την καθιστούν μη αποδεκτή ή απαγορευμένη σε ορισμένα ευρωπαϊκά κράτη μέλη. Η στάχτη ως παράγωγο της καύσης συνιστά ένα συμπυκνωμένο ανόργανο απόβλητο που απαιτεί κατάλληλη διαχείριση. Υπό το πρίσμα της ανάκτησης ενέργειας και με τη βελτίωση των συστημάτων ελέγχου των εκπομπών, κατασκευάζονται νέας γενιάς εγκαταστάσεις υπό αυστηρότερο περιβαλλοντικό καθεστώς. Ωστόσο, η αποτέφρωση κρίνεται ακατάλληλη για την άμεση ανάκτηση ενέργειας από τροφικά υπολείμματα λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε υγρασία και των μη καύσιμων συστατικών που περιέχουν.

Η πυρόλυση μετατρέπει τα απόβλητα εν απουσία οξυγόνου, σε βιολογικό έλαιο και υψηλής ενέργειας αέριο σύνθεσης (syngas) και μια στερεή μάζα (biochar) κατάλληλη για λίπασμα. Η αεριοποίηση παράγει syngas μέσω της θερμικής αποδόμησης των αποβλήτων σε κατάλληλα διαμορφωμένο αεριοποιητή. Στη συνέχεια το αέριο σύνθεσης ψύχεται, καθαρίζεται και με προσθήκη H2 και H2O, μετατρέπεται σε CH4 και CO2. Τα προϊόντα αυτών των μεθόδων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμα ή πρώτες ύλες για χημικές διεργασίες. Πλεονεκτούν σε σχέση με την παραδοσιακή αποτέφρωση αναφορικά με το κόστος και τη δυνατότητα καλύτερου ελέγχου των συνθηκών λειτουργίας καθώς και τις μειωμένες εκπομπές διοξινών [3]. Όμως, αποτελούνται από περίπλοκες φυσικοχημικές αντιδράσεις σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες και η απόδοση τους επηρεάζεται από τη μεταβλητότητα στη σύνθεση των τροφικών αποβλήτων και την υψηλή υγρασία.

Η μέθοδος της υδροθερμικής ενανθράκωσης προσελκύει αυξημένη προσοχή από τους ερευνητές για την επεξεργασία ρευμάτων αποβλήτων με υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία (80-90 %). Πρόκειται για υγρή διαδικασία που μετατρέπει τα τροφικά απόβλητα σε πλούσια πηγή ενέργειας υπό τη μορφή των υδρογονανθράκων σε σχετικά χαμηλή θερμοκρασία (180-350 °C). Τα απόβλητα υποβάλλονται σε μια σειρά αντιδράσεων όπως υδρόλυση, συμπύκνωση και αφυδάτωση. Το αποτέλεσμα αυτών των διεργασιών είναι ο σχηματισμός ενός ενεργειακά πυκνού υλικού, το οποίο έχει σύνθεση ισοδύναμη με εκείνη του λιγνιτικού άνθρακα [4]. Πρόκειται για γρήγορη διαδικασία, με μειωμένη παραγωγή αποβλήτων και οσμών, της οποίας η υψηλή θερμοκρασία βοηθά στην αδρανοποίηση πιθανά μολυσματικών ουσιών. Ωστόσο, οι τεχνικές της απαιτήσεις, την καθιστούν μη ευρέως διαδεδομένη λόγω υψηλού του συνεπαγόμενου κόστους.

Η βιοαιθανόλη μπορεί να οριστεί ως βιοαλκοόλη, η οποία λαμβάνεται από τη ζύμωση υδατανθράκων από απόβλητα με υψηλή περιεκτικότητα σε σάκχαρα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο σε βενζινοκινητήρες [5]. Ωστόσο, τα τροφικά απόβλητα με υψηλά σάκχαρα όπως τα φρούτα, προτιμώνται για την παραγωγή ζωοτροφών και για το λόγο αυτό αποδεκτά για παραγωγή βιοαιθανόλης γίνονται τα μη εδώδιμα υλικά που δεν θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν διαφορετικά. Έχουν αναπτυχθεί διάφορες πρακτικές για την συγκεκριμένη μέθοδο όπως όξινες, θερμικές και ενζυματικές διεργασίες [6]. Η ενζυματική υδρόλυση αποτελεί ελκυστική επιλογή για την παραγωγή βιοαιθανόλης από τροφικά υπολείμματα καθώς μειώνει τον όγκο των αποβλήτων και το αποτύπωμα άνθρακα. Όμως, θα πρέπει να μελετηθεί η συνολική οικονομική βιωσιμότητα της διαδικασίας και απαιτείται περαιτέρω έρευνα για τη μείωση του συνεπαγόμενου κόστους.

Κατά την αναερόβια επεξεργασία πραγματοποιείται αποδόμηση των οργανικών ενώσεων με δράση αναερόβιων μικροοργανισμών, οι οποίοι εν απουσία οξυγόνου, αναπτύσσονται χρησιμοποιώντας τις οργανικές ενώσεις ως πηγή ενέργειας [7]. Μέσω αλληλένδετων αντιδράσεων το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα των οργανικών αποβλήτων μετατρέπεται σε βιοαέριο και σε άριστη ποιοτικά μικροβιακή μάζα, η οποία ενδείκνυται για εδαφοβελτιωτικό. Οι αναερόβιοι αντιδραστήρες είναι οικονομικοί και απλοί στην κατασκευή και το χειρισμό. Επίσης επιτυγχάνεται μείωση των οσμών των αποβλήτων σε ποσοστό μεγαλύτερο του 80 % εξαιτίας της απομάκρυνσης των πτητικών στερεών

Από τις προαναφερθείσες μεθόδους, η υδροθερμική ενανθράκωση πλεονεκτεί σε σχέση με τις άλλες θερμοχημικές τεχνικές, εξακολουθούν όμως να υπάρχουν ορισμένες προκλήσεις που εφιστούν την επιστημονική προσοχή όπως η εύρεση του κατάλληλου καταλύτη και ο επακριβής χημικός μηχανισμός που απαιτούν προς το παρόν περαιτέρω έρευνα. Επιπρόσθετα, διάφορα ενδεχόμενα προβλήματα περιβαλλοντικής ρύπανσης που συνδέονται με αυτές τις μεθόδους, παρείχαν ισχυρή ώθηση στην επιλογή φιλικότερων περιβαλλοντικά μεθόδων, όπως οι είναι βιολογικές. Το χαμηλό κόστος κεφαλαίου, η απλότητα, οι χαμηλές εκπομπές και η σχετικά υψηλή απόδοση της αναερόβιας ζύμωσης, τη χρήζουν ως την καταλληλότερη επιλογή με βάση τις υπάρχουσες συνθήκες.

Η σύνοψη των τεχνολογιών ανάκτησης ενέργειας όσον αφορά τις περιβαλλοντικές πτυχές και τις πτυχές της ενέργειας και της οικονομίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 1 [8-23].

Πίνακας 1. Σύγκριση των μεθόδων ενεργειακής αξιοποίησης τροφικών αποβλήτων

Μέθοδος / Παράγοντας	Εκπομπές ρύπων	Οσμές	Απαιτούμενος χρόνος	Κόστος	Ενεργειακή απόδοση
Αποτέφρωση	+	++++	++++	+++	+++
Αεριοποίηση / Πυρόλυση	++	+++	++++	++	+++
Υδροθερμική ενανθράκωση	++++	++++	++++	++	+++
Ζύμωση αιθανόλης	++++	++	++	++	++
Αναερόβια ζύμωση	++++	+	+	++++	+++

Πολύ καλή ++++
Καλή +++
Μέτρια ++
Κακή +

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1. Τροφικά υπολείμματα ως υπόστρωμα στην αναερόβια ζύμωση

Η αναερόβια ζύμωση αντιμετωπίζει πολλές τεχνικές, οικονομικές και κοινωνικές προκλήσεις. Μια συνήθης τεχνική πρόκληση είναι, εν μέσω έλλειψης ελέγχου και βελτιστοποίησης των διαδικασιών, η δημιουργία ενδιάμεσων βλαβερών ενώσεων που μειώνουν τη σταθερότητα του συστήματος και την απόδοση μεθανίου ή προκαλούν αφρισμό. Όταν δημιουργείται αφρισμός, το παραγόμενο βιοαέριο δεν απελευθερώνεται σε αέρια φάση αλλά διασκορπίζεται στο υγρό και ως αποτέλεσμα μειώνεται η αποτελεσματικότητα του αντιδραστήρα και μπλοκάρονται οι αγωγοί και οι βαλβίδες διαφυγής του αερίου προκαλώντας βλάβες [24]. Διάφορες στρατηγικές για τον έλεγχο του αφρισμού έχουν αναπτυχθεί με τις πιο διαδεδομένες να αποτελούν η εφαρμογή αντιαφριστικών πρόσθετων, οι παγίδες αφρού και η σωστή ρύθμιση της φόρτισης του υποστρώματος [25]. Συχνά εμφανίζεται αστάθεια του συστήματος λόγω ταχείας μετατροπής του ευκόλως αποικοδομήσιμου υποστρώματος σε πτητικά λιπαρά οξέα σε πρώιμο στάδιο που προκαλεί δραστική μείωση του pH εφόσον δεν υπάρξει κατάλληλη ρύθμιση [26].

Τα συστήματα αναερόβιας ζύμωσης απαιτούν κόστος κεφαλαίου και τα έσοδα τους προέρχονται από την καταβολή τελών για τη συλλογή και πιθανή πώληση οργανικών αποβλήτων και την πώληση ενέργειας. Εφόσον τα τροφικά απόβλητα αποτελούν το μοναδικό υπόστρωμα, η συμπλήρωση με μικροθρεπτικά συστατικά είναι απαραίτητη για την εύρυθμη λειτουργία του αντιδραστήρα. Επίσης, η ταυτόχρονη χρήση δύο ή περισσότερων υποστρωμάτων στον ίδιο αντιδραστήρα αποτελεί συνήθη πρακτική καθώς παρέχουν την αλκαλικότητα και τα συστατικά που απαιτούνται για την ισορροπία του συστήματος. Κατά το συνδυασμό υποστρωμάτων, τα τροφικά απόβλητα μπορούν να αποτελέσουν το κύριο υπόστρωμα όταν επικρατούν σε ποσοστό συγκέντρωσης. Συνήθως χρησιμοποιούνται συνυποστρώματα όπως στραγγισμένα στερεά απόβλητα, απόβλητα σφαγείων και άλλα

λιγνοκυτταρινικά απόβλητα που συνεργούν στην αύξηση της απόδοσης βιοαερίου. Ακόμα, δύναται να χρησιμοποιηθεί ιλύς καθαρισμού λυμάτων (λυματολάσπη) ή ζωικά απόβλητα.

Οι περισσότερες τρέχουσες έρευνες επικεντρώνονται στην αναγνώριση νέων πιθανών υποστρωμάτων για συγχώνευση και στην επιλογή της βέλτιστης αναλογίας και των συνθηκών λειτουργίας όπως ο ρυθμός φόρτισης και η θερμοκρασία. Όμως, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη, εκτός της απόδοσης μεθανίου, οι οικονομικές και ενεργειακές εισροές από τη μεταφορά και την επεξεργασία των συνυποστρωμάτων για να αξιολογηθεί η σκοπιμότητα της διαδικασίας.

Οι συγγραφείς μπορούν να γράψουν το κείμενο της εργασίας τους κατευθείαν επάνω στο πρότυπο, διαγράφοντας φυσικά τις υποδείξεις για το στυλ γραφής μέσα στις αγκύλες.

2.1.1. Μέθοδοι προεπεξεργασίας

Η προεπεξεργασία του υποστρώματος επιταχύνει το πρώτο στάδιο της αναερόβιας ζύμωσης, βελτιώνει την αποικοδόμηση των οργανικών αποβλήτων και αυξάνει την παραγωγή βιοαερίου. Η επίδραση της εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα χαρακτηριστικά του υποστρώματος και τις διαδικασίες που ακολουθούνται [27]. Πρέπει να τονιστεί ότι οι μέθοδοι προεπεξεργασίας εφαρμόζονται προσεκτικά διότι τα τροφικά απόβλητα ιδιαίτερα τα οικιακά είναι εκ φύσεως ευκόλως διασπώμενα και περεταίρω προεπεξεργασία μπορεί να επιφέρει αρνητικά αποτελέσματα όπως η δημιουργία τοξικών ενώσεων [28]. Στην περίπτωση των τροφικών αποβλήτων από εργοστάσια επεξεργασίας τροφίμων, η προεπεξεργασία είναι επωφελής και ένας από τους στόχους της είναι η αφαίρεση εύθραυστων κλασμάτων όπως δέρμα, σπόρους, φλοιούς και άλλα μη εδώδιμα μέρη. Όπου κριθεί αναγκαίο μπορούν να εφαρμοστούν διεργασίες προεπεξεργασίας όπως διαλογή, διαχωρισμός, ομογενοποίηση ή/και παστερίωση.

2.1.2. Βιοχημεία της αναερόβιας ζύμωσης

Η διαδοχική οξείδωση των οργανικών συστατικών είναι αποτέλεσμα συνδυασμού διαφορετικών ειδών βακτηρίων και ολοκληρώνεται σε στάδια. Σε γενικές γραμμές, η αναερόβια ζύμωση ολοκληρώνεται σε τέσσερα στάδια, την υδρόλυση, την οξεογένεση, την οξικογένεση και τη παραγωγή μεθανίου. Κάθε μεταβολικό στάδιο ελέγχεται από τους μικροοργανισμούς όπου το πιο αργό στάδιο της διεργασίας καθορίζει και την ταχύτητα της αντίδρασης, το οποίο συνήθως είναι της μεθανογένεσης εξαιτίας του χαμηλού ρυθμού ανάπτυξης των μεθανογόνων βακτηρίων.

Για την υψηλή μεταβολική δραστηριότητα των μεθανογόνων, είναι επιτακτική η ύπαρξη των κατάλληλων, ελεγχόμενων συνθηκών στο εσωτερικό του αναερόβιου αντιδραστήρα, οι οποίες συντελούν στη δημιουργία του βέλτιστου περιβάλλοντος ανάπτυξης των βακτηρίων. Οι παράγοντες που επιδρούν είναι κυρίως η ενεργή οξύτητα (pH), η θερμοκρασία, η ύπαρξη των απαιτούμενων θρεπτικών συστατικών, η χημική σύσταση τροφοδοσίας, ο χρόνος κατακράτησης και οι συγκεντρώσεις της αμμωνίας και των πτητικών λιπαρών οξέων.

2.2. Κατηγορίες αντιδραστήρων αναερόβιας ζύμωσης

Τα τελευταία χρόνια ένας καινοτόμος αριθμός αντιδραστήρων έχει αναπτυχθεί και προσαρμοστεί στις εκάστοτε διαδικασίες επιτρέποντας υψηλότερο ποσοστό αντίδρασης ανά μονάδα όγκου αντιδραστήρα. Κοινό χαρακτηριστικό όλων είναι η στεγανότητα, το σύστημα τροφοδότησης και τα συστήματα εξαγωγής βιοαερίου και αποβλήτου. Στην επιλογή του κατάλληλου συστήματος, λαμβάνονται υπόψη και ορισμένα τεχνικοοικονομικά κριτήρια όπως το κόστος, το μέγεθος και τα υλικά κατασκευής.

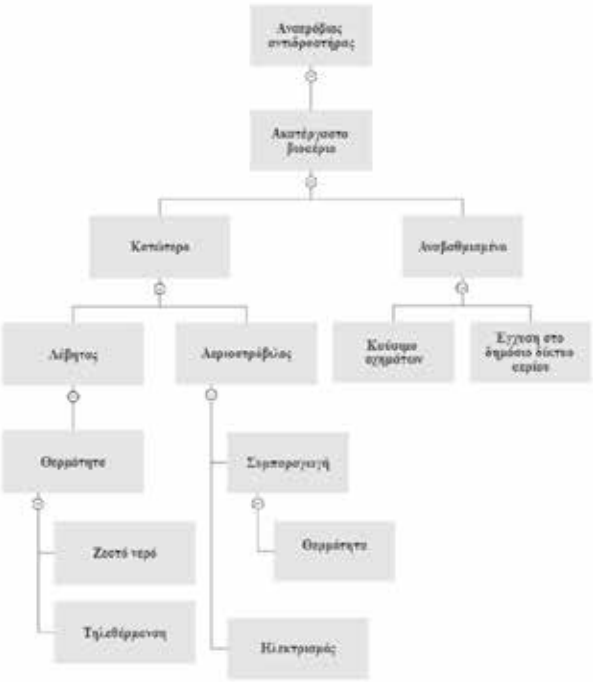
Σε αντιδραστήρες διαλείποντος έργου το ως προς ζύμωση υλικό εισάγεται και αφήνεται ώστε διαδοχικά να λάβουν χώρα τα στάδια της αποδόμησης. Έπειτα, αφαιρείται εντελώς και τροφοδοτείται με νέο καθώς η διεργασία επαναλαμβάνεται. Είναι κατασκευαστικά απλοί και χρησιμοποιούνται ευρέως σε εργαστηριακή κλίμακα διότι δίνουν μια πρώτη εκτίμηση της απόδοσης της μεθανοποίησης και προτείνονται οι συνθήκες για περαιτέρω επεξεργασία. Αντιθέτως, στους αντιδραστήρες συνεχούς τύπου, η τροφοδότηση του υποστρώματος και η παραγωγή βιοαερίου γίνονται χωρίς διακοπή. Κατηγοριοποιούνται σε οριζόντιους, κατακόρυφους ή πολλαπλών δεξαμενών και ανάλογα με το είδος ανάδευσης σε στρωτής ροής ή πλήρους ανάμιξης.

Ελκυστική επιλογή αποτελούν τα τελευταία χρόνοι οι κινητοί αναερόβιοι αντιδραστήρες τύπου κοντέινερ, για μικρές ποσότητες αποβλήτων με δυνατότητα ανάκτησης ενέργειας και παστερίωσης για παραγωγή λιπάσματος με ταυτόχρονη μείωση των δαπανών μεταφοράς και διάθεσης αποβλήτων. Οι αντιδραστήρες αυτού του τύπου είναι εύκολοι στη μεταφορά και δεν απαιτούν επίβλεψη κατά τη λειτουργία.

Εικόνα 1. Συστήματα κινητού αναερόβιου αντιδραστήρα [13]

2.2.1. Αξιοποίηση του παραγόμενου βιοαερίου

Το βιοαέριο αποτελεί έναν «πράσινο» φορέα βιώσιμης ενέργειας και διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη μετάβαση σε μια βιώσιμη κοινωνία με χαμηλό αποτύπωμα άνθρακα καθώς επιτρέπει πολλούς τρόπους αξιοποίησης. Πριν από οποιαδήποτε χρήση, το βιοαέριο υφίσταται καθαρισμό, αναβάθμιση και απόσμηση. Μπορεί να αξιοποιηθεί για την παραγωγή θερμότητας μέσω άμεσης καύσης, παραγωγή ηλεκτρισμού από κυψέλες καυσίμου ή στροβίλους, συμπαραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού (ΣΗΘ) ή ως καύσιμο οχημάτων (Εικόνα 2). Η συνήθης πολιτική διαχείρισης είναι να χρησιμοποιηθεί ένα ποσοστό 10-40 % για την κάλυψη των αναγκών σε ηλεκτρισμό και θέρμανση της εκάστοτε μονάδας αναερόβιας ζύμωσης και το υπόλοιπο ποσοστό να διατίθεται προς πώληση στο δημόσιο δίκτυο. Τέλος, διατίθενται λύσεις εφοδιασμού απομακρυσμένων από δίκτυο περιοχών μέσω του πεπιεσμένου φυσικού αερίου (CNG) και του υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG) .



Εικόνα 2: Τρόποι αξιοποίησης του βιοαερίου

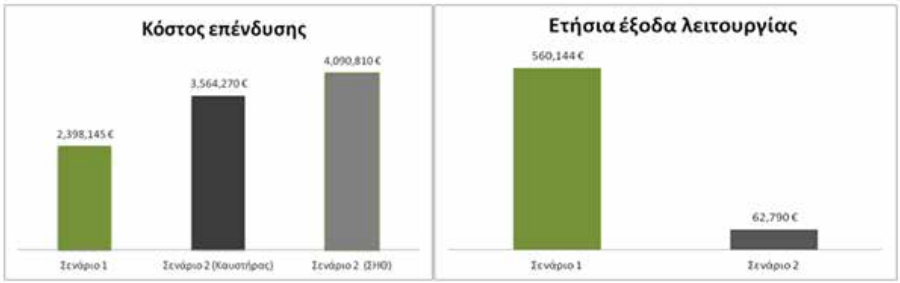
2.3. Σύστημα για τη διαχείριση των τροφικών αποβλήτων υπό το πρίσμα της κυκλικής οικονομίας

Τα υπολείμματα τροφίμων μπορούν να διαδραματίσουν κεντρικό ρόλο στην κυκλική οικονομία εφόσον χρησιμοποιούνται, μέσω της αναερόβιας ζύμωσης, για την ανάκτηση ενέργειας και λόγω της δυνατότητας απομόνωσης των θρεπτικών συστατικών του τελικού αποβλήτου και την επιστροφή τους στο σύστημα γεωργικής παραγωγής. Η πρακτική διαχείρισης αποβλήτων στο παρελθόν βασιζόταν μόνο στην αποτέφρωση και στην υγειονομική ταφή και τα θρεπτικά συστατικά εξέρχονταν στην ατμόσφαιρα, στα οικοσυστήματα γλυκού νερού και στους ωκεανούς. Επιπρόσθετα, προκειμένου να μειωθούν περαιτέρω οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και να βελτιωθεί η ενεργειακή αυτάρκεια, τα οργανικά λιπάσματα αποτελούν βιώσιμη επιλογή καθώς η συνεισφορά τους είναι πολύ χαμηλή ή μηδενική. Σχετικά με τη χρήση του αποβλήτου της αναερόβιας ζύμωσης ως εδαφοβελτιωτικό, η περιεκτικότητα του εδάφους σε άνθρακα, φώσφορο και άλλα θρεπτικά συστατικά αυξάνεται και βελτιώνεται η γονιμότητα του. Στον πυρήνα μιας αποτελεσματικής κυκλικής οικονομίας που χρησιμοποιεί τους πόρους με βιώσιμο τρόπο, τα χρήσιμα και ασφαλή επακόλουθα της αναερόβιας ζύμωσης δεν ορίζονται ως απόβλητα αλλά ως υπολείμματα που μπορούν και πρέπει να αξιοποιηθούν.

Η παραγωγή βιοαερίου είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τη σύσταση, την ποιότητα και την ποσότητα του υποστρώματος και μεταβάλλεται με οποιαδήποτε διαφοροποίηση του. Στην περίπτωση των εστιατορίων της Θάσου υπολογίζεται ότι παράγονται 2,5 χιλιάδες t τροφικών υπολειμμάτων ανά ετήσια τουριστική περίοδο, με παραγωγή βιοαερίου μέσω αναερόβιας ζύμωσης 750 χιλιάδες m3/y. Για την αξιοποίηση του, συγκρίνεται η οικονομική σκοπιμότητα δύο σεναρίων. Ανεξαρτήτως επιλογής, τα συνολικά έσοδα από την πώληση του εδαφοβελτιωτικού υπολογίζονται σε 20 χιλιάδες €/y.

Στο πρώτο σενάριο αφορά το ενδεχόμενο δημιουργίας μίας μονάδας αναερόβιας ζύμωσης στο νησί για παραγωγή και αναβάθμιση βιοαερίου. Δεδομένου ότι δεν υπάρχει δίκτυο φυσικού αερίου, το βιοαέριο θα μεταφέρεται σε πρατήριο για χρήση ως καύσιμο οχημάτων. Για τον σχεδιασμό του οικονομικού μοντέλου [29] λαμβάνονται υπόψη τα κόστη επένδυσης, η τεχνολογία αναβάθμισης (καθαρισμός με νερό), τα λειτουργικό έξοδα και το κόστος μεταφοράς των φιαλών στο κοντινότερο πρατήριο το οποίο βρίσκεται στη Θεσσαλονίκη. Το κόστος επένδυσης είναι υψηλότερο για την αναβάθμιση του βιοαερίου (1 εκ. €) ενώ κρίνεται αποθαρρυντικό το υψηλό λειτουργικό κόστος μεταφοράς (300 χιλιάδες €/y) των φιαλών CNG. Ο ακριβής υπολογισμός των εσόδων από την πώληση του CNG δεν είναι δυνατός καθώς η τιμή πώλησης μεταβάλλεται και δεν είναι ενιαία. Για τις ανάγκες του σεναρίου, τα έσοδα από την πώληση CNG βρέθηκαν κατά προσέγγιση, διαιρώντας κατά 1/3 (m^3) την διαθέσιμη τιμή πώλησης CNG και διαιρώντας το αποτέλεσμα με την πυκνότητα του CNG. Προκύπτει τελικά το ετήσιο ποσό των 317 χιλιάδων €.

Το δεύτερο σενάριο αφορά την ανάκτηση ενέργειας και παραγωγή εδαφοβελτιωτικού μέσω αναερόβιων αντιδραστήρων τύπου κοντέινερ. Δεδομένου της μικρής δυναμικότητας αυτού του τύπου αντιδραστήρων, απαιτούνται 14 συστήματα για τη διαχείριση των 2,5 χιλιάδων t τροφικών υπολειμμάτων. Για την ανάκτηση και αξιοποίηση της ενέργειας διατίθενται δύο επιλογές. Η πρώτη περιλαμβάνει μονάδα ΣΗΘ για παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας ενώ η δεύτερη περιλαμβάνει καυστήρα βιοαερίου για χρήσης στις εστίες κουζινών των εστιατορίων. Με βάση τα στοιχεία του κατασκευαστή [30] και την τιμή πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας, για την περίπτωση της ΣΗΘ τα έσοδα από την πώληση ηλεκτρικής ενέργειας υπολογίζεται σε 600 χιλιάδες €/y ενώ τα έσοδα από την παραγωγή θερμότητας υπολογίζονται σε 157 χιλιάδες €/y και 260 χιλιάδες για την δεύτερη περίπτωση. Αντίστοιχα το κόστος επένδυσης αγγίζει τα 4 εκ. € στην πρώτη περίπτωση και τα 3,4 εκ. € στην δεύτερη συμπεριλαμβάνοντας το κόστος μετατροπής και σύνδεσης των κουζινών στο σύστημα αερίου. Τα λειτουργικά κόστη σε κάθε περίπτωση είναι εξαιρετικά χαμηλά. Σημειώνεται ότι τα συστήματα αυτά απαιτούν μόνο ετήσια συντήρηση και στοιχειώδη επίβλεψη όμως πρέπει να διασφαλίζεται ότι στο υπόστρωμα δεν θα παρεμβληθούν ξένα υλικά ή μεγάλα κόκαλα.



Διαγράμματα 1 και 2: Συγκριτική αξιολόγηση σεναρίων

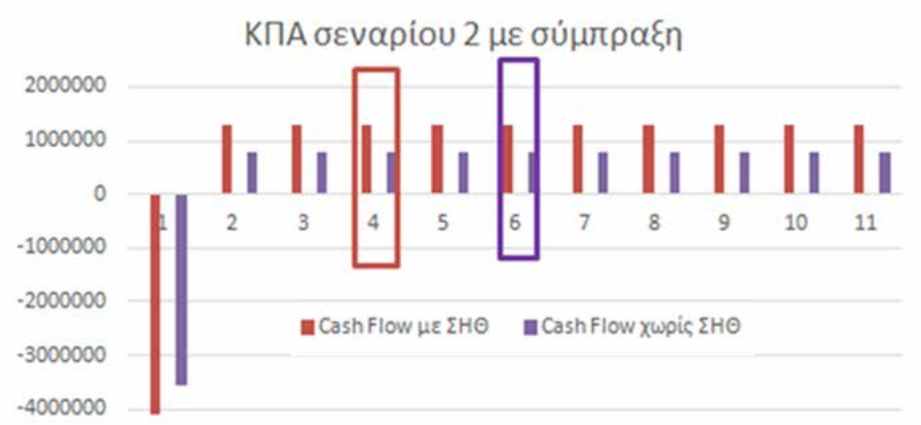
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Συγκριτικά, το κόστος επένδυσης του πρώτου σεναρίου είναι μικρότερο λαμβάνοντας υπόψη ότι για το δεύτερο σενάριο απαιτούνται 14 μονάδες. Αντιθέτως, το κόστος λειτουργίας για το δεύτερο σενάριο είναι κατά πολύ η χρήση του βιοαερίου γίνεται άμεσα εντός του νησιού χωρίς επιπρόσθετα κόστη αναβάθμισης, αποθήκευσης και μεταφοράς σε μεγάλες αποστάσεις (Διαγράμματα 1 και 2).

Η Καθαρή Παρούσα Αξία (ΚΠΑ) είναι το άθροισμα των παρουσών αξιών των εισερχόμενων και εξερχόμενων ταμειακών ροών, χρησιμοποιώντας το κατάλληλο προεξοφλητικό επιτόκιο (5%), κατά τη διάρκεια μιας χρονικής περιόδου (15 έτη) και καθορίζει αν επένδυση κάποιου εκ των δύο σεναρίων κρίνεται συμφέρουσα.

Για το πρώτο σενάριο, λαμβάνοντας υπόψη το συνολικό επενδυτικό κόστος, τα έσοδα από την πώληση εδαφοβελτιωτικού και καυσίμου CNG (και τα έσοδα από τέλος ταφής σε ΧΥΤΑ σε περίπτωση σύμπραξης) και αφαιρώντας τα λειτουργικά έξοδα για κάθε έτος λειτουργίας της επένδυσης (έτη 1-15), προκύπτει ότι η ΚΠΑ είναι αρνητική με έλλειμμα ύψους περίπου 3 εκ. €. Αρνητική ΚΠΑ σημαίνει ότι η επένδυση δεν είναι σκόπιμη καθώς μέσω των χαμηλών εσόδων σε σχέση με τα έξοδα και το αρχικό κόστος της επένδυσης, δεν αποτελεί εφικτή οικονομική λύση διαχείρισης των τροφικών αποβλήτων.

Για το δεύτερο σενάριο το κόστος επένδυσης περιλαμβάνει το κόστος μετατροπής των εστιών των εστιατορίων και σύνδεσης μέσω αγωγών καθώς και το κόστος εγκατάστασης. Οι ετήσιες χρηματικές ροές περιλαμβάνουν τα έσοδα από την πώληση εδαφοβελτιωτικού, τα έσοδα από την παραγωγή θερμότητας, το όφελος των εστιατορίων και τα λειτουργικά έξοδα. Στην περίπτωση με ΣΗΘ, στις χρηματικές ροές προστίθεται τα έσοδα από την πώληση ηλεκτρικής ενέργειας. Ενώ σε περίπτωση συνεργασίας ιδιωτικού και δημόσιου τομέα, προστίθενται και τα έσοδα μη ταφής αποβλήτων σε ΧΥΤΑ. Σε κάθε περίπτωση, οι ΚΠΑ προκύπτουν θετικές και επιβεβαιώνουν την οικονομική σκοπιμότητα της επένδυσης. Σε περίπτωση μη συνεργασίας μεταξύ του ιδιωτικού και του δημόσιου τομέα, η διαφορά στις ΚΠΑ είναι μικρή ανάμεσα στη χρήση ΣΗΘ και λέβητα. Όπως είναι αναμενόμενο, στα πλαίσια της κυκλικής οικονομίας η συνεργασία των τομέων επιφέρει το υψηλότερο οικονομικό όφελος. Αναφορικά με τον χρόνο αποπληρωμής των επενδύσεων, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 3 και , σε περίπτωση μη σύμπραξης η αποπληρωμή γίνεται στο πέμπτο έτος σε περίπτωση ΣΗΘ και στο έβδομο έτος σε περίπτωση λέβητα.



Διάγραμμα 3: ΚΠΑ δευτέρου σεναρίου

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το βιοαέριο μπορεί να οδηγήσει στην παραγωγή ανανεώσιμου φυσικού αερίου και να εξασφαλίσει ενεργειακή επάρκεια στην Ευρώπη αντικαθιστώντας το εισαγόμενο ΦΑ σε ποσοστό 10-30 % σε χρονικό ορίζοντα 2030-2050.

Όπως προκύπτει από τα δύο σενάρια, δεν είναι οικονομικά σκόπιμη η παραγωγή βιοαερίου και η εν συνεχεία αναβάθμιση, αποθήκευση και μεταφορά του για χρήση ως καύσιμο οχημάτων για τα τροφικά υπολείμματα των επιχειρήσεων εστίασης της Θάσου. Το πολύ υψηλό λειτουργικό κόστος που ανέρχεται σε 560 χιλιάδες €/έτος, έρχεται σε αντιδιαστολή με το σχετικά χαμηλό κόστος επένδυσης των 2,3 εκ. €. Αυτό προκύπτει από το υψηλό κόστος μεταφοράς στου καυσίμου CNG σε φιάλες σε μακρινή απόσταση από το νησί.. Τα έσοδα που προέρχονται από την πώληση του εδαφοβελτιωτικού και του καυσίμου ανέρχονται σε 338 χιλιάδες €/έτος, δεν επαρκούν για να αντισταθμίσουν τα έξοδα λειτουργίας. Σε μεγαλύτερο νησί με περισσότερες επιχειρήσεις εστίασης (π.χ. Ρόδος, Κρήτη) άρα και μεγαλύτερη παραγωγή τροφικών υπολειμμάτων, είναι πιο πιθανό να είναι η επένδυση οικονομικά βιώσιμη.

Αντιθέτως, η παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμικής ενέργειας μέσω πολλαπλών συστημάτων αναερόβιων αντιδραστήρων, αποτελεί βιώσιμη πρακτική ιδιαίτερα όταν υπάρχει συνεργασία ιδιωτικού και δημόσιου τομέα δηλαδή επιχειρηματιών εστίασης και του Δήμου, στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας. Το κόστος επένδυσης είναι υψηλό καθώς απαιτούνται 14 μονάδες για τις ανάγκες των 268 εστιατορίων του νησιού και ανέρχεται στα 3,5 εκ. € για την ανάκτηση θερμικής ενέργειας και στα 4 εκ. € για αξιοποίηση μέσω συνδυασμένης μονάδας ηλεκτρισμού και θερμότητας. Επιπλέον, τα συστήματα αυτά δεν απαιτούν συστηματικό έλεγχο παρά μόνο βασική εκπαίδευση του προσωπικού που διαχειρίζεται τα απόβλητα. Το ετήσιο λειτουργικό κόστος των μονάδων είναι 63 χιλιάδες €, εξαιρετικά χαμηλό σε σχέση με του πρώτου σεναρίου. Τα ετήσια συνολικά έσοδα σε περίπτωση σύμπραξης τομέων ανέρχονται σε 1,3 εκ. € με αποπληρωμή της επένδυσης στο τέταρτο έτος για συστήματα με ΣΗΘ ή σε 780 χιλιάδες € και αποπληρωμή σε 6 έτη για συστήματα με καυστήρα. Η ποσότητα των τροφικών υπολειμμάτων που προέρχονται από τουριστικές επιχειρήσεις και αποτελούν το υπόστρωμα για την αναερόβια ζύμωση, μειώνουν σημαντικά την ποσότητα που καταλήγει στον ΧΥΤΑ με ανάλογο οικονομικό όφελος. Επομένως, αποτελεί ελκυστική επενδυτική λύση για τη διαχείριση των τροφικών υπολειμμάτων του νησιού.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Banks, C.J., Heaven, S., Zhang, Y., Baier, U. (2018). Food waste digestion: Anaerobic Digestion of Food Waste for a Circular Economy. Murphy, J.D. (Ed.) IEA Bioenergy Task 37, 2018: 12.

[2] Autret, E., Berthier, F., Luszezanec, A., Nicolas, F., (2007). Incineration of municipal and assimilated wastes in France: assessment of latest energy and material recovery performances. J. Hazard. Mater. 139 , 569–574.

[3] McKendry, P., (2002). Energy production from biomass (Part 2): conversion technologies. Bioresour. Technol. 83, 47–54.

[4] Berge, N.D., Ro, K.S., Mao, J., Flora, J.R., Chappell, M.A., Bae, S., (2011). Hydrothermal carbonization of municipal waste streams. Environ. Sci. Technol. 45 (13), 5696–5703.

[5] Kim, J.H., Lee, J.C., Pak, D., (2011). Feasibility of producing ethanol from food waste. Waste Manage., 2121–2125.

[6] Singhai, Y., Bansal, S.K., Singh, R., (2012). Evaluation of biogas production from solid waste using pretreatment method in anaerobic condition. Int. J. Emerg. Sci. 2, 405–414.

[7] Production of bioenergy and biochemicals from industrial and agricultural wastewater, (2004) Largus T. Angenent, Khursheed Karim, Muthanna H. Al-Dahhan,Brian A.Wrenn,Rosa Domíguez-Espinosa .

[8] Katami, T., Yasuhara, A., Shibamoto, T., 2004. Formation of dioxins from incineration of foods found in domestic garbage. Environ. Sci. Technol. 38, 1062–1065

[9] WHO, 2007. Population, Health and Waste Management: Scientific Data and Policy Options. Report of a WHO Workshop, 29–30 March 2007, Rome, Italy

[10] Mardikar, S.H., Niranjan, K., 1995. Food processing and the environment. Environ. Manage. Health 6 (3), 23–26

[11] Higman, C., van der Burgt, M., 2008. Gasification, second ed. Gulf Professional Publishing, UK

[12] Libra, J.A., Ro, K.S., Kammann, C., Funke, A., Berge, N.D., Neubauer, Y., Titirici, M.-M., Fóhner, C., Bens, O., Kern, J., Emmerich, K.-H., 2011. Hydrothermal carbonization of biomass residuals: a comparative review of the chemistry, processes and applications of wet and dry pyrolysis. Biofuels 2, 71–106

[13] Hoekman, S.K., Broch, A., Robbins, C., 2011. Hydrothermal carbonization (HTC) of lignocellulosic biomass. Energy Fuel 25 (4), 1802–1810

[14] Li, L., Diederick, R., Flora, J.R., Berge, N.D., 2013. Hydrothermal carbonization of food waste and associated packaging materials for energy source generation. Waste Manage. 33 (11), 2478–2492

[15] Huff, M.D., Kumar, S., Lee, J.W., 2014. Comparative analysis of pinewood, peanut shell, and bamboo biomass derived biochars produced via hydrothermal conversion and pyrolysis. J. Environ. Manage. 146, 303–308

[16] Hwang, I.H., Aoyama, H., Matsuto, T., Nakagishi, T., Matsuo, T., 2012. Recovery of solid fuel from municipal solid waste by hydrothermal treatment using subcritical water. Waste Manage. 32 (3), 410–416

[17] Pala, M., Kantarli, I.C., Buyukisik, H.B., Yanik, J., 2014. Hydrothermal carbonization and torrefaction of grape pomace: a comparative evaluation. Bioresour. Technol. 161

[18] Parshetti, G.K., Chowdhury, S., Balasubramanian, R., 2014. Hydrothermal conversion of urban food waste to chars for removal of textile dyes from contaminated waters. Bioresour. Technol. 161, 310–319

[19] Libra, J.A., Ro, K.S., Kammann, C., Funke, A., Berge, N.D., Neubauer, Y., Titirici, M.-M., Fóhner, C., Bens, O., Kern, J., Emmerich, K.-H., 2011. Hydrothermal carbonization of biomass residuals: a comparative review of the chemistry, processes and applications of wet and dry pyrolysis. Biofuels 2, 71–106.

[20] Arapoglou, D., Varzakas, T., Vlyssides, A., Israilides, C., 2010. Ethanol production from potato peel waste (PPW). Waste Manage. 30 (10), 1898–1902

[21] Ma, J., Duong, T.H., Smits, M., Verstraete, W., Carballa, M., 2011. Enhanced biomethanation of kitchen waste by different pre-treatments. Bioresour. Technol. 592–599

[23] Karagiannidis, A., Perkoulidis, G., 2009. A multi-criteria ranking of different technologies for the anaerobic digestion for energy recovery of the organic fraction of municipal solid wastes. Bioresour. Technol. 100 (8), 2355–2360

[24] Kougias, P., Boe, K., Tsapekos, P., Angelidaki, I., (2014). Foam suppression in overloaded manure-based biogas reactors using antifoaming agents. Bioresour. Technol. 153,198–205.

[25] Lindorfer, H., Demmig, C., (2016). Foam formation in biogas plants – a survey on causes and control strategies. Chem. Eng. Technol. 39, 620–626.

[26] Banks, C., Zhang, Y., Jiang, Y., Heaven, S., 2012. Trace element requirements for stable food waste digestion at elevated ammonia concentrations. Bioresour. Technol. 104,127–135.

[27] Satari, B., Karimi, K., Kumar, R., (2019) Cellulose solvents-based pretreatment for enhanced second-generation biofuels production: A review, Sustainable Energy & Fuels, 3, 11-62.

[28] Zhang, L., Loh, K.-C., Zhang, J. (2018). Enhanced biogas production from anaerobic digestion of solid organic wastes: Current status and prospects. Bioresource Technology Reports.

[29] https://seabenergy.com/products/anaerobic-digesters/ (Τελευταία πρόσβαση: 12/2020).

[30] Περκουλίδης Γ., 2020, Προσωπική επικοινωνία με SEaB Energy.

ΑΠΟ ΤΟ ΚΤΙΡΙΟ ΣΤΟ ΚΤΙΡΙΑΚΟ ΑΠΟΘΕΜΑ: ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ ΤΟΥ ΚΤΙΡΙΑΚΟΥ ΑΠΟΘΕΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΠΟΛΗΣ ΤΩΝ ΑΘΗΝΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΤΗΣ ΣΕ ΠΟΛΗ ΟΥΔΕΤΕΡΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ

Ελευθερία Αλεξανδρή[1]

[1] Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Πάροδος Αριστοτέλους 18, 26335 Πάτρα
e-mail: el_alexandri@yahoo.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Με τη Συμφωνία του Παρισιού, οι πόλεις καλούνται να μετατραπούν σε πόλεις ουδέτερου άνθρακα έως το 2050. Ο φιλόδοξος αυτός στόχος πρέπει να υποστηρίζεται από αποδοτικές δράσεις, ιεραρχημένες με τέτοιο τρόπο, ώστε να επιτευχθεί η απεξάρτηση των πόλεων από την οικονομία του άνθρακα σε χρονικό ορίζοντα 30 ετών.

Το συγκεκριμένο άρθρο εξετάζει τι πρέπει να υλοποιηθεί και με ποια χρονική σειρά, ώστε να μηδενιστούν οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από τον αστικό κτιριακό τομέα. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζονται τα μέτρα εξοικονόμησης ενέργειας που θα πρέπει να ληφθούν στο κτιριακό απόθεμα του Δήμου της Αθήνας, προκειμένου να επιτευχθεί ο συγκεκριμένος στόχος. Ξεκινώντας με την ενεργειακή καταγραφή της υφιστάμενης κατάστασης του κτιριακού αποθέματος της πόλης και τις πραγματικές ενεργειακές του καταναλώσεις, εξετάζονται και ιεραρχούνται σενάρια εξοικονόμησης ενέργειας για τις διάφορες χρήσεις κτιρίων, συναρτήσει των τεχνικών χαρακτηριστικών τους, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, την εξοικονόμηση ενέργειας, την απόσβεση της ενσωματωμένης ενέργειας των στοιχείων που τοποθετούνται για την ενεργειακή αναβάθμιση των κτιρίων (δομικών υλικών, τόσο συμβατικών, όσο και «οικολογικών», Η/Μ συστημάτων και φωτοβολταϊκών στοιχείων) καθώς και τον αντίκτυπό τους στο φαινόμενο θερμικής νήσου, το αρχικό κόστος της επένδυσης και την απόσβεσή της.

Μέσω της δυναμικής θεώρησης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από την ηλεκτροπαραγωγή, αναδεικνύονται με ανάλυση κόστους – οφέλους οι δράσεις που μπορούν να αποφέρουν σημαντική μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, με χαμηλού κόστους υπάρχουσες τεχνολογίες, ώστε να είναι εύκολα πολλαπλασιάσιμες και πρακτικά εφαρμόσιμες στο κτιριακό απόθεμα της πόλης.

Μέσω πολυκριτηριακής ανάλυσης οι δράσεις αυτές ιεραρχούνται, προσφέροντας ένα ορθολογικό διάγραμμα χρονικής επιλογής μέτρων για την ενεργειακή αναβάθμιση του κτιριακού αποθέματος του Δήμου Αθηναίων, ώστε με το χαμηλότερο κόστος να επιλεγούν αποδοτικές δράσεις, με μικρό χρόνο απόσβεσης ενσωματωμένης ενέργειας. Μέσω της συγκεκριμένης έρευνας δίνονται κατευθύνσεις για τις στρατηγικές χρηματοδότησης ενεργειακής αναβάθμισης του κτιριακού αποθέματος που θα πρέπει να ακολουθηθούν, ώστε να επιτευχθεί ο συγκεκριμένος στόχος.

Λέξεις Κλειδιά: κτίριο μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας, ενσωματωμένη ενέργεια, πόλη ουδέτερου άνθρακα, πολυκριτηριακή ανάλυση, Multi Attribute Utility Theory

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι πόλεις που συμμετέχουν στο Σύμφωνο των Δημάρχων έχουν δεσμευτεί για σύνταξη ή αναθεώρηση υφιστάμενων στρατηγικών για το κλίμα, που να οδηγούν σε μηδενισμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου της πόλης τους έως το 2050 [1]. Καθώς ο κτιριακός τομέας (μέρος των «σταθερών» πηγών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου) κατέχει μεγάλο μέρος στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου των περισσότερων πόλεων (Εικόνα 1), η ενεργειακή αναβάθμιση του κτιριακού αποθέματος κατέχει κομβικό ρόλο στη στρατηγική που έχουν συντάξει οι πόλεις για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου ανά τον κόσμο, τόσο σε βόρεια, όσο και σε νότια κλίματα [2],[3],[4],[5]. Παρόλα αυτά, στα σχέδια δράσης των πόλεων, περιγράφονται γενικά οι δράσεις ενεργειακής αναβάθμισης των κτιρίων, χωρίς να εστιάζουν σε συγκεκριμένες προτεραιότητες για της επίτευξη των στόχων.

Ο Δήμος Αθηναίων, συμμετέχοντας ενεργά στο Σύμφωνο των Δημάρχων, έχει εγκρίνει από το 2017 [6] σχέδιο δράσης για το κλίμα που προβλέπει τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά 40% έως το 2030 [7], ενώ βρίσκεται σε διαδικασία αναθεώρησης του υπάρχοντος σχεδίου σε νέο στόχο, μηδενικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου έως το 2050. Με τις δράσεις που λαμβάνουν χώρα τόσο σε εθνικό, όσο και σε δημοτικό επίπεδο, έχει επιτύχει έως τώρα τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τις δραστηριότητες που λαμβάνουν χώρα εντός των διοικητικών του ορίων κατά 20.5%, σε σχέση με το έτος βάσης (2014) [8]. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1, βάσει της τελευταίας απογραφής των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, παρουσιάζει 5tn CO_2e κατά κεφαλήν –αρκετά λιγότερες από τη Βενετία ή το Τελ Αβίβ, αλλά αρκετά μεγαλύτερες σε σχέση με άλλες πόλεις της νότιας Ευρώπης, όπως η Ρώμη, η Μαδρίτη ή η Βαρκελώνη. Καθώς ο κτιριακός τομέας παίζει πολύ μεγάλο ρόλο στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου της πόλης (Εικόνες 1 και 4β), στόχος του συγκεκριμένου άρθρου είναι να ιεραρχήσει τις δράσεις ενεργειακής αναβάθμισης του αθηναϊκού κτιριακού αποθέματος, με περιβαλλοντικά και οικονομικά κριτήρια, ώστε να προταθεί ένα εφικτό πλάνο μηδενισμού των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τον κτιριακό τομέα έως το 2050.

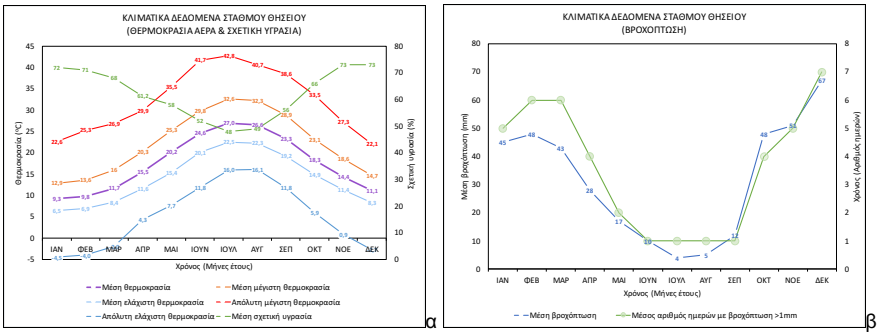
Εικόνα 1: Κατά κεφαλήν εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου για διάφορες ευρωπαϊκές πόλεις για το 2018 (τελευταίο έτος απογραφής) [9]. Με πράσινο σημειώνονται οι πόλεις του Νότου.

2. ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

2.1. Κλιματικά δεδομένα - τάσεις

Ο Δήμος Αθηναίων βρίσκεται σε υψόμετρο περί τα 130m πάνω από τη στάθμη της θάλασσας, σε γεωγραφικό πλάτος 38° και μήκος 24°, στο κέντρο της Μητροπολιτικής Αθήνας, στο λεκανοπέδιο Αττικής και καταλαμβάνει 39 km^2. Ως προς τη μορφολογία, περιβάλλεται από τέσσερις ορεινούς όγκους, με τη θάλασσα να βρίσκεται στα νότιά του. Το κλίμα της Αθήνας χαρακτηρίζεται ως υποτροπικό, μεσογειακό, με παρατεταμένα θερμά και ξηρά καλοκαίρια και ήπιους χειμώνες, με μέτρια βροχόπτωση. Η μέση ετήσια θερμοκρασία είναι 17.7°C, βάσει του μετεωρολογικού σταθμού του Θησείου (Εικόνα 2) [7]. Το φαινόμενο αστικής θερμικής νησίδας είναι έντονο στην Αθήνα και τους όμορους δήμους, ενώ στις παραθαλάσσιες περιοχές οι θερμοκρασίες τείνουν να είναι πιο ήπιες τη θερινή περίοδο (Εικόνα 4α). Η μέση ετήσια θερμοκρασία στην Αθήνα έχει αυξητική τάση ήδη από τη

δεκαετία του 1970: από το 1970 έως το 2011 είχε ήδη αυξηθεί κατά 1.3°C [7]. Εντονότερη όμως είναι η αυξητική τάση που εμφανίζεται κατά τη θερινή περίοδο: η μέση μέγιστη θερμοκρασία αυξάνεται κατά 3.2°C (1976-2008) και η μέση ελάχιστη (νυκτερινή) θερμοκρασία κατά 3.3°C (1984-2008) [10]. Παρόμοια τάση ακολουθεί και η εμφάνιση καυσώνων, οι οποίοι δείχνουν να είναι συχνότεροι και με μεγαλύτερη ένταση [10]. Όπως επισημαίνει η ίδια έκθεση, οι μεταβολές του κλίματος της Αθήνας τις τελευταίες δεκαετίες είναι ιδιαίτερα έντονες, ως αποτέλεσμα της συνδυασμένης επίδρασης διαφόρων παραγόντων, κυρίως ανθρωπογενών, που αφορούν την εντεινόμενη αστικοποίηση, την καταστροφή του περιαστικού πρασίνου από δασικές πυρκαγιές, την παγκόσμια ανθρωπογενή κλιματική μεταβολή, καθώς και τη φυσική μεταβλητότητα του κλίματος. Παλαιότερες μετρήσεις (π.χ. [11]) είχαν δείξει έντονη ένταση σχετικά με το φαινόμενο θερμικής νήσου στην Αθήνα· της τάξης των 8°C τη θερινή περίοδο. Πιο πρόσφατες έρευνες, που βασίζονται τόσο σε μετρήσεις θερμοκρασίας αέρα, όσο και σε παρατηρήσεις επιφανειακών θερμοκρασιών από δορυφόρους δείχνουν πιο μικρή ένταση θερμικής νήσου (της τάξης των 4°C) που εμφανίζεται κυρίως τις νυχτερινές ώρες, λόγω της αυξημένης θερμοχωρητικότητας των δομικών υλικών [12]. Σε αντίθεση, πολλές περιοχές του Δήμου Αθηναίων είναι πιο δροσερές κατά τη διάρκεια της ημέρας, σε σχέση με όμορους Δήμους [12], [13] (Εικόνα 4α). Εκτός λοιπόν της επιλογής υλικών με χαμηλή απορροφητικότητα στην ηλιακή ακτινοβολία, θα πρέπει να δίνεται μέριμνα για μείωση της άσκοπης χρήσης υλικών με μεγάλη θερμοχωρητικότητα στους κοινόχρηστους χώρους και στις εξωτερικές επιφάνειες κτιρίων, τη σκίαση και την αύξηση της βλάστησης και του υγρού στοιχείου, τόσο σε επίπεδο κτιρίων, όσο και σε επίπεδο κοινόχρηστων χώρων, ώστε να μειώνεται η εκτεθειμένη επιφάνεια με μεγάλη θερμοχωρητικότητα. Η εξωτερική θερμομόνωση του κτιριακού αποθέματος καθώς και των νέων κτιρίων, αν γίνει σε μεγάλη κλίμακα, μπορεί να βοηθήσει αποτελεσματικά όχι μόνο στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας του κτιρίου, αλλά και στη μείωση της θερμοχωρητικότητας του δομημένου περιβάλλοντος και της νυχτερινής έντασης της θερμικής νήσου, με συνέπεια τον πιο αποτελεσματικό νυχτερινό δροσισμό των κτιρίων (κι έτσι περαιτέρω μείωση του ψυκτικού φορτίου) και παράλληλα τη βελτίωση της αίσθησης θερμικής άνεσης στον κοινόχρηστο, αστικό χώρο.

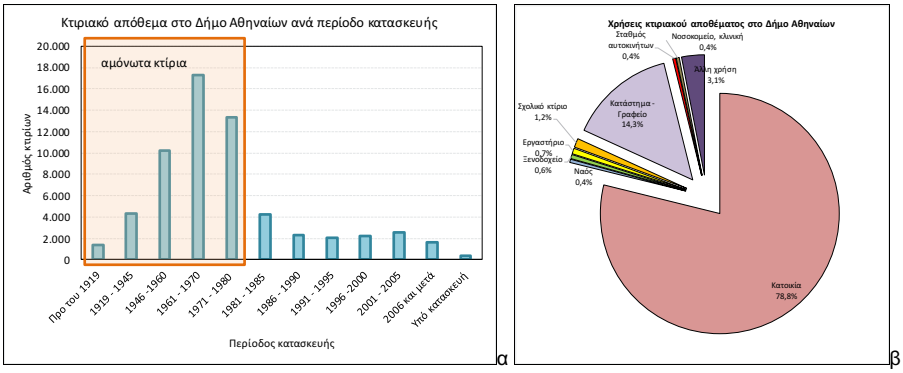


Εικόνα 2: (α) Μέση, μέση μέγιστη, απόλυτη μέγιστη, μέση ελάχιστη, απόλυτη ελάχιστη θερμοκρασία και μέση σχετική υγρασία και (β) Μέση βροχόπτωση και μέσος αριθμός ημερών με βροχόπτωση στο μετεωρολογικό σταθμό του Θησείου (πηγή στοιχείων: [7])

2.2. Κτιριακό απόθεμα – εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου

Βάσει της τελευταίας απογραφής [14], το 75% του κτιριακού αποθέματος του Δήμου είναι χτισμένο πριν τον Κανονισμό Θερμομόνωσης (1979), δηλαδή είναι αρκετά παλαιό, ενώ δεν διαθέτει κανενός είδους θερμική θωράκιση (Εικόνα 3α), εκτός ελάχιστων εξαιρέσεων, στις οποίες έχει γίνει ενεργειακή αναβάθμιση. Το κτιριακό απόθεμα είναι υπεύθυνο για το 61% των συνολικών ισοδύναμων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα του Δήμου [8] (Εικόνα 4β). Οι κατοικίες αποτελούν το 79% του κτιριακού αποθέματος του Δήμου (Εικόνα 3β). Η πλειοψηφία αυτών (60%) είναι πολυκατοικίες (άνω των 3 ορόφων) [14]. Η μείωση του εισοδήματος, σε συνάρτηση με τις αυξημένες ανάγκες κατανάλωσης ενέργειας για την επίτευξη της αίσθησης θερμικής άνεσης στην πλειοψηφία των Ελληνικών κατοικιών, οδηγεί σε ενεργειακή φτώχεια. Χαρακτηριστικά, το 35.6% των Ελληνικών νοικοκυριών δεν μπορούσε να πληρώσει εμπρόθεσμα τους λογαριασμούς ΔΕΚΟ το 2018, κατατάσσοντας τα Ελληνικά νοικοκυριά πρώτα στην Ευρώπη ως προς αυτή την αδυναμία [15]. Έχει εκτιμηθεί ότι το 26% των αθηναϊκών κατοικιών αντιμετωπίζουν ενεργειακή φτώχεια [16]. Παρόλου του όγκου τους, οι κατοικίες ευθύνονται μόνο για το 29% των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τις δραστηριότητες που λαμβάνουν χώρα στο Δήμο, ενώ, τα μικρότερα σε επιφάνεια κτίρια του τριτογενούς τομέα ευθύνονται για το 37%

[8] (Εικόνα 4β). Αν η ενεργειακή φτώχεια συνεχίζει να αντιμετωπίζεται μόνο με οικονομικούς όρους (π.χ. επιδοτήσεις) κι όχι και με τεχνολογικούς (π.χ. χρηματοδότηση επεμβάσεων εξοικονόμησης ενέργειας, ιδιαίτερα στα νοικοκυριά που πλήττονται από ενεργειακή φτώχεια), εκτιμάται ότι οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από το κτιριακό απόθεμα της πόλης θα αυξηθούν, όταν βελτιωθεί οικονομική κατάσταση. Προκειμένου λοιπόν να μειωθούν οι ισοδύναμες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα από το Δήμο Αθηναίων, με παράλληλη βελτίωση του βιοτικού επιπέδου και αντιμετώπιση της φτώχειας, θα πρέπει να γίνει στόχευση σε έργα εξοικονόμησης ενέργειας που αφορούν τις μεγάλες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου στον κτιριακό τομέα και συγκεκριμένα στις κατοικίες και στα ιδιωτικά κτίρια τριτογενούς τομέα, που βάσει της υφιστάμενης νομοθεσίας, δεν βρίσκονται στην αρμοδιότητα του Δήμου. Στοχευμένη χρηματοδότηση δράσεων που μπορούν να αποφέρουν αξιοσημείωτη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, με σχετικά χαμηλό κόστος, ώστε να είναι εύκολα πολλαπλασιάσιμες, μπορεί να βοηθήσει το Δήμο στην μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου της πόλης, κάτι που εξετάζει και το συγκεκριμένο άρθρο.



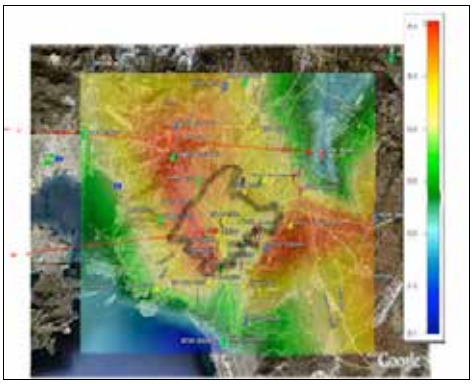
Εικόνα 3: Κτιριακό απόθεμα Δήμου Αθηναίων (α) ανά περίοδο κατασκευής και (β) ανά χρήση (πηγή στοιχείων: [14])

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

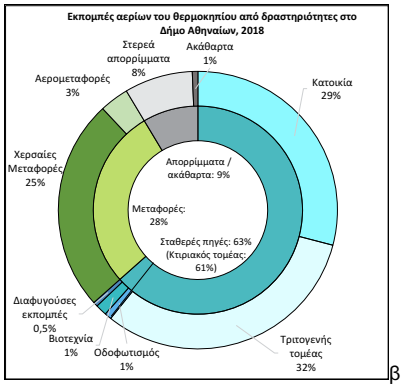
Προκειμένου να ιεραρχηθούν οι επεμβάσεις εξοικονόμησης ενέργειας που μπορεί να επιφέρουν μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου με οικονομικά αποδοτικό τρόπο, εκπονείται πολυκριτηριακή ανάλυση για την ιεράρχηση των επεμβάσεων εξοικονόμησης ενέργειας. Η ιεράρχηση των σεναρίων γίνεται με τη Multi Attribute Utility Theory, βάσει της [17], ενώ λαμβάνονται τα ίδια βάρη σταθμίσεων για κάθε κριτήριο. Τα κριτήρια επιλέχθηκαν ώστε να αντιπροσωπεύουν τους Στόχους Βιώσιμης Ανάπτυξης (ΣΒΑ) των Ηνωμένων Εθνών [18], που αφορούν τα κτίρια και τις τεχνικές επεμβάσεις εξοικονόμησης ενέργειας σε αυτά. Για κάθε επιλεγμένο ΣΒΑ αντιστοιχούνται ένα ή περισσότερα κριτήρια, ενώ κάθε κριτήριο εκφράζεται από ένα ποσοτικοποιήσιμο δείκτη: η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας για το ΣΒΑ12 «Υπεύθυνη Κατανάλωση και Παραγωγή», η μείωση των ισοδύναμων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου καθώς και η απόσβεση της ενσωματωμένης ενέργειας για το ΣΒΑ13 «Δράση για το Κλίμα», η μείωση της αστικής θερμοχωρητικότητας για το ΣΒΑ11 «Βιώσιμες Πόλεις και Κοινότητες», η μείωση του λειτουργικού κόστους για το ΣΒΑ1 «Εξάλειψη της φτώχειας» και τέλος, για το ΣΒΑ8 «Αξιοπρεπής δουλειά και οικονομική ανάπτυξη», το αρχικό κόστος του τεχνικού έργου και η περίοδος αποπληρωμής του. Η μεθοδολογία για την ποσοτικοποίηση του κάθε δείκτη εξαρτάται από τη φύση του δείκτη και φαίνεται στον Πίνακα 1. Ιδιαίτερα για τη μεταβολή των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από την ηλεκτροπαραγωγή, θεωρήθηκε γραμμική φθίνουσα συνάρτηση, βάσει των υπαρχόντων χρονοσειρών καθώς και των εθνικών στόχων για το 2030 [19], όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.

Για την εξέταση σεναρίων εξοικονόμησης ενέργειας, επιλέχθηκαν δύο κτιριακοί τύποι, ένας διαμερίσματος για την κατοικία και ένας γραφείων για τον τριτογενή τομέα, ως τυπικοί τύποι των δύο αυτών χρήσεων. Τα χαρακτηριστικά των δύο αυτών εξεταζόμενων, τυπικών κτιρίων παρουσιάζονται στις παραγράφους 3.1 και 3.2, αντίστοιχα. Καθώς η θεώρηση ενός τυπικού κτιρίου επηρεάζει τα αποτελέσματα σχετικά με την ενεργειακή κατανάλωση και την αποτελεσματικότητα των διάφορων τεχνικών εξοικονόμησης ενέργειας, μπορεί να παρουσιάζει αποκλίσεις για το σύνολο του κτιριακού

αποθέματος [20], είναι όμως από τις πλέον διαδεδομένες μεθοδολογίες, προκειμένου να διεξαχθούν γενικά συμπεράσματα για τη χάραξη στρατηγικής ως προς τα μέτρα εξοικονόμησης ενέργειας από τον κτιριακό τομέα [21] και την ιεράρχησή τους.



α

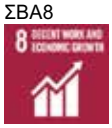


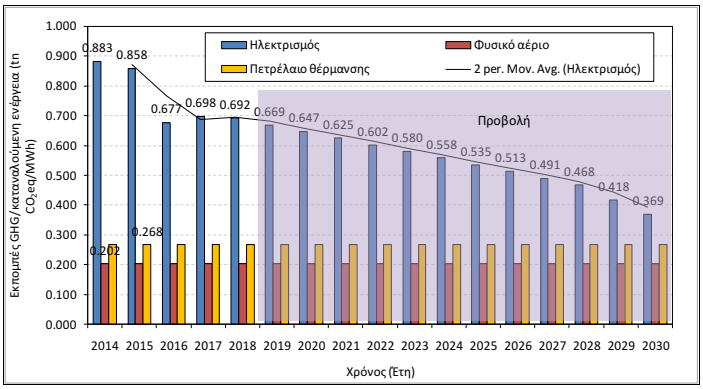
β

Εικόνα 4: (α) Θερμοκρασίες αέρα στη ευρύτερη περιοχή της Αθήνας, στις 18.07.2009, στις 11:00π.μ. (προσαρμογή από: [13]). Παρατηρείται ότι ο Δήμος Αθηναίων εμφανίζει αυξημένες θερμοκρασίες στη 2η και στην 3η ΔΚ, κυρίως σε περιοχές με μειωμένο πράσινο, κι όχι στο κέντρο του, ενώ αντίστοιχα αυξημένες θερμοκρασίες παρατηρούνται και στους όμορους Δήμους. (β) Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου ανά πηγή για το έτος 2018 (προσαρμογή από: [8]).

Πίνακας 1. Κριτήρια εξέτασης σεναρίων εξοικονόμησης ενέργειας στο κτιριακό απόθεμα του Δήμου Αθηναίων, αντίστοιχοι δείκτες και μεθοδολογία εκτίμησης / ποσοτικοποίησής τους

Τύπος κριτηρίων	ΣΒΑ Ηνωμένων Εθνών	Κριτήριο	Δείκτης / Μονάδες	Μεθοδολογικό εργαλείο
Περιβαλλοντικά	ΣΒΑ12	Μείωση κατανάλωσης συμβατικής ενέργειας	Εξοικονόμηση ενέργειας (%)	ΤΕΕ ΚΕΝΑΚ v.1.31.1.9
	ΣΒΑ13	Κλιματική αλλαγή	Μείωση ισοδύναμων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (%)	Υπολογισμός αερίων του θερμοκηπίου (CO_2, CH_4, NO_2), βάσει των συντελεστών από [22] για ορυκτά καύσιμα και [23] για ηλεκτροπαραγωγή (βλ. Εικόνα 5)
	ΣΒΑ11	Μείωση έντασης θερμικής νήσου τη νυχτερινή περίοδο	Μείωση θερμοχωρητικότητας στην πόλη	Ύπαρξη εξωτερικής θερμομόνωσης [Ναι / Όχι], δηλ. εισαγωγή [‘1’ / ‘0’] στους υπολογισμούς
	ΣΒΑ13	Ενσωματωμένη ενέργεια	Απόσβεση ενσωματωμένης ενέργειας (έτη)	Απλή περίοδος αποπληρωμής, σύμφωνα με τους [24]

Τύπος κριτηρίων	ΣΒΑ Ηνωμένων Εθνών	Κριτήριο	Δείκτης / Μονάδες	Μεθοδολογικό εργαλείο
Οικονομικά	ΣΒΑ1	Λειτουργικά κόστη	Μείωση λειτουργικού κόστους (%)	ΤΕΕ ΚΕΝΑΚ v.1.31.1.9
	ΣΒΑ8 	Κόστος επένδυσης	Αρχικό κόστος (€)	ΤΕΕ ΚΕΝΑΚ v.1.31.1.9
	ΣΒΑ8	Κόστος / όφελος	Απόσβεση επένδυσης (έτη)	ΤΕΕ ΚΕΝΑΚ v.1.31.1.9



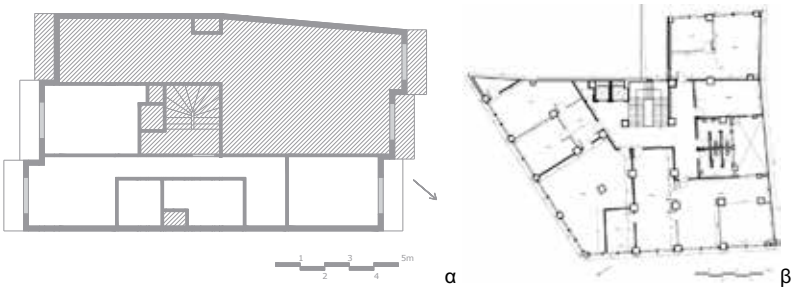
Εικόνα 5: Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου ανά μονάδα καταναλισκόμενης ενέργειας (πηγή: [22] για ορυκτά καύσιμα και [23] για ηλεκτροπαραγωγή) – προβολή για τον ηλεκτρισμό έως το 2030, βάσει των εθνικών στόχων [19]

3.1. Κατοικία

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 2, η τυπική κατοικία στην Αθήνα είναι το διαμέρισμα. Για το λόγο αυτό, εξετάζονται σενάρια εξοικονόμησης ενέργειας σε ένα τυπικό Αθηναϊκό διαμέρισμα, 70m^2 (Εικόνα 6α). Τα αποτελέσματα γενικεύονται για το κτιριακό απόθεμα της πόλης, βάσει της τελευταίας απογραφής [14]. Το διαμέρισμα θεωρείται αμόνωτο, καθώς, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, τα περισσότερα κτίρια της Αθήνας έχουν κατασκευαστεί πριν τον Κανονισμό Θερμομόνωσης[1]. Τα σενάρια επιλέγονται με γνώμονα το μηδενισμό της κατανάλωσης ενέργειας καθώς και την απεξάρτηση της πόλης από τα ορυκτά καύσιμα. Έτσι, καθώς η τάση σε εθνικό επίπεδο είναι η ηλεκτροπαραγωγή να από-ορυκτοποιείται, επιλέγονται ηλεκτρικά Η/Μ συστήματα και για τη θέρμανση χώρου. Εξάλλου, όπως αναλύθηκε και στην παρ. 2.1, καθώς η τάση του κλίματος είναι να αυξάνει η θερμοκρασία, η πόλη θα αντιμετωπίζει εντονότερα θέματα με την ψύξη, παρά με τη θέρμανση, ενώ η τάση για τις πόλεις που συντάσσουν σχέδια δράσης για το μηδενισμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, είναι η θέρμανση των κτιρίων να γίνεται από ηλεκτρική ενέργεια [2],[3],[4]. Μια σύντομη περιγραφή των εξεταζόμενων σεναρίων δίνεται στον πίνακα 2. Ως προς τα σενάρια με επεμβάσεις στο κτιριακό κέλυφος (μονά σενάρια), εξετάζονται δύο εκδοχές: τοποθέτηση συμβατικών υλικών και τοποθέτηση οικολογικών υλικών. Η ενεργειακή προσομοίωση του διαμερίσματος έγινε στο πρόγραμμα ΤΕΕ

[1] Καθώς σε αρκετές κατασκευές που υλοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια ισχύος του Κανονισμού Θερμομόνωσης δεν έχει τοποθετηθεί θερμομόνωση στην πράξη, εξετάζονται οι αμόνωτες κατασκευές ως πλειοψηφούσες και ως οι χειρότερες περιπτώσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν.

ΚΕΝΑΚ, βάσει των προδιαγραφών του [25][2]. Τα σενάρια 7, 8 και 9 μετατρέπουν το εξεταζόμενο διαμέρισμα σε nZEB, βάσει της [26]. Η ενσωματωμένη ενέργεια των επεμβάσεων εξοικονόμησης ενέργειας και ο χρόνος απόσβεσής της εκτιμώνται βάσει των [24].



Εικόνα 6: (α) Εξεταζόμενο διαμέρισμα κατοικίας και (β) εξεταζόμενο κτίριο τριτογενούς τομέα

Πίνακας 2. Σύντομη περιγραφή εξεταζόμενων σεναρίων για το κτιριακό απόθεμα κατοικίας

Εξεταζόμενα σενάρια	Σύντομη περιγραφή
Σενάριο 0	Θέρμανση με πετρέλαιο
Σενάριο 1	Θερμομόνωση αδιαφανών στοιχείων / αντικατάσταση κουφωμάτων & εξωτερική σκίασή τους
Σενάριο 2	Ηλιακός συλλέκτης για ΖΝΧ
Σενάριο 3	Συνδυασμός Σεναρίων 1 & 2 (θερμική βελτίωση κτιριακού κελύφους και τοποθέτηση ηλιακού συλλέκτη για ΖΝΧ)
Σενάριο 4	Τοποθέτηση ecolabel εναλλάκτη θερμότητας για θέρμανση και ψύξη
Σενάριο 5	Συνδυασμός Σεναρίων 1 & 4 (θερμική βελτίωση κτιριακού κελύφους και τοποθέτηση ecolabel εναλλάκτη θερμότητας για θέρμανση και ψύξη)
Σενάριο 6	Συνδυασμός Σεναρίων 2 & 4 (τοποθέτηση ηλιακού συλλέκτη για ΖΝΧ και ecolabel εναλλάκτη θερμότητας για θέρμανση και ψύξη)
Σενάριο 7 [nZEB]	Συνδυασμός Σεναρίων 2 & 5 (θερμική βελτίωση κτιριακού κελύφους, τοποθέτηση ecolabel εναλλάκτη θερμότητας για θέρμανση και ψύξη και ηλιακού συλλέκτη για ΖΝΧ)
Σενάριο 8 [nZEB]	Σενάριο 6 (τοποθέτηση ηλιακού συλλέκτη για ΖΝΧ και ecolabel εναλλάκτη θερμότητας για θέρμανση και ψύξη) &1kW (6m^2) PV (τοποθέτηση ηλιακού συλλέκτη για ΖΝΧ και ecolabel εναλλάκτη θερμότητας για θέρμανση και ψύξη και 1kW φωτοβολταϊκών)[3]
Σενάριο 9 [nZEB]	Συνδυασμός Σεναρίων 1& 8 (θερμική βελτίωση κτιριακού κελύφους, τοποθέτηση ecolabel εναλλάκτη θερμότητας για θέρμανση και ψύξη, ηλιακού συλλέκτη για ΖΝΧ και 1kW φωτοβολταϊκών)

[2] Βάσει των εθνικών παραδοχών, στην ενεργειακή προσομοίωση της κατοικίας δεν λαμβάνεται υπόψη η ενεργειακή κατανάλωση λόγω φωτισμού ή συσκευών, συμπεριλαμβανομένης της παρασκευής φαγητού. Καθώς η εκτιμώμενη ενεργειακή κατανάλωση των κτιρίων βάσει των συγκεκριμένων παραδοχών είναι αρκετά μεγαλύτερη από την πραγματική, της τάξης του 44% [27], λαμβάνεται η κατανάλωση ενέργειας που υπολογίζεται βάσει των εθνικών προδιαγραφών ως η συνολική κατανάλωση του κτιρίου. Ενδιαφέρον παρουσιάζει πάντως το γεγονός ότι, ανάγοντας τις υπολογισμένες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου στην επιφάνεια των κτιρίων στο Δήμο Αθηναίων, βάσει της τελευταίας απογραφής, είναι κατά 53% μεγαλύτερο για τις κατοικίες και κατά 33% για τον τριτογενή τομέα από τις μετρούμενες [8], βάσει του [28], που βρίσκεται σε ίδια τάξη μεγέθους με την απόκλιση των [27].

[3] Η θεώρηση 11m^2 / διαμέρισμα για την εγκατάσταση ΑΠΕ στο δώμα του κτιρίου (5m^2 θερμικοί ηλιακοί συλλέκτες και 6m^2 φωτοβολταϊκά στοιχεία) είναι οριακή για το εξεταζόμενο κτίριο, λαμβάνοντας υπόψη την απόληξη του κλιμακοστασίου και τους φωταγωγούς, καθώς και την αποφυγή αυτοσκίασης των στοιχείων. Στην πράξη αυτή η διαθεσιμότητα σε κάθε δώμα της πόλης δεν είναι δεδομένη, λόγω και των διαφορετικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών του κάθε κτιρίου, της ιδιωτικοποίησης των δωμάτων σε αρκετές πολυκατοικίες καθώς και των αυθαίρετων κατασκευών που παρουσιάζονται στην πράξη. Στη γενικότερη γεωμετρία του κάθε κτιρίου μπορεί να υπάρχει πάντως σχετική διαθεσιμότητα για τοποθέτηση τόσο θερμικών ηλιακών όσο και φωτοβολταϊκών στοιχείων στις όψεις και στις εσοχές των κτιρίων, ενώ μπορούν να λειτουργούν και ως σκίαστρα σε πέργκολες στις βεράντες των κτιρίων. Σε κάθε περίπτωση, θα πρέπει να εκπονηθεί ειδική μελέτη χωροθέτησης για το κάθε κτίριο, εντός του ιδεατού του στερεού.

3.2. Τριτογενής τομέας

Ως κτίριο αναφοράς για τον τριτογενή τομέα λαμβάνεται ένα δημοτικό, αμόνωτο κτίριο γραφείων, έξι ορόφων (Εικόνα 6β). Μια σύντομη περιγραφή των εξεταζόμενων σεναρίων δίνεται στον πίνακα που ακολουθεί. Ομοίως, όπως και για τις κατοικίες, ως προς τα σενάρια με επεμβάσεις στο κτιριακό κέλυφος (μονά σενάρια) εξετάζονται δύο εκδοχές: τοποθέτηση συμβατικών και τοποθέτηση οικολογικών υλικών, ενώ ακολουθήθηκε η ίδια μεθοδολογία και συλλογιστική που περιγράφεται στην παρ. 3.1. Τα σενάρια 3 και 5-9 μετατρέπουν το εξεταζόμενο κτίριο σε nZEB, βάσει της [26].

Πίνακας 3. Σύντομη περιγραφή εξεταζόμενων σεναρίων για το κτιριακό απόθεμα τριτογενούς τομέα

Εξεταζόμενα σενάρια	Σύντομη περιγραφή
Σενάριο 0	Θέρμανση με φυσικό αέριο
Σενάριο 1	Θερμομόνωση αδιαφανών στοιχείων / αντικατάσταση κουφωμάτων & εξωτερική σκίασή τους
Σενάριο 2	Αντικατάσταση φωτιστικών με LED & τοποθέτηση αυτοματισμών σχετικά με τη στάθμη φωτισμού
Σενάριο 3 [nZEB]	Συνδυασμός Σεναρίων 1 & 2 (θερμική βελτίωση κτιριακού κελύφους και αντικατάστασης φωτιστικών)
Σενάριο 4	Τοποθέτηση ecolabel εναλλάκτη θερμότητας για θέρμανση και ψύξη
Σενάριο 5 [nZEB]	Συνδυασμός Σεναρίων 1 & 4 (θερμική βελτίωση κτιριακού κελύφους και τοποθέτηση ecolabel εναλλάκτη θερμότητας για θέρμανση και ψύξη)
Σενάριο 6 [nZEB]	Συνδυασμός Σεναρίων 2 & 4 (αντικατάσταση φωτιστικών και τοποθέτηση ecolabel εναλλάκτη θερμότητας για θέρμανση και ψύξη)
Σενάριο 7 [nZEB]	Συνδυασμός Σεναρίων 2 & 5 (θερμική βελτίωση κτιριακού κελύφους, τοποθέτηση ecolabel εναλλάκτη θερμότητας για θέρμανση και ψύξη και αντικατάσταση φωτιστικών)
Σενάριο 8 [nZEB]	Σενάριο 6 (αντικατάσταση φωτιστικών και τοποθέτηση ecolabel εναλλάκτη θερμότητας για θέρμανση και ψύξη) &18kW (106m^2) PV
Σενάριο 9 [nZEB]	Συνδυασμός Σεναρίων 1& 8 (θερμική βελτίωση κτιριακού κελύφους, τοποθέτηση ecolabel εναλλάκτη θερμότητας για θέρμανση και ψύξη, αντικατάσταση φωτιστικών και τοποθέτηση 18kW φωτοβολταϊκών)

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα για κάθε εξεταζόμενο κριτήριο και σενάριο συνοψίζονται στον Πίνακα 4 για την κατοικία και στον Πίνακα 5 για τον τριτογενή τομέα. Για την υλοποίηση των σεναρίων για το σύνολο της πόλης, πρέπει να διατεθούν οι πόροι που φαίνονται στις τελευταίες στήλες των Πινάκων 4 και 5. Η ιεράρχηση των σεναρίων φαίνεται στην Εικόνα 7α για την κατοικία και 7β για τον τριτογενή τομέα. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 7, όταν λαμβάνεται η απόσβεση της ενσωματωμένης ενέργειας υπόψη, τα οικολογικά υλικά θερμομόνωσης κατατάσσονται σε καλύτερη θέση από τα συμβατικά. Καθώς λαμβάνονται και τα οικονομικά κριτήρια υπόψη, τα σενάρια που λαμβάνουν πιο προνομιακή ιεράρχηση, δεν είναι και κατ' ανάγκη εκείνα που οδηγούν στα μεγαλύτερα ποσοστά εξοικονόμησης ενέργειας, όπως έχει σχολιασθεί και από τους [29]. Επίσης φαίνεται ότι, λαμβάνοντας υπόψη τα κριτήρια που παρουσιάσθηκαν στην παρ. 3, είναι προτιμότερο, να μείνει το κτίριο ως έχει, παρά να γίνουν επεμβάσεις υψηλής ενσωματωμένης ενέργειας και κόστους, με μικρή εξοικονόμηση ενέργειας, κάτι που έχει επιβεβαιωθεί κι από τις [30]. Επίσης, όπως φαίνεται και για τις δύο εξεταζόμενες περιπτώσεις στην Εικόνα 7, καθώς πολλές από τις βαθμολογήσεις είναι πολύ κοντινές, μια ανάλυση ευαισθησίας θα αλλάξει τη σειρά των σεναρίων. Βάσει των εξεταζόμενων κριτηρίων ιεραρχείται πρώτο το Σενάριο 7, με τα οικολογικά υλικά, για την κατοικία (κέλυφος, Η/Μ συστήματα και ηλιακός συλλέκτης για ZNX), και το Σενάριο 3 για τον τριτογενή τομέα (συμβατικό κέλυφος και φωτιστικά).

Προκειμένου όμως για την εφαρμογή στην πράξη της ενεργειακής αναβάθμισης του κτιριακού αποθέματος, όπου καθοριστικό ρόλο παίζει ο οικονομικός παράγοντας, με στόχο την ταχεία μείωση των αερίων του θερμοκηπίου, επιλέγεται το Σενάριο 6[4] για την κατοικία (αλλαγή Η/Μ συστημάτων και τοποθέτηση ηλιακού συλλέκτη για ZNX), που κατατάσσεται 3ο βάσει της πολυκριτηριακής ανάλυσης με ίσους συντελεστές βαρύτητας και το Σενάριο 6 (αλλαγή Η/Μ συστημάτων και λαμπτήρων) για τον

[4] Προκύπτει κι από τη σχετική ανάλυση ευαισθησίας, η οποία δεν παρουσιάζεται εδώ, λόγω του περιορισμένου χώρου της δημοσίευσης.

τριτογενή τομέα, που κατατάσσεται ομοίως 7ο. Τα αποτελέσματα για την εφαρμογή των δύο αυτών σεναρίων σε μια δεκαετία, με τη διαφορά 5 ετών μεταξύ της έναρξης του καθενός φαίνονται στην Εικόνα 8, θεωρώντας έτος έναρξης το 2023. Για την υλοποίησή τους, χρειάζονται περίπου 1.3 δις € για τις κατοικίες και 1.5 δις € για τον τριτογενή τομέα. Ακολουθούνται από τις υπόλοιπες επεμβάσεις για την αναβάθμιση του κτιριακού αποθέματος στο Σενάριο 9, σε χρονικό ορίζοντα επίσης δεκαετίας, για την οποία χρειάζονται άλλα 4.3 δις € για τις κατοικίες και 5.7 δις € για τον τριτογενή τομέα. Με αυτά τα κόστη και τις επεμβάσεις μπορεί να οδηγηθεί, θεωρητικά, ο κτιριακός τομέας της πόλης στο μηδενισμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου εντός του χρονικού ορίζοντα που έχει τεθεί για τη μετατροπή των πόλεων σε ουδέτερου άνθρακα, έως δηλαδή το 2050.

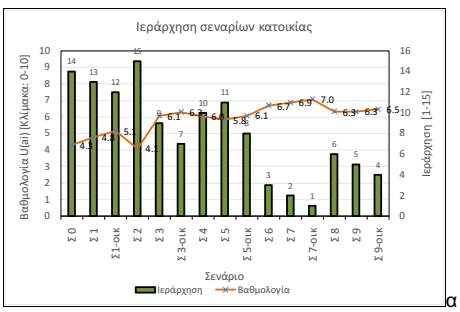
Πίνακας 4. Αποτελέσματα για τα εξεταζόμενα κριτήρια καθώς και συνολικό κόστους για την ενεργειακή αναβάθμιση του κτιριακού αποθέματος των κατοικιών της Αθήνας, για κάθε σενάριο

Σενά-ρια	Μείωση εκπο-μπών GHG (%)	ΕΞΕ (%)	Αρχικό κόστος (€)	Ετήσιο λειτουργικό κόστος(€)	Περίο-δος αποπλη-ρωμής (έτη)	Απόσβεσης ενσωμα-τωμένης ενέργειας (έτη)	Μείωση θερμοχω-ρητικότητας πόλης	Σύνολο κόστος για το κτιριακό απόθεμα κατοικιών της πόλης (€)
Σ 0	0.00%	0.00%	0.00 €	1,217.20 €	0.00	0.00	0	- €
Σ 1	47.95%	44.40%	5,187.30 €	534.50 €	7.60	4.37	1	2,219,256,623 €
Σ1-οικ	47.95%	44.40%	5,575.20 €	534.50 €	8.20	2.89	1	2,385,209,940 €
Σ 2	26.95%	27.10%	1,200.00 €	1,018.00 €	6.00	0.82	0	513,390,000 €
Σ 3	74.90%	71.60%	6,387.30 €	335.30 €	7.20	3.08	1	2,732,646,623 €
Σ 3-οικ	74.90%	71.60%	6,775.20 €	335.30 €	7.70	2.14	1	2,898,599,940 €
Σ 4	48.39%	47.90%	1,800.00 €	382.60 €	2.20	0.12	0	770,085,000 €
Σ 5	65.88%	64.40%	6,987.30 €	253.10 €	7.20	3.27	1	2,989,341,623 €
Σ 5-οικ	65.88%	64.40%	7,375.20 €	253.10 €	7.70	2.19	1	3,155,294,940 €
Σ 6	75.34%	75.00%	3,000.00 €	183.40 €	2.90	0.37	0	1,283,475,000 €
Σ 7	93.48%	92.30%	8,187.30 €	48.70 €	7.40	2.53	1	3,502,731,623 €
Σ 7-οικ	93.48%	92.30%	8,575.20 €	48.70 €	7.80	1.77	1	3,668,684,940 €
Σ 8	101.96%	91.40%	7,500.00 €	50.10 €	6.50	0.76	0	3,208,687,500 €
Σ 9	117.49%	100.30%	12,687.30 €	0.00 €	11.00	2.78	1	5,427,944,123 €
Σ 9-οικ	117.49%	100.30%	12,995.20 €	0.00 €	11.30	2.07	1	5,559,671,440 €

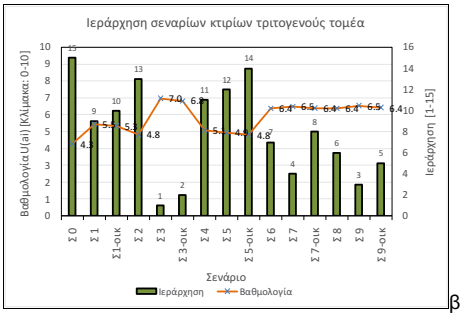
Πίνακας 5. Αποτελέσματα για τα εξεταζόμενα κριτήρια καθώς και συνολικό κόστους για την ενεργειακή αναβάθμιση του κτιριακού αποθέματος του τριτογενούς τομέα της Αθήνας, για κάθε σενάριο

Σενάρια	Μείωση εκπο-μπών GHG (%)	ΕΞΕ (%)	Αρχικό κόστος (€)	Ετήσιο λειτουργικό κόστος (€)	Περίο-δος αποπλη-ρωμής (έτη)	Απόσβεση ενσωμα-τωμένης ενέργειας (έτη)	Μείωση θερμοχω-ρητικότητας πόλης	Κόστος για το κτιριακό απόθεμα του τριτογενούς τομέα της πόλης (€)
Σ 0	0.00%	0.00%	0.00 €	48,507.40 €	0.00	0.00	0	- €
Σ 1	47.81%	48.50%	310,055.30 €	23,133.40 €	12.20	0.59	1	4,346,665,251 €
Σ1-οικ	47.81%	48.50%	345,721.80 €	23,133.40 €	13.60	0.33	1	4,846,673,914 €
Σ 2	26.49%	24.30%	15,200.00 €	40,033.80 €	1.80	0.47	0	213,088,800 €
Σ 3	77.41%	76.50%	325,255.30 €	11,764.40 €	8.90	0.52	1	4,559,754,051 €
Σ 3-οικ	77.41%	76.50%	360,921.80 €	11,764.40 €	9.80	0.36	1	5,059,762,714 €
Σ 4	60.49%	62.00%	90,000.00 €	16,581.30 €	2.80	3.09	0	1,261,710,000 €
Σ 5	67.06%	68.20%	400,055.30 €	13,852.20 €	11.50	3.23	1	5,608,375,251 €
Σ 5-οικ	67.06%	68.20%	435,721.80 €	13,852.20 €	12.60	3.04	1	6,108,383,914 €
Σ 6	84.71%	85.30%	105,200.00 €	6,419.40 €	2.50	2.38	0	1,474,798,800 €
Σ 7	92.17%	92.50%	415,255.30 €	3,283.50 €	9.20	2.51	1	5,821,464,051 €
Σ 7-οικ	92.17%	92.50%	450,921.80 €	3,283.50 €	10.00	2.37	1	6,321,472,714 €
Σ 8	92.25%	92.10%	168,164.00 €	3,389.70 €	3.70	2.34	0	2,357,491,116 €

Σενάρια	Μείωση εκπο-μπών GHG (%)	ΕΞΕ (%)	Αρχικό κόστος (€)	Ετήσιο λειτουργικό κόστος (€)	Περίο-δος αποπλη-ρωμής (έτη)	Απόσβεση ενσωμα-τωμένης ενέργειας (έτη)	Μείωση θερμοχω-ρητικότητας πόλης	Κόστος για το κτιριακό απόθεμα του τριτογενούς τομέα της πόλης (€)
Σ 9	99.70%	98.30%	478,219.30 €	461.20 €	10.00	2.49	1	6,704,156,367 €
Σ 9-οικ	99.70%	98.30%	513,885.80 €	461.20 €	10.70	2.36	1	7,204,165,030 €

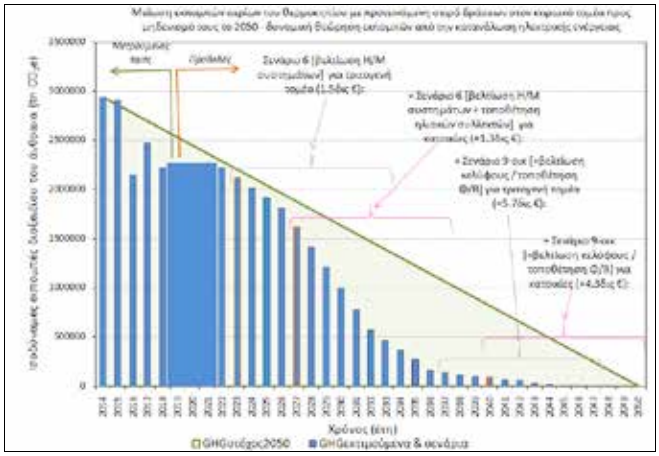


α



β

Εικόνα 7: Ιεράρχηση σεναρίων (α) κατοικίας και (β) τριτογενούς τομέα



Εικόνα 8: Μείωση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τον κτιριακό τομέα, με συνδυασμό δράσεων ΕΞΕ, στο Δήμο Αθηναίων, για την επίτευξη του στόχου της μετατροπής του κτιριακού αποθέματος σε μηδενικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου έως το 2050

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στόχος της συγκεκριμένης εργασίας είναι η ανάδειξη των επεμβάσεων εξοικονόμησης ενέργειας, οι οποίες, με οικονομικό τρόπο, μπορούν να μειώσουν με ικανοποιητικούς ρυθμούς την κατανάλωση ενέργειας στο κτιριακό απόθεμα του Δήμου Αθηναίων, με απώτερο στόχο το μηδενισμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τα κτίρια της πόλης έως το 2050. Για το λόγο αυτό συλλέχθηκαν στοιχεία σχετικά με τις κλιματικές τάσεις της περιοχής, το κτιριακό απόθεμα και τις αντίστοιχες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Στη συνέχεια επιλέχθηκαν χαρακτηριστικά κτίρια και σενάρια ενεργειακής αναβάθμισης τους, καθώς και κριτήρια εξέτασής τους, που να αφορούν τόσο την περιβαλλοντική όσο και την οικονομική πτυχή των σεναρίων. Τα σενάρια ιεραρχήθηκαν, ενώ, βάσει συγκεκριμένων κριτηρίων, προτάθηκαν εκείνα που στην πράξη θα μπορούσαν να μειώσουν κατά το μέγιστο δυνατό τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, με μικρό αρχικό κόστος και μικρό χρόνο

απόσβεσης, τόσο της ενσωματωμένης τους ενέργειας, όσο και του κόστους επένδυσης. Εξετάσθηκε αν τα σενάρια αυτά είναι ικανά να ικανοποιήσουν τους στόχους του μηδενισμού των αερίων του θερμοκηπίου έως το 2050. Ως μια πρώτη προσέγγιση, συμπεραίνεται ότι η αναβάθμιση των Η/Μ συστημάτων σε ecolabel τόσο στον τριτογενή τομέα όσο και στην κατοικία (στην τελευταία, σε συνδυασμό και με ηλιακούς συλλέκτες για ΖΝΧ), αναδεικνύεται ως το πιο οικονομικό σενάριο που μπορεί να αποφέρει γρήγορη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Σε δεύτερη φάση ακολουθεί η αναβάθμιση του κτιριακού κελύφους και η τοποθέτηση ΑΠΕ στο κτίριο, ως δαπανηρότερες λύσεις, αναγκαίες για τη μετατροπή του κτιριακού αποθέματος της πόλης σε μηδενικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου καθώς και για την αντιμετώπιση της αύξησης των νυχτερινών θερμοκρασιών τη θερινή περίοδο.

Προκειμένου, λοιπόν να είναι εφικτή και πολλαπλασιάσιμη η μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τον κτιριακό τομέα του Δήμου Αθηναίων, είναι σημαντικό, να προωθηθούν αρχικά (μέσω χρηματοδοτικών εργαλείων, ενημερωτικών δράσεων κοκ) η αναβάθμιση των Η/Μ συστημάτων, η απεξάρτησή τους από τα ορυκτά καύσιμα και κατόπιν η αναβάθμιση του κτιριακού κελύφους, σε συνδυασμό με την εγκατάσταση ΑΠΕ στο κτιριακό κέλυφος. Η συγκεκριμένη πρόταση, χρίζει βέβαια περαιτέρω διερεύνησης: πιο αναλυτική θεώρηση για τα κτίρια του τριτογενούς τομέα, αναλόγως με τη χρήση, καθώς και για την κατοικία, αναλόγως της τυπολογίας, είναι στοιχεία που θα πρέπει να ληφθούν υπόψη σε μια πιο αναλυτική διερεύνηση. Τέλος, στη συγκεκριμένη εργασία, δεν λήφθηκαν υπόψη, στη θεωρητική ανάλυση, οι εκπομπές που αναλογούν στην ενέργεια που καταναλώνεται για το μαγείρεμα στην κατοικία, την εστίαση και τα νοσοκομεία, κάτι που μπορεί να ληφθεί υπόψη σε περαιτέρω έρευνα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Covenant of Mayors, n.d., “Signatories’ vision”. Διαθέσιμο στο: https://www.covenantofmayors.eu/29-about/objectives-and-scope/15-signatories%E2%80%99-vision.html [Πρόσβαση: 17.12.2019]

[2] Ajutament de Barcelona, 2018, “Climate Plan 2018-2030”. City of Barcelona, Spain.

[3] Mairie de Paris, 2018, “Paris Action Plan – towards a carbon neutrality city and 100% renewable energies. Municipality of Paris, France.

[4] City of Amsterdam, 2020, “New Amsterdam Climate – Roadmap Amsterdam climate neutral 2050”. Munucipality of Amsterdam, The Netherlands.

[5] The Economist Intelligent Unit, 2019, “Ready for change – Pathway to a low-emissions future”. The Economist Intelligence Unit Limited, London.

[6] ΑΔΣ 568/27.04.2017 που αφορά έγκριση Α. του Σχεδίου Δράσης για τη μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου και Β. του Σχεδίου Δράσης για την προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή.(ΑΔΑ:ΩΝΩΜΩ6Μ-6ΦΙ) Δήμος Αθηναίων, Αθήνα.

[7] Σκουλά, Ε., Μυριβήλη, Ε., Κακριδά, Ο., Αγοραστού, Κ., Γκίνης, Γ. Αλεξανδρή, Ε., Κουφοπούλου, Β., Κωστοπούλου, Α., και Σπυριδάκη, Β., 2017, “Σχέδιο δράσης για την κλιματική αλλαγή – Β’ μέρος: Στρατηγική προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή”. Δήμος Αθηναίων, Αθήνα.

[8] Alexandri, E., and Badas, T., 2020. “CDP –Carbon Disclosure Project– climate change disclosure cycle 2020 – Athens”. Municipality of Athens, https://www.cdp.net/en/users/sign_in

[9] C40, 2020, “Cities greenhouse gas emissions interactive dashboard”. Διαθέσιμο στο: https://www.c40knowledgehub.org/s/article/C40-cities-greenhouse-gas-emissions-interactive-dashboard?language=en_US [Πρόσβαση: 15.12.2020]

[10] Ζερεφός, Χ., et al, 2011, “Οι Περιβαλλοντικές, Οικονομικές και Κοινωνικές Επιπτώσεις της Κλιματικής Αλλαγής στην Ελλάδα”. Επιτροπή Μελέτης των Επιπτώσεων της Κλιματικής Αλλαγής, Τράπεζα της Ελλάδος, Αθήνα.

[11] Santamouris, M., 2001, “Heat-island effect”. James&James: London.

[12] Giannaros, T.M., Melas, D., Daglis, I.A., Keramitsoglou, I. and Kourtidis, K., 2013, “Numerical study of the urban heat island over Athens (Greece) with the WRF model”. Atmospheric Environment, 73, pp.103-111.

[13] Daglis, I.A., Rapsomanikis, S., Kourtidis, K., Melas, D., Papayannis, A., Keramitsoglou, I., Giannaros, T., Amiridis, V., Petropoulos, G., Georgoulias, A. Sobrino, J.A., Manuta, P., Gröbner, J., Paganini, M., and Bianchi, R., 2010, "Results of the DUE THERMOPOLIS campaign with regard to the urban heat island (UHI) effect in Athens". In Proc. ESA Living Planet Symposium. Conference: European Space Agency Living Planet: Bergen, Norway.

[14] ΕΛΣΤΑΤ, 2015, "Απογραφή Κτιρίων 2011," Διαθέσιμο στο: http://www.statistics.gr/documents/20181/1204362/ A1601_SKT01_DT_DC_00_2011_01_F_GR.pdf/33bc3e1f-ea63-47ec-93b8-a96179b2ee59 [Πρόσβαση: 02.10.2017].

[15] EUROSTAT, 2019, "Housing statistics". Διαθέσιμο στο: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Housing_statistics [Πρόσβαση: 13.2.2020]

[16] Δήμος Αθηναίων, 2016, "Επαναπροσδιορίζοντας την πόλη: Στρατηγική ανθεκτικότητας της Αθήνας για το 2030". 100 Resilient Cities. Διαθέσιμο στο: http://www.100resilientcities.org/wp-content/uploads/2017/06/Athens_Resilience_Strategy_-_Reduced_PDF.compressed.pdf [Πρόσβαση: 21.09.2017]

[17] Alexandri, E., 2019, "MAUT for the Energy Upgrade of Dwellings". Mendeley Data. Reference Number: 10.17632/d2g67rz5hg.2. Διαθέσιμο στο: http://dx.doi.org/10.17632/d2g67rz5hg.2

[18] UN, 2015, "Transforming our World: the 2030 Agenda for Sustainable Development". Διαθέσιμο στο: https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/21252030%20Agenda%20for%20Sustainable%20Development%20web.pdf [Πρόσβαση: 13.10.2019]

[19] Απόφαση υπ'αρ 4, 2019. "Κύρωση του Εθνικού Σχεδίου για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ)". (ΦΕΚ 4893/Β/31.12.2019), Εθνικό Τυπογραφείο, Αθήνα.

[20] Salat, S., 2009. "Energy loads, CO_2 emissions and building stocks: morphologies, typologies, energy systems and behavior". Building Research & Information, 37(5-6), pp. 598-609.

[21] Golbazi, M., and Aktas, C. B., 2018. "Energy efficiency of residential buildings in the US: Improvement potential beyond IECC". Building and Environment, 142, pp. 278-287.

[22] Intergovernmental Panel on Climate Change, 2019," 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories". Διαθέσιμο στο: https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/ [Πρόσβαση: 20.06.2019]

[23] NIR- National Inventory Report Greece, 2020, "Climate Change Emissions Inventory – Annual inventory submission of Greece under the convention Kyoto Protocol for greenhouse and other gases for the years 1990-2017". Ministry of Environment and Energy, Greece.

[24] Alexandri, E., and Androutsopoulos, A., 2017, "Energy upgrade of existing dwellings in Greece; embodied energy issues". Procedia Environmental Sciences, 38C, pp. 196-203.

[25] ΤΟΤΕΕ 20701-1:2017, "Αναλυτικές Εθνικές Προδιαγραφές Παραμέτρων για τον Υπολογισμό της Ενεργειακής Απόδοσης Κτηρίων και την Έκδοση του Πιστοποιητικού Ενεργειακής Απόδοσης," Γ' έκδοση, ΤΕΕ (ΦΕΚ Β/4003/2017), Αθήνα.

[26] Απόφαση υπ' αρ ΥΠΕΝ/ΔΕΠΕΑ/85251/242, 2018, "Έγκριση Εθνικού Σχεδίου αύξησης του αριθμού των κτιρίων με σχεδόν μηδενική κατανάλωση ενέργειας". (ΦΕΚ Β/5447/2018), Εθνικό Τυπογραφείο, Αθήνα.

[27] Balaras, C.A., Dascalaki, E.G., Droutsa, K.G. and Kontoyiannidis, S., 2016, "Empirical assessment of calculated and actual heating energy use in Hellenic residential buildings". Applied Energy, 164, pp.115-132.

[28] WRI, C40, and ICLEI, 2014, "Greenhouse Gas Protocol: Global protocol for community-scale greenhouse gas emission inventories—An accounting and reporting standard for cities". Διαθέσιμο στο: https://ghgprotocol.org/greenhouse-gas-protocol-accounting-reporting-standard-cities [Πρόσβαση: 15.5.2019]

[29] Alexandri, E., and Androutsopoulos, A., 2020, "Multicriteria evaluation of ecolabels for the energy upgrade of dwellings in Greece". International Journal of Sustainable Energy, 39(1), pp. 67-87.

[30] Zikou, A., and Alexandri, E., 2019, "Multicriteria analysis of the energy upgrade of a heritage, office building". Proc. 12th International Conference on Energy and Climate Change, pp. 259-274.

ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΟΣ-ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΕΙΦΟΡΙΚΗ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΜΕΤΩΠΩΝ. Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΑΝΑΠΛΑΣΗΣ ΤΟΥ ΦΑΛΗΡΙΚΟΥ ΟΡΜΟΥ

Λάμπρος Μπαζής[1], Ελευθερία Αλεξανδρή[1]

[1] Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Πάροδος Αριστοτέλους 18, 26335 Πάτρα
e-mail: labazis@yahoo.com, el_alexandri@yahoo.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι επεμβάσεις στα παράκτια μέτωπα αποτελούν ένα πολυσύνθετο ζήτημα, καθώς συμπυκνώνουν συνιστώσες κοινωνικές, πολιτικές, οικονομικές και περιβαλλοντικές. Η πολυδιάστατη σημασία τους για την πόλη επιβάλει την υιοθέτηση πρακτικών ανάπτυξης, βασισμένων στις αρχές της αειφορίας. Με αφορμή την «Ολοκληρωμένη Ανάπλαση του Φαληρικού Όρμου», η παρούσα εργασία εστιάζει στη διερεύνηση της αειφορικής διασύνδεσης του Φαληρικού Όρμου με την πόλη. Με τη δημιουργία τριών σεναρίων που αφορούν σε διαφορετικούς τρόπους συνδεσιμότητας και βασική παραδοχή την επιρροή του COVID-19 στις μετακινήσεις, επιχειρείται η αξιολόγησή της αειφορικότητας στη διασύνδεση του θαλάσσιου μετώπου με τον αστικό ιστό, με κριτήρια από τους τρεις πυλώνες της αειφορίας, δηλαδή την προστασία του περιβάλλοντος, την κοινωνική ισότητα και την οικονομική ανάπτυξη. Επιλέγονται συνολικά δέκα κριτήρια, και με την χρήση αντίστοιχων δεικτών έκφρασης, ποσοτικοποιούνται ως προς τα σενάρια διασύνδεσης της περιοχής μελέτης μέσω: α) του υφιστάμενου σχεδίου, β) ήπιων παρεμβάσεων και γ) ριζοσπαστικών επεμβάσεων μεγάλης κλίμακας. Οι δείκτες των κριτηρίων ποσοτικοποιούνται μέσω ανάλυσης κύκλου ζωής (λογισμικό ATHENA), προμετρήσεων επί των προτεινόμενων σχεδίων, ενώ μέσω ερωτηματολογίων ποσοτικοποιούνται ποιοτικοί δείκτες και προσδιορίζονται οι συντελεστές βαρύτητας του κάθε κριτηρίου. Μέσω πολυκριτηριακής ανάλυσης και ανάλυσης ευαισθησίας, τα σενάρια αξιολογούνται και ιεραρχούνται, ως προς την αειφορία των δέκα κριτηρίων. Προκύπτουν συμπεράσματα σχετικά με τον αειφορικό χαρακτήρα του περιορισμού των μετακινήσεων με ΙΧ οχήματα και της ενίσχυσης της χρήσης των ΜΜΜ, του ποδηλάτου και της πεζής μετακίνησης στον αστικό ιστό, σχετικά με τη διασύνδεση της πόλης και του θαλάσσιου μετώπου. Με τη συγκεκριμένη προσέγγιση αποδεικνύεται ποσοτικά ότι εάν ένα εξέχον, βιοκλιματικά σχεδιασμένο παραθαλάσσιο μέτωπο δεν είναι αειφορικώς διασυνδεδεμένο με την πόλη, η διασύνδεσή του μπορεί να προκαλέσει σοβαρά περιβαλλοντικά ζητήματα, που προκύπτουν από την αύξηση της κυκλοφορίας. Η πιο αειφορική επιλογή είναι η ριζική μετατροπή των διασυνδεδεμένων περιοχών σε μέρη που ενθαρρύνουν το περπάτημα, την ποδηλασία και τη χρήση ηλεκτροκίνητων μέσων μαζικής μεταφοράς, παρά το υψηλό αρχικό κόστος.

Λέξεις Κλειδιά: Παράκτια μέτωπα, αειφορική διασύνδεση, πολυκριτηριακή ανάλυση (MAUT), περιβαλλοντικός σχεδιασμός, «μπλε και πράσινες» υποδομές

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το νερό αποτέλεσε ένα από τους σημαντικότερους φυσικούς πόρους στην ιστορία της εξέλιξης του ανθρώπινου είδους [1] και η συμβολή του υπήρξε καθοριστική στην ανάπτυξη των πρώιμων οικισμών και των πόλεων. Σε όλη την ιστορία των ανθρώπινων οικισμών, υπήρξε πάντα μια στενή και ολοκληρωμένη σχέση πόλης-νερού [2]. Για τις σύγχρονες παραλιακές πόλεις, είναι πολύ κρίσιμη η κατανόηση της μεταβαλλόμενης δομής των παρακτίων μετώπων και της ενσωμάτωσής τους στην υπάρχουσα δομή της πόλης [3].

Ο παράκτιος χώρος αποτελεί ένα πολυσύνθετο φυσικό σύστημα και μια ιδιαίτερη μορφολογική ενότητα που απαρτίζεται από τρία στοιχεία: την ξηρά, τη θάλασσα και τον αέρα [4], τα οποία βρίσκονται σε συνεχή αλληλοεπίδραση μεταξύ τους. Γεωγραφικά, συνίσταται σε μια χωρική ενότητα μεταβλητού συνήθως πλάτους, αποτελεί δε τον μεταβατικό (ενδιάμεσο) χώρο μεταξύ του αστικού ιστού και της θάλασσας. Ταυτόχρονα αποτελεί το ζωτικό εκείνο χώρο ανθρώπινων κοινωνιών και κοινωνικό- οικονομικών δραστηριοτήτων [5]. Το μέγεθος και η κλίμακα του παράκτιου χώρου ποικίλει, όπως επίσης ποικίλει και η σημασία που αυτός διαδραματίζει στη διασύνδεση της πόλης με το θαλάσσιο στοιχείο. Η σημασία των αστικών παράκτιων μετώπων είναι καθοριστική για την σχέση της με την πόλη και αντίστροφα.

Τα τελευταία εξήντα χρόνια η ανάπλαση των παρακτίων μετώπων, υπήρξε από τις πιο αξιόλογες προσπάθειες αστικής ανάπτυξης στον κόσμο, τόσο σημαντική που αγγίζει τα όρια της «πραγματικής αστικής επανάστασης» [6]. Τα παράκτια μέτωπα, ως ένας από τους πολυτιμότερους πόρους για μια χώρα αποτελούν περιορισμένα, πολύτιμα και μη ανανεώσιμα περιουσιακά στοιχεία της και είναι αναγκαία η μακροπρόθεσμη εξασφάλιση της διατήρησης και ανάπτυξης του πόρου αυτού. Είναι σημαντικό, για τις παραθαλάσσιες περιοχές, να «χρησιμοποιηθούν» στρατηγικά, για να διατηρήσουν την οικονομική τους αξία και να ενισχύσουν τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους ή την εικόνα τους [6], [7]. Η αειφορική διάσταση των παράκτιων μετώπων συγκεντρώνει μια σειρά εννοιών, όπως η περιβαλλοντική ευθύνη, η κοινωνική δικαιοσύνη, η οικονομική βιωσιμότητα, η πολιτική σχεδιασμού και μεταφοράς, ο αρχιτεκτονικός σχεδιασμός στη δημιουργία όμορφων χώρων ξεχωριστής ταυτότητας [8] αλλά και την έννοια του τοπίου, φυσικού ή ανθρωπογενούς. Χάρη στην πολυπλοκότητα και τον πλούτο τους, τα θαλάσσια οικοσυστήματα μπορούν να προσφέρουν σημαντικές υπηρεσίες οικοσυστήματος [9], αρκεί να έχει ληφθεί υπόψη η προστασία και ο εμπλουτισμός τους κατά το σχεδιασμό, τη λειτουργία και τη διαχείριση των παράκτιων μετώπων.

Εκτός από την αειφορία, ως προς το σχεδιασμό και τη διαχείριση του ίδιου του παράκτιου μετώπου, κρίσιμη είναι επίσης η εξέταση της βιωσιμότητας της διασύνδεσης των παράκτιων μετώπων με αστικά κέντρα, ιδιαίτερα και κατά την περίοδο της πανδημίας που διανύουμε και τη μετέπειτα εποχή [10]. Εάν δεν δοθεί έμφαση στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της διασύνδεσης του παράκτιου μετώπου με τον αστικό πυρήνα, ενδέχεται να οδηγήσουν σε μεγαλύτερα περιβαλλοντικά ζητήματα από εκείνα που επιλύουν. Ο στόχος αυτής της έρευνας είναι να επισημάνει ποια περιβαλλοντικά ζητήματα μπορεί να προκύψουν και πώς να επιλυθούν στη διασύνδεση του παράκτιου μετώπου με τον αστικό ιστό και υπό το πρίσμα των περιορισμών λόγω της πανδημίας, επικεντρώνοντας στη διασύνδεση του πάρκου που δημιουργείται στο Φαληρικό όρμο.

2. ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ

Σε αντίθεση με τις περισσότερες περιπτώσεις παρακτίων μετώπων, τα οποία βρίσκονται σε επαφή με την πόλη, η περίπτωση του Φαληρικού Όρμου διαφοροποιείται, όσον αφορά το πρώτο στάδιο εξέλιξης, καθώς η πόλη των Αθηνών αναπτύχθηκε εσωτερικά, σε μια προσπάθεια να εξασφαλίζει ασφάλεια από τους θαλάσσιους κινδύνους και ως ένα βαθμό

ανεξάρτητα από το λιμάνι της, το οποίο εξυπηρετούσε κυρίως εμπορικές και διαμετακομιστικές δραστηριότητες [11]. Η κατάσταση αυτή διατηρήθηκε μέχρι τις αρχές του τελευταίου αιώνα, όπου λόγω των διαδοχικών πληθυσμιακών αυξήσεων, η Αθήνα «ενώθηκε» με την ευρύτερη έννοια, με το Φαληρικό Όρμο, με την ανάπτυξη των περιοχών της Καλλιθέας και του Μοσχάτου.

Από τη χρονική εκείνη στιγμή κι έπειτα, η εξέλιξη του Φαληρικού Όρμου, με μικρή χρονική καθυστέρηση, ακολούθησε τα βήματα των διεθνών παραδειγμάτων. Στα τέλη του 19^{ου} αιώνα εμφανίζεται σημαντική κοινωνική και πολιτιστική άνθηση της περιοχής, την οποία όμως διαδέχεται στις αρχές του 20^{ου} αιώνα η υποβάθμιση της περιοχής, με την εγκατάσταση προσφυγικών πληθυσμών. Η μεταπολεμική περίοδος χαρακτηρίζεται από εγκατάλειψη των εγκαταστάσεων, μεταφορά χρήσεων σε άλλες περιοχές, με αποτέλεσμα, την απαξίωση του παράκτιου μετώπου. Στα τέλη της δεκαετίας του 1960 και στα βήματα των διεθνών τάσεων, η ιδέα της ανάπλαση της εγκαταλελειμμένης παραλιακής ζώνης αρχίζει να απασχολεί το κράτος και ξεκινούν μια σειρά σκέψεων και προτάσεων για την ανάπλαση του Φαληρικού Όρμου. Οι περισσότερες από αυτές παραμείναν «στα χαρτιά», ενώ η περίοδος των Ολυμπιακών αγώνων δεν κατάφερε να ανταποκριθεί στις προσδοκίες. Το πρόγραμμα της «Ολοκληρωμένης ανάπλασης του Φαληρικού Όρμου» αποτέλεσε την τελευταία ευκαιρία για μια συνολική αντιμετώπιση του παράκτιου μετώπου στη σχέση του με την πόλη (Εικόνα 1).

Εικόνα 1: Σχέδιο γενικής διάταξης Φαληρικού Όρμου (Πηγή: Renzo Piano - Ολοκληρωμένη ανάπλαση Φαληρικού Όρμου, 2012)

Το πρόγραμμα ανάπλασης είναι βασισμένο στην προμελέτη που εκπονήθηκε από το γραφείο του διεθνούς φήμης αρχιτέκτονα Renzo Piano. Βάσει αυτού, η ανάπλαση του Φαληρικού Όρμου θα αποτελέσει ένα διακεκριμένο έργο -"ναυαρχίδα", με διεθνή ακτινοβολία, που θα προκαλέσει το ενδιαφέρον τόσο των Ελλήνων όσο και των ξένων επισκεπτών. Οι βασικοί στόχοι του εγχειρήματος αφορούσαν: α) Στη δημιουργία ενός πάρκου δημοσίου ενδιαφέροντος, υπερτοπικού χαρακτήρα, με μητροπολιτική εμβέλεια, με στόχο την περιβαλλοντική αναβάθμιση της περιοχής, μέσω εκτεταμένων χρήσεων πρασίνου, αναψυχής, πολιτισμού, αθλητισμού και ψυχαγωγίας, β) στην αρμονική λειτουργική και αισθητική διασύνδεση του υφιστάμενου αστικού ιστού και του παράκτιου μετώπου, αποκαθιστώντας την χαμένη για χρόνια επικοινωνία πόλης και θάλασσας και γ) στην αντιπλημμυρική προστασία, των πολύπαθων όμορων δήμων Καλλιθέας, Μοσχάτου αλλά και της ευρύτερης περιοχής.

Η σημασία της ανάπλασης είναι καθοριστική για τη σχέση της πόλης με το παράκτιο μέτωπο. Η ανάπλαση οδήγησε στην επίλυση μιας σειράς προβλημάτων που είχε προκαλέσει η προτέρα κατάσταση. Ωστόσο, ο σχεδιασμός δεν κατάφερε να αντιμετωπίσει σε βάθος το ζήτημα της διασύνδεσης του Φαληρικού Όρμου με την πόλη, καθώς η πρόταση μοιάζει να ενισχύει τη χρήση του ΙΧ αυτοκινήτου, σε συνδυασμό με την απουσία ενός ολοκληρωμένου συστήματος μετακινήσεων με χρήση των ΜΜΜ και εναλλακτικών μορφών κίνησης. Η παρούσα έρευνα έρχεται να απαντήσει σε αυτό το κενό και να θέσει το ζήτημα της αειφορικής διασύνδεσης του Φαληρικού όρμου.

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ - ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ

Προκειμένου να αξιολογηθεί το θέμα της αειφορικής διασύνδεσης του Φαληρικού Όρμου με την πόλη, ακολουθείται η εξής μεθοδολογία: διαμορφώνονται τρία σενάρια συνδεσιμότητας, τα οποία συγκρίνονται μεταξύ τους με αειφορικά κριτήρια. Το σενάριο 1 είναι το σενάριο βάσης ή μηδενικό σενάριο, στο οποίο ο Φαληρικός Όρμος διατηρείται στην υφιστάμενη κατάσταση (Εικόνα 2). Το σενάριο 2 εξετάζει τη διασύνδεση του Φαληρικού Όρμου με την πόλη, μέσω ήπιων παρεμβάσεων, με χαμηλό σχετικά κόστος κατασκευής, περιορισμένο κόστος μετακίνησης και αφορά στη δημιουργία δικτύου πεζόδρομων και ποδηλατόδρομων μέσα στον αστικό ιστό και ενίσχυση της υφιστάμενης φύτευσης στις νέες αυτές διαδρομές (Εικόνα 3).

Εικόνα 2: Γενικός χάρτης επεμβάσεων σεναρίου 1

Εικόνα 3: Γενικός χάρτης επεμβάσεων σεναρίου 2

Το σενάριο 3 υιοθετεί τις δράσεις του σεναρίου 2, αλλά αναπτύσσει πρόσθετα μια σειρά επεμβάσεων μεγάλης κλίμακας, που έχουν ως στόχο την απεξάρτηση των κατοίκων της πόλης από το ΙΧ, όπως η ενίσχυση των ΜΜΜ, η χωροθέτηση νέων γραμμών τραμ, η δημιουργία σημαντικών χώρων πρασίνου που ευνοούν τις μετακινήσεις εντός του αστικού ιστού, η δημιουργία πάρκου πρασίνου-πολλαπλών δραστηριοτήτων, καθώς και ζώνης ελεύθερης

αυτοκινήτου, και τέλος η καθιέρωση μπλε και πράσινων διαδρομών, με την ανάπλαση της κοίτης του Ιλισού, της διαδρομής παράλληλα με τις γραμμές του Η.Σ.Α.Π. (Εικόνα 4).

Εικόνα 4: Γενικός χάρτης επεμβάσεων σεναρίου 3

Από το τρίπτυχο της αειφορίας, επιλέγονται περιβαλλοντικά, κοινωνικά και οικονομικά κριτήρια [12]. Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στην επιλογή αυτών των κριτηρίων, έτσι ώστε να αποφεύγονται τα αποτελέσματα διπλής μέτρησης [13]. Σε κάθε κριτήριο αντιστοιχεί κι ένας δείκτης ο οποίος ποσοτικοποιείται μέσω της χρήσης λογισμικού, μέσω ηλεκτρονικού ερωτηματολογίου ή με τη συγκέντρωση και καταγραφή ποσοτικών στοιχείων από χάρτες ή σχέδια. Στην περίπτωση της Ολοκληρωμένης Ανάπλασης του Φαληρικού Όρμου, επιλέγονται συνολικά δέκα κριτήρια βιωσιμότητας, τα οποία περιγράφουν επαρκώς και τα τρία σενάρια.

Προκειμένου να εκτιμηθεί η αειφορικότητα αυτών των τριών σεναρίων και να ιεραρχηθούν τα σενάρια αυτά σε σχέση με το βαθμό ανταπόκρισης στην αειφορική διασύνδεση, έγινε εφαρμογή της μεθόδου πολυκριτηριακής ανάλυσης, 'MultiAttribute Utility Theory' (MAUT), ως μέθοδος που σέβεται τα αξιώματα της συνέχειας, της συγκρισιμότητας και της ιεράρχησης [14]. Η μέθοδος είναι ιδανική για την αξιολόγηση της βιωσιμότητας ενός έργου, υπό την προϋπόθεση ότι επιλέγονται επαρκή κριτήρια [13], και χρησιμοποιείται για να βοηθήσει τους λήπτες αποφάσεων να αποκτήσουν κρίση για την λήψη των αποφάσεων, τους παράγοντες και τις προτεραιότητες [15]. Για τους συγκεκριμένους υπολογισμούς, χρησιμοποιείται το εργαλείο της [16].

Η επιλογή των περιβαλλοντικών κριτηρίων έγινε με γνώμονα την αξιολόγηση της ποιότητας και της προστασίας του περιβάλλοντος και του αέρα. Επιλέχθηκαν 5 κριτήρια από την ανάλυση κύκλου ζωής συστημάτων [17], τα οποία αφορούν:

- Στην υπερθέρμανση του πλανήτη (με δείκτη το δυναμικό υπερθέρμανσης και μονάδα μέτρησης τις ισοδύναμες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα -CO_2)
- Στην πιθανότητα όξινης βροχής (με δείκτη το δυναμικό όξυνσης και μονάδα μέτρησης τις ισοδύναμες εκπομπές διοξειδίου του θείου -SO_2).
- Στην προστασία των υδάτινων συστημάτων (με δείκτη το δυναμικό ευτροφισμού και μονάδα μέτρησης τις ισοδύναμες εκπομπές αζώτου -N).
- Στην προστασία της στοιβάδας του όζοντος(με δείκτη το δυναμικό εξασθένισης στοιβάδας όζοντος και μονάδα μέτρησης τις ισοδύναμες εκπομπές χλωροφθορανθράκων -CFCs).
- Στην προστασία από το νέφος (με δείκτη το δυναμικό αιθαλομίχλης και μονάδα μέτρησης τις ισοδύναμες εκπομπές όζοντος -O_3).

Για κάθε ένα από τα παραπάνω περιβαλλοντικά κριτήρια, η συσχέτιση των ρύπων με την προστασία του περιβάλλοντος, συνδυάζεται άμεσα με την ποσότητα και το είδος των οχημάτων, με τα οποία πραγματοποιείται η διασύνδεση του παράκτιου μετώπου με τις αστικές περιοχές. Κατά συνέπεια, ο περιορισμός της χρήσης των ΙΧ οχημάτων, και η κάλυψη των αναγκών μετακίνησης με άλλα μέσα μικρότερης ή και μηδενικής συμμετοχής στην εκπομπή ρύπων (πχ. ποδήλατο, πατίνια, πεζή κ.ά.), παίζει καθοριστικό ρόλο στην αειφορική διασύνδεση του Φαληρικού Όρμου με την πόλη. Τα περιβαλλοντικά κριτήρια ποσοτικοποιούνται με τη χρήση αντίστοιχων περιβαλλοντικών δεικτών οι οποίοι εκτιμήθηκαν μέσω του λογισμικού Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (Life Cycle Analysis), ATHENA Impact Estimator 3.3, το οποίο έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε έρευνα και πρακτική για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σύνθετων συστημάτων [18], [19], [20]. Πρόκειται για μια μεθοδολογία, η οποία έχει ως κύριο στόχο τον αντικειμενικό υπολογισμό και την ανάλυση των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων, οι οποίες σχετίζονται με προϊόντα, διεργασίες ή δραστηριότητες [21].

Η επιλογή των κοινωνικών κριτηρίων έγινε με γνώμονα τον άνθρωπο και συγκεκριμένα την ανθρώπινη υγεία και την βελτίωση της ποιότητας ζωής και των συνθηκών διαβίωσης στο αστικό περιβάλλον κι επιλέχθηκαν 3 κοινωνικά κριτήρια που αφορούν:

- Στην προστασία της δημόσιας υγείας μέσω της μείωσης των αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα (με δείκτη τα αιωρούμενα σωματίδια επιβλαβή για την υγεία και μονάδα μέτρησης τις ισοδύναμες εκπομπές PM2.5).
- Στην ενίσχυση του διαθέσιμου πρασίνου στην πόλη (με δείκτη τις νέες επιφάνειες πρασίνου και μονάδα μέτρησης τα τετραγωνικά μέτρα (m^2) νέων χώρων πρασίνου.
- Στη βελτίωση του αστικού τοπίου (με δείκτη την αρνητική επιρροή μεταφορικών μέσων στο τοπίο και μονάδα μέτρησης τη βαθμονόμηση της αισθητικής επιρροής διαφόρων οχημάτων από τους πολίτες σε μια κλίμακα από το 1 έως το 10).

Για τον υπολογισμό του δείκτη του 1ου κριτηρίου έγινε χρήση του λογισμικού ανάλυσης κύκλου ζωής, ATHENA Impact Estimator 3.3. Για τον υπολογισμό του 2ου κριτηρίου, οι δείκτες προέκυψαν από τον υπολογισμό των νέων επιφανειών πρασίνου που προτείνονται στα σενάρια 2 και 3. Για τον υπολογισμό του δείκτη του 3ου κριτηρίου κρίθηκε σκόπιμη η αξιολόγηση της αισθητικής του κάθε τύπου διασύνδεσης από τους ίδιους τους πολίτες, μέσω ηλεκτρονικού ερωτηματολογίου, με χρήση της εφαρμογής Google Forms και ακολούθησε επεξεργασία των αποτελεσμάτων μέσω του υπολογιστικού προγράμματος Excel.

Η οικονομική παράμετρος διαδραματίζει πάντα καθοριστικό ρόλο στην επιλογή των δράσεων ενός προγράμματος, καθώς ο προϋπολογισμός ενός έργου, σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να αποβεί απαγορευτικός για την υλοποίηση του ίδιου του έργου. Στην παρούσα έρευνα, επιλέχθηκαν 2 οικονομικά κριτήρια που αφορούν:

- Στο κόστος μετακίνησης για τη μετάβαση σε ένα χώρο πρασίνου μέσα στην πόλη(με δείκτη το κόστος μετακίνησης σε €).
- Στο κόστος των κατασκευών (με δείκτη το κόστος κατασκευών σε €).

Για τον υπολογισμό του δείκτη που αφορά στο 1ο κριτήριο, το κόστος υπολογίστηκε ανάλογα με τον τύπο του μέσου που κάθε φορά θα χρησιμοποιήσει και την απόσταση που θα διανύσει στην περίπτωση που γίνεται χρήση ΙΧ οχήματος. Στο κόστος μετακίνησης συμπεριλαμβάνεται ανηγμένος, ο χρόνος για να μεταβεί κανείς στο παράκτιο μέτωπο, ο χρόνος που απαιτείται για την εξεύρεση θέσης στάθμευσης (αν η μετακίνηση είναι με ΙΧ), ο κυκλοφοριακός φόρτος του οδικού δικτύου, ο χρόνος επιστροφής, και οι εναλλακτικές δυνατότητες μετακινήσεων με τα ΜΜΜ η κάθε άλλο πρόσφορο μέσο. Για τον υπολογισμό του δείκτη που αφορά στο 2ο κριτήριο έγινε χρήση τιμών πραγματικών στοιχείων κόστους από εγκεκριμένα τιμολόγια δημοσίων έργων και παρόμοια έργα, βάσει της Απόφαση Αρίθμ. ΔΝΣγ/οικ.35577/ΦΝ466/2017 [22]. Τα κόστη απαλλοτριώσεων υπολογίστηκαν από την χρήση τιμών ζώνης στην περιοχή, ενώ η εκτίμηση

των ποσοτικών στοιχείων προέκυψε από μετρήσεις μέσω Google Earth και του σχεδιαστικού λογισμικού AutoCAD.

3.1. Παραδοχές

Η εμφάνιση του COVID-19 αποτέλεσε για τον πλανήτη μας ένα πρωτόγνωρο γεγονός που επηρέασε την καθημερινότητα των πολιτών. Όπως δυστυχώς διαπιστώνουμε από τα νέα δεδομένα της καλοκαιρινής περιόδου 2020, αποτελεί ένα φαινόμενο δύσκολα ελεγχόμενο, που για ένα σημαντικό χρονικό διάστημα θα εξακολουθεί να μας επηρεάζει. Το γεγονός αυτό αποτέλεσε την βασική παραδοχή ως προς την επισκεψιμότητα και τους φόρτους των διαφόρων μέσων που μεταβαίνουν στο πάρκο. Με βάση τα παραπάνω, υιοθετήθηκαν οι εξής παραδοχές:

- Η συνολική έκτασης του πάρκου μετά την αφαίρεση του δικτύου κυκλοφορίας και των κτιριακών εγκαταστάσεων ανέρχεται στα 645,000 m^2. Λόγω του Covid-19, τηρήθηκε για κάθε άτομο που επισκέπτεται το πάρκο η απόσταση των 2 m από το διπλανό του, θεωρώντας ότι για κάθε επισκέπτη αναλογεί χώρος 16m^2.
- Η επισκεψιμότητα του πάρκου, καθορίστηκε στο 100% της πληρότητας για τα Σαββατοκύριακα και στο 60% για τις καθημερινές.
- Επιλέχθηκαν τέσσερεις ευρύτερες περιοχές που επισκέπτονται συχνότερα το Πάρκο, το κέντρο των Αθηνών, ο Πειραιάς, οι όμοροι δήμοι Καλλιθέας και Μοσχάτου και τέλος τα νότια προάστια.
- Ο αριθμός των επισκεπτών από τις περιοχές αυτές καθορίστηκε ποσοστιαία από το σύνολο των επισκεπτών συναξιολογώντας: τις ανάγκες των τεσσάρων περιοχών για χώρους πρασίνου και επαφής με το θαλάσσιο στοιχείο και τη δυνατότητα κάλυψης των αναγκών αυτών εντός των ορίων του Δήμου, τον πληθυσμό των περιοχών και την απόσταση στην οποία βρίσκονται οι περιοχές αυτές από το Φαληρικό Όρμο. Συγκεκριμένα για την Αθήνα το ποσοστό των επισκεπτών καθορίστηκε στο 35% του συνόλου των επισκεπτών, από τα Νότια προάστια σε 25%, και από τον Πειραιά και τις περιοχές της Καλλιθέας-Μοσχάτου σε 20%.
- Ως μέση απόσταση από το Φαληρικό Όρμο καθορίστηκαν τα 6.30 km για την Αθήνα, τα 3,10 km για τον Πειραιά, τα 5.10 km για τα Νότια Προάστια και τα 2.20 km την Καλλιθέα-Μοσχάτο.

Όσον αφορά στις μετακινήσεις με ΙΧ:

- Κάθε αυτοκίνητο πληρώνεται με 2 άτομα, θεωρώντας τους περιορισμούς για τον COVID-19.
- Η μέση κατανάλωση για κύκλο πόλης των ΙΧ αυτοκινήτων, προέκυψε από την κατανάλωση κύκλου πόλης στα 8.67 lt/100 km [23].

Όσον αφορά στις μετακινήσεις με ΜΜΜ:

- Για τις ακτοπλοϊκές διασυνδέσεις οι αποστάσεις από το Φαληρικό Όρμο, καθορίστηκαν στα 6.71 km μέχρι Ελληνικό και στα 3.04 km μέχρι τον Πειραιά.
- Λόγω το COVID-19, η δυναμικότητα των ΜΜΜ έχει περιοριστεί στο 50% της συνολικής τους χωρητικότητας, ήτοι σε 40 επιβάτες ανά λεωφορείο, 128 επιβάτες ανά συρμό τραμ, και 5 επιβάτες ανά ηλεκτρικό καραβάκι.
- Ειδικά για το σενάριο 3, που γίνεται χρήση όλων των ΜΜΜ, το 40% χρησιμοποιεί το λεωφορείο και το 60% χρησιμοποιεί το τραμ για τις μετακινήσεις, ενώ το 5% των συνολικών μετακινήσεων που πραγματοποιούνται από τα Νότια Προάστια και 5% των συνολικών μετακινήσεων που πραγματοποιούνται από τον Πειραιά, χρησιμοποιεί το ηλεκτρικό καραβάκι.

Όσον αφορά στις καταναλώσεις ανά ΜΜΜ, για τα λεωφορεία, η κατανάλωση ανέρχεται στα 28,882 lt/100km [24], για το τραμ στις 2.58 kWh/100km [25] και για τα ηλεκτρικά καραβάκια στις 71.3 kWh/100km [26].

Με βάση τις παραπάνω παραδοχές, και λαμβάνοντας υπόψη τις δράσεις προς την πλευρά της βιώσιμης κινητικότητας, για κάθε ένα από τα τρία σενάρια, έγινε η θεώρηση της διασύνδεσης του πάρκου στο παράκτιο μέτωπο ως κάτωθι (Πίνακας 1).

Πίνακας 1:Ποσοστιαία χρήση μέσων μετακίνησης ανά σενάριο

Σενάριο	ΙΧ αυτοκίνητα	ΜΜΜ	Ποδήλατο-Πεζή
Σενάριο 1	80%	20%	-
Σενάριο 2	40%	40%	20%
Σενάριο 3	10%	60%	30%

Μετά τον καθορισμό των κριτηρίων και την ποσοτικοποίηση των δεικτών, με διαφορετικές μεθόδους, ακολούθησε ο καθορισμός του βαθμού σπουδαιότητας των κριτηρίων που έχουν επιλεγεί, με τον προσδιορισμό αντίστοιχων συντελεστών βαρύτητας, που αποδίδονται σε αυτά και αντικατοπτρίζουν το σύστημα αξιών και προτιμήσεων του λήπτη αποφάσεων [27].

Οι ενδιαφερόμενοι καλούνται να ιεραρχήσουν την σημαντικότητα των κριτηρίων αξιολόγησης ενώ για τον καθορισμό των συντελεστών βαρύτητας, έγινε χρήση ηλεκτρονικού ερωτηματολογίου. Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε μέσω της εφαρμογής Google Forms μέσα από ένα δείγμα 101 ερωτηθέντων και η επεξεργασία των αποτελεσμάτων έγινε μέσω του υπολογιστικού προγράμματος Excel, από όπου προέκυψαν οι συντελεστές βαρύτητας που απεικονίζονται στον Πίνακα 2. Από την εφαρμογή της μεθόδου προέκυψαν τα αποτελέσματα που φαίνονται στον Πίνακα 3.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

Όπως μπορεί να διακρίνει κανείς από τον πίνακα 3, το σενάριο που ικανοποιεί περισσότερο απ' όλα, τα δέκα εξεταζόμενα κριτήρια βιωσιμότητας και κρίνεται ως το πλέον αειφορικό, είναι το σενάριο 3, των σημαντικών παρεμβάσεων στην ευρύτερη περιοχή μελέτης, με βαθμολογία 0.919. Ακολουθεί το σενάριο 2, των ήπιων επεμβάσεις μικρού σχετικά κόστους κατασκευής, με βαθμολογία 0.533, ενώ πολύ χαμηλά στην βαθμολογία, όσον αφορά στην αειφορική του διάσταση, ακολουθεί το σενάριο 1 με βαθμολογία 0.081.

Το σενάριο 3, συνδυάζει τις επεμβάσεις του σεναρίου 2, με πρόσθετες επεμβάσεις ενίσχυσης των ΜΜΜ, και δημιουργίας χώρων πρασίνου στις περιοχές μελέτης (πάρκο πρασίνου, αξιοποίηση του Ιλισού ως μπλε και πράσινης διαδρομής κ.ά.). Η ιεράρχησή του, οφείλεται κατ΄ αρχάς στην υψηλή βαθμολόγηση όλων των περιβαλλοντικών κριτηρίων, τα οποία σε σχέση με το σενάριο βάσης εμφανίζουν βελτίωση των περιβαλλοντικών συνθηκών κατά 87.5%. Η ενίσχυση των ΜΜΜ με τη δημιουργία νέων γραμμών τραμ που κινούνται με ηλεκτρισμό, η καθιέρωση πλωτών μετακινήσεων με ηλεκτρικά καραβάκια, αλλά και η ενίσχυση του πλέγματος πεζοδρόμων και ποδηλατόδρομων εντός του αστικού ιστού επιτυγχάνει τη μείωση της χρήση των ιδιωτικών μέσων μεταφοράς και συνεπώς τον περιορισμό των συμβατικών καυσίμων, με τις θετικές περιβαλλοντικές συνέπειες από τον περιορισμό στις εκπομπές ρύπων. Εξίσου σημαντική για τις κοινωνικές παραμέτρους είναι άλλωστε και η βελτίωση που επιτυγχάνεται στην προστασία της υγείας των πολιτών, σε ποσοστό 87.5% σε σχέση με το σενάριο βάσης. Η ενίσχυση των ΜΜΜ και η χρήση του ποδηλάτου και της πεζής μετακίνησης, ως μέσων με περιορισμένη έως και μηδενική αρνητική επιρροή στο αστικό τοπίο, επιβεβαιώνεται από την αξιολόγηση του κριτηρίου βελτίωσης της αισθητικής του αστικού τοπίου, η οποία ανέρχεται στο 72.3%, σε σχέση με το σενάριο 1.

Πίνακας 2: Συντελεστής βαρύτητας για κάθε κριτήριο

Πυλώνας	Προστασία περιβάλλοντος					Κοινωνική ισότητα			Οικονομική ευημερία	
Κριτήριο	Υπερθέρμανση του πλανήτη	Όξινη βροχή	Ευτροφισμός	Στοιβάδα του όζοντος	Νέφος	Αιωρούμενα σωματίδια	Βελτίωση του αστικού τοπίου	Δημιουργία νέων αστικών χώρων πρασίνου	Κόστος μετακίνησης για τη μετάβαση σε χώρο πρασίνου	Αρχικό κόστος επένδυσης
Δείκτης	CO_2 eq	SO_2 eq	N eq	CFC-11 eq	O_3 eq	PM2.5 eq	Αρνητική επιρροή των μεταφορών στο τοπίο	Νέες επιφάνειες πρασίνου	Κόστος μετακίνησης	Κόστος τεχνικών έργων / απαλλοτριώσεων
Συντελεστής βαρύτητας (κλίμακα 1-5)	4.75	4.50	4.38	4.60	4.68	4.74	4.50	4.86	3.57	3.55

Πίνακας 3: Ποσοτικά αποτελέσματα για κάθε κριτήριο και σενάριο

Πυλώνας	Προστασία περιβάλλοντος					Κοινωνική ισότητα			Οικονομική ευημερία	
Κριτήριο	Υπερθέρμανση του πλανήτη	Όξινη βροχή	Ευτροφισμός	Στοιβάδα του όζοντος	Νέφος	Αιωρούμενα σωματίδια	Βελτίωση του αστικού τοπίου	Δημιουργία νέων αστικών χώρων πρασίνου	Κόστος μετακίνησης για τη μετάβαση στο Πάρκο	Αρχικό κόστος επένδυσης
Μονάδες	kg CO_2 eq	kg SO_2 eq	kg N eq	kg CFC-11 eq	kg O_3 eq	kg PM2.5 eq	κλίμακα: 1-10	m^2	€	€
Σενάριο 1	790,134,508	3,939,070	237,909	0.04	115,459,302	106,270,14	7.39	0	444,834,262	0
Σενάριο 2	395,560,565	1,971,994	119,103	0.02	57,801,737	53,201,42	6.46	117,938	231,221,381	38,640,071
Σενάριο 3	99,121,141	494,179	29,843	0.00	14,483,052	13,338,71	2.05	354,037	72,479,095	492,964,539

Μεγάλη είναι πλέον και η αύξηση των φυτεύσεων στην πόλη, με την δημιουργία σημαντικών πόλων πρασίνου, πράσινων διαδρομών (ανάπλαση ποταμού Ιλισού και γραμμή ΗΣΑΠ), αλλά και δεντροφυτεύσεων των νέων πεζόδρομων και ποδηλατόδρομων που κατασκευάζονται. Πέραν της σημαντικής επιφάνειας των εκτάσεων που φυτεύονται σε σχέση την υφιστάμενη κατάσταση, το πράσινο τριπλασιάζεται σε σύγκριση με το σενάριο 2.

Όσον αφορά στις οικονομικές παραμέτρους του σεναρίου 3, η ενίσχυση του δικτύου μεταφορών με νέες γραμμές τραμ, αλλά και οι απαλλοτριώσεις που θα απαιτηθούν για τη δημιουργία του οικολογικού πάρκου στην οδό Πειραιώς, είναι επιλογές αρκετά δαπανηρές, που ανεβάζουν σημαντικά το κόστος υλοποίησης του έργου. Ωστόσο, παρά τη αξιοσημείωτη αύξηση του κόστους κατασκευών, η οποία συγκεντρώνει τη χαμηλότερη βαθμολογία από όλα τα κριτήρια του σεναρίου, η παράμετρος αυτή αντισταθμίζεται στο οικονομικό κομμάτι με τη σημαντική μείωση του κόστους μετακίνησης (83.7%), αλλά και από την αξία των υπόλοιπων δράσεων (περιβαλλοντικών και κοινωνικών) του σεναρίου αυτού. Επίσης, από μια σύγκριση των σεναρίων, διαπιστώνουμε ότι το κόστος κατασκευής των έργων του σεναρίου 3 ισούται με 1.1 φορές το συνολικό ετήσιο κόστος μετακίνησης του σεναρίου 1. Με δεδομένο το περιορισμένο κόστος ταξιδιού του σεναρίου 3, σε σύντομο χρονικό διάστημα μπορεί να ισοσκελισθεί το εφάπαξ κόστος κατασκευών υλοποίησης του έργου.

Ακολουθεί το σενάριο 2, το οποίο επιχειρεί με ήπιες επεμβάσεις χαμηλού κόστους κατασκευών, να περιορίσει την κίνηση των ΙΧ οχημάτων και να ενισχύσει τις μετακινήσεις με τα ΜΜΜ και εναλλακτικούς τρόπους. Το σενάριο αυτό βελτιώνει σημαντικά τις συνθήκες συνδεσιμότητας του σεναρίου 1, μέσω του περιορισμού του αριθμού των ΙΧ οχημάτων στην περιοχή, και της ενίσχυσης της χρήσης των ΜΜΜ, του ποδηλάτου και της πεζής μετακίνησης, οδηγώντας σε ανάλογο περιορισμό των ρύπων και κατά συνέπεια στην προστασία του περιβάλλοντος από τις βλαπτικές εκπομπές ρύπων των οχημάτων. Αυτό απεικονίζεται με την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών κριτηρίων, οι οποίοι στο σενάριο 2, παρουσιάζουν μια βελτίωση της τάξης του 49.9% σε σχέση με το σενάριο βάσης. Αντίστοιχη είναι και η βελτίωση που προκύπτει στο κριτήριο της υγείας, εξαιτίας του περιορισμού των ΙΧ οχημάτων. Το πράσινο συνδυάζεται με την ανάπτυξη του νέου δικτύου πεζοδρόμων και ποδηλατόδρομων, που περιορίζουν το αυτοκίνητο και βελτιώνουν τις συνθήκες κίνησης στο αστικό περιβάλλον. Ωστόσο, από τη βαθμολόγησή του, παρά τον υψηλό συντελεστή βαρύτητας, υστερεί σε σχέση με τα υπόλοιπα κριτήρια του σεναρίου, αφήνοντας περιθώρια για μεγαλύτερη ενίσχυσή του.

Χαμηλή αξιολόγηση εμφανίζει και το κριτήριο της βελτίωσης του αστικού περιβάλλοντος, καθώς ο περιορισμός των ΙΧ οχημάτων δεν καταφέρνει τελικά να περιορίσει σημαντικά την αρνητική επιρροή των μεταφορικών μέσων στην πόλη. Η βελτίωση έναντι του σεναρίου βάσης περιορίζεται στο 12.6%. Όσον αφορά στα οικονομικά κριτήρια, το κόστος των μετακινήσεων, περιορίζεται κατά 48.8% σε σχέση με το σενάριο 1, εξακολουθεί όμως να παραμένει υψηλό παρότι ισοσταθμίζεται από τη θετική αξιολόγηση των περιβαλλοντικών και κοινωνικών κριτηρίων. Τέλος το κριτήριο του κόστους κατασκευών, συγκεντρώνει την υψηλότερη βαθμολογία σε σχέση και με τα υπόλοιπα κριτήρια του σεναρίου, καθώς οι κατασκευές που υλοποιούνται στο σενάριο αυτό επιτυγχάνουν σημαντικά αποτελέσματα στους τομείς του περιβάλλοντος και της κοινωνίας, χωρίς να επιβαρύνουν ιδιαίτερα οικονομικά το έργο. Το σενάριο 1 υστερεί σε όλα τα κριτήρια συγκεντρώνοντας την μικρότερη μεσοσταθμική βαθμολογία, με μοναδική εξαίρεση το κριτήριο του κόστους κατασκευών, καθώς στο σενάριο αυτό δεν πραγματοποιούνται νέες κατασκευές και αξιολογείται ως το λιγότερο αειφορικό, όσον αφορά στη διασύνδεση του Φαληρικού Όρμου με την πόλη. Μέσω της ανάλυσης ευαισθησίας που εφαρμόσθηκε με 4 εναλλακτικές περιπτώσεις συντελεστών στάθμισης των δέκα κριτηρίων, τα αποτελέσματα ιεράρχησης των τριών σεναρίων παρέμειναν τα ίδια, με μικρές διαφοροποιήσεις ως προς τη βαθμολόγηση κάθε σεναρίου. Από αυτό προκύπτει ότι η γνώμη των πολιτών σχετικά με τη βαρύτητα του κάθε κριτηρίου, δεν επηρέασε την ιεράρχηση των εξεταζόμενων σεναρίων. Σε κάθε περίπτωση όμως η γνώμη των πολιτών βαρύνει υπέρ των περιβαλλοντικών και κοινωνικών κριτηρίων, ενώ μικρό είναι το ενδιαφέρον για τους οικονομικούς δείκτες. Παρόμοια συμπεράσματα προέκυψαν τόσο από την έρευνα των [28], καθώς και από την έρευνα των [29], σε μεγαλύτερο δείγμα.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σημαντικός τομέας της σημασία των παρακτίων μετώπων για την πόλη είναι η διασύνδεσή τους με τον αστικό ιστό, ο τρόπος δηλαδή με τον οποίο επιτυγχάνεται η επικοινωνία του παράκτιου μετώπου με την πόλη. Για το λόγο αυτό, επιλέχθηκε ως μελέτη περίπτωσης, η «ολοκληρωμένη ανάπλαση του Φαληρικού Όρμου», η οποία βρίσκεται στο στάδιο έναρξης των εργασιών της Β΄ Φάσης του προγράμματος. Σκοπός της έρευνας ήταν να διερευνήσει τις δυνατότητες διασύνδεσης του παράκτιου μετώπου του Φαληρικού Όρμου, ως πόλου μητροπολιτικής εμβέλειας, με την ευρύτερη περιοχή και

την πόλη των Αθηνών, με βάση τις αρχές της αειφορίας. Με δεδομένο ότι η περιοχή μελέτης βρίσκεται σε επαφή με τον αστικό ιστό, η έρευνα εστίασε στην ανάπτυξη προτάσεων αειφορικής διασύνδεσης του Φαληρικού Όρμου με την πόλη, με βάση το δίπολο περιορισμός της χρήσης του ΙΧ αυτοκινήτου και ενίσχυση της χρήσης των ΜΜΜ και των εναλλακτικών μορφών κίνησης, θεωρώντας τις πληρότητες των μέσων μεταφοράς και του εξεταζόμενου χώρου, που έχουν τεθεί για την προστασία από την πανδημία. Διερευνήθηκαν 3 σενάρια, το μηδενικό, των ήπιων επεμβάσεων και των επεμβάσεων μεγάλης κλίμακας, τα οποία αξιολογήθηκαν με την επιλογή αντίστοιχων δεικτών που εκφράζουν δέκα κριτήρια αειφορίας. Η ιεράρχησή τους έγινε με τη μέθοδο της πολυκριτηριακής ανάλυσης. Από αυτή, προέκυψε ως ο πιο αειφορικός τρόπος διασύνδεση του Φαληρικού Όρμου με την πόλη, η εφαρμογή επεμβάσεων μεγάλης κλίμακας, οι οποίες αποβλέπουν στον περιορισμό της χρήσης των ΙΧ αυτοκινήτων, στην ενίσχυση των μετακινήσεων με τα ΜΜΜ και στις μετακινήσεις μέσω εναλλακτικών μορφών κίνησης όπως το ποδήλατο ή πεζή, σε ένα βελτιωμένο αστικό τοπίο, με δίκτυο πεζόδρομων, ποδηλατόδρομων και χώρων παρόδιου πρασίνου. Το σενάριο ολοκληρώνεται με την δημιουργία πράσινων διαδρομών στον αστικό ιστό, (ανάπλαση Ιλισού ποταμού, αξιοποίηση ζώνης παράλληλα με τις γραμμές του ΗΣΑΠ), την κατασκευή πάρκου πρασίνου και πολλαπλών δραστηριοτήτων και την καθιέρωση ζώνης ελεύθερης αυτοκινήτου, στα πλαίσια της αποτροπής της χρήσης ΙΧ αυτοκινήτου.

Το σημαντικά αυξημένο κόστος κατασκευών, του σεναρίου αυτού, δημιουργεί ερωτηματικά για την εφικτότητα της υλοποίησης του. Συνήθως, η ελληνική πραγματικότητα, ενώ υιοθετεί σενάρια επεμβάσεων μεγάλης κλίμακας, «συνθηκολογεί», λόγω οικονομικής αδυναμίας, αλλά και εξαιτίας του πολιτικού μερικές φορές κόστους (πχ. των απαλλοτριώσεων), αδυνατεί να τα πραγματοποιήσει. Στην πράξη αυτό, που βλέπουμε να εφαρμόζεται, είναι ήπια έργα ανάπλασης με σημαντικά χαμηλότερο κόστος υλοποίησης και σίγουρα πολύ μικρότερο πολιτικό κόστος, αλλά και αμφίβολα αποτελέσματα επιτυχίας. Όπως φάνηκε κι από την παρούσα ανάλυση, αν υιοθετηθεί το μηδενικό σενάριο (που προς αυτό φαίνεται να οδεύει η πραγματικότητα), το σημαντικό για την περιοχή και για την πόλη αυτό πάρκο, μπορεί να προκαλέσει ιδιαίτερα περιβαλλοντικά προβλήματα, λόγω της μη διασφάλισης της αειφορικής συνδεσιμότητάς του με τα γύρω αστικά του κέντρα. Είναι επιτακτικό λοιπόν στις περιπτώσεις, σημαντικών έργων αλλά με μεγάλο κόστος κατασκευής να έχει να έχει διερευνηθεί η ολοκληρωμένη, αειφορική διασυνδεσιμότητά τους με τις γύρω περιοχές, προκειμένου να μην προκύπτουν νέες αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Επισημαίνεται ότι οι σημαντικές επιπτώσεις στην ποιότητα του περιβάλλοντος και στην προστασία της δημόσιας υγείας που προκύπτουν από την εφαρμογή παρόμοιων ολοκληρωμένων σεναρίων, λειτουργούν ως αντίλογος στο αυξημένο κόστος της κατασκευής, καθώς το μη αναστρέψιμο του χαρακτήρα τους μπορεί σε κάποιες περιπτώσεις, να οδηγήσει σε πολύ μεγαλύτερες οικονομικές επιβαρύνσεις. Η εφαρμογή προγραμμάτων επέμβασης όπως το αναδειχθέν με τη συγκεκριμένη μεθοδολογία, αποτελούν μια ολιστική προσέγγιση στο ζήτημα της αειφορικής διασύνδεσης των παράκτιων μετώπων με τον αστικό ιστό, αποσκοπώντας στην επίλυση των πολυδιάστατων προβλημάτων που προκάλεσε και προκαλεί η χρήση του ΙΧ αυτοκινήτου για τις μετακινήσεις μέσα στην πόλη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Hassan, F., 2011, “Water History for our Times”. International Hydrological Programme, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Paris.

[2] Benevolo, L., 1980, The History of the City, Scolar Press, London.

[3] Bütüner, B., 2006, “Waterfront Revitalization as a Challenging Urban Issue in Istanbul”, Proc. 42nd ISoCaRP Congress, Istanbul, Turkey.

[4] Κοκκώσης, Χ. και Τσάρτας Π., 2001, Βιώσιμη Τουριστική Ανάπτυξη και Περιβάλλον, Εκδόσεις Κριτική ΑΕ, Αθήνα.

[5] Μίχου, Α., 2018, Θαλάσσια μέτωπα και Περιβαλλοντικός Σχεδιασμός, Σύνθετα Όρια. Διπλωματική Εργασία στο: Περιβαλλοντικός Σχεδιασμός Πόλεων και Κτιρίων, ΕΑΠ, Πάτρα.

[6] Bruttomesso, R., 1993, Working on the Water’s Edge. in R. Bruttomesso (eds.), Waterfronts- A New Frontier for Cities on Water, Venice: International Center Cities on Water, pp. 10-11.

[7] Nepravishta et al., 2014. “Waterfront Planning for Sustainable Development of Natural and Archeological Heritage”, Proc. 2nd ICAUD International Conference in Architecture and Urban Design, Tirana, Albania, Paper No. 368.

[8] Ragheb, A., 2017, “Sustainable Waterfront Development—A Case Study of Bahary in Alexandria, Egypt”, Journal of Civil Engineering and Architecture, 11, pp. 380-394.

[9] Burke, L., Kura, Y., Kassem, K., Revenga, C., Spalding, M., McAllister, D., Caddy, J., 2001, Coastal Ecosystems. Washington, DC: World Resources Institute.

[10] Sharifi, A., and Khavarian-Garmsir, A. R., 2020, “The COVID-19 pandemic: Impacts on cities and major lessons for urban planning, design, and management”. Science of the Total Environment, pp142391.

[11] Τραυλός, Ι., 1960. Πολεοδομική εξέλιξις των Αθηνών, Εκδόσεις Καππόν, Αθήνα

[12] United Nations, 1987, Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future. A/42/427/04.08.1987.

[13] Herva, M., and Roca, E., 2013, “Review of Combined Approaches and Multi-Criteria Analysis for Corporate Environmental Evaluation”. Journal of Cleaner Production, 39, pp. 355-371.

[14] Ishizaka, A., and Nemery, P., 2013, Multi-Criteria Decision Analysis. Willey & Sons Ltd, Chichester

[15] Ρούσης, Μ., 2009,Θεωρητική Μελέτη Πολυκριτηριακών Μεθόδων Λήψης Αποφάσεων. Διπλωματική εργασία στη Σχολή Θετικών Επιστημών-Τμήμα Πληροφορικής. Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη

[16] Alexandri, E., 2019, MAUT for the Energy Upgrade of Dwellings. Mendeley Data. Reference Number: 10.17632/d2g67rz5hg.2. [Online]. Διαθέσιμο: http://dx.doi.org/10.17632/d2g67rz5hg.2

[17] Chomkhamsri et al., 2011, “International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook: Review Schemes for Life Cycle Assessment”. Στο: “Towards Life Cycle Sustainability Management”. Springer, Dordrecht, pp. 107-117.

[18] O'Connor, J., and Bowick, M., 2014. Advancing Sustainable Design with Life Cycle Assessment. Athena Sustainable Materials Institute. SAB Magazine.

[19] Haapio, A., and Viitaniemi, P., 2008. “A Critical Review of Building Environmental Assessment Tools”. Environmental Impact Assessment Review, 28(7), pp. 469-482.

[20] Stek, E., DeLon, D., McDonnell, T., and Rodriguez, J., 2011, “Life Cycle Assessment Using ATHENA Impact Estimator for Buildings: A Case Study”. In Structures, Congress, pp. 483-494.

[21] Θεοφάνη, Χ., 2017. Βιωσιμότητα των Διατηρητέων Προσφυγικών Πολυκατοικιών της Λεωφόρου Αλεξάνδρας - Υπολογισμός του Περιβαλλοντικού τους Αποτυπώματος. Μεταπτυχιακή Εργασία στο: Προστασία Μνημείων, ΕΜΠ, Αθήνα.

[22] Εφημερίδα της Κυβέρνησης της Ελληνικής Δημοκρατίας, 2017, “Κανονισμός Περιγραφικών Τιμολογίων Εργασιών για Δημόσιες Συμβάσεις Έργων,” Απόφαση Αρίθμ. ΔΝΣγ/οικ.35577/ΦΝ466/2017 (ΦΕΚ1746/Β/19.05.2017), Εθνικό Τυπογραφείο, Αθήνα.

[23] Natural Resources Canada, 2019, Fuel Consumption Guide 2019, Canada.

[24] Petkakis, C., and Nikolaou, K., 2009, “Environmental Impact Evaluation of Biodiesel Use in Global and Local Scale” Proc. 3rd Conference in Green Chemistry and Sustainable Development, Hellenic Green Chemistry Network, Thessaloniki.

[25] Le Féon, S., et al., 2012, “Global Warming Impact Assessment of Urban Mobility Using Motivation Trip Perspective – A Case Study of Saint-Etienne, France”. International Journal of Environmental Science and Engineering Research, pp. 0976-3708.

[26] Pencheva, V., et al., 2012, “Study of the Use of Alternative Energy Sources in Inland Waterway Transport”. Transport Problems, 14 (3), 109-120.

[27] Δομαζινάκης, Φ., 2010, Πολυκριτηριακή προσέγγιση στη διαδικασία επιλογής υπεργολάβου μεγάλων έργων για λογαριασμό βιομηχανικής μονάδας. Διπλωματική εργασία, Τμήμα Οικονομικών και Κοινωνικών Επιστημών, Πανεπιστήμιο Μακεδονίας.

[28] Christidi, N.-O., and Alexandri, E., 2020, “Evaluation of the regeneration of Chalandri Stream; exploring blue and green infrastructure with sustainability indicators” 7th International Renewable and Clean Energy Conference, Yerevan.

[29] Alexandri, E., and Lampropoulos, A., 2020, “Which is the optimum option for parking in the city centre?” IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 410(1), pp 012-052.

[8] Ragheb, A., 2017, “Sustainable Waterfront Development—A Case Study of Bahary in Alexandria, Egypt”, Journal of Civil Engineering and Architecture, 11, pp. 380-394.

[9] Burke, L., Kura, Y., Kassem, K., Revenga, C., Spalding, M., McAllister, D., Caddy, J., 2001, Coastal Ecosystems. Washington, DC: World Resources Institute.

[10] Sharifi, A., and Khavarian-Garmsir, A. R., 2020, “The COVID-19 pandemic: Impacts on cities and major lessons for urban planning, design, and management”. Science of the Total Environment, pp142391.

[11] Τραυλός, Ι., 1960. Πολεοδομική εξέλιξις των Αθηνών, Εκδόσεις Καππόν, Αθήνα

[12] United Nations, 1987, Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future. A/42/427/04.08.1987.

[13] Herva, M., and Roca, E., 2013, “Review of Combined Approaches and Multi-Criteria Analysis for Corporate Environmental Evaluation”. Journal of Cleaner Production, 39, pp. 355-371.

[14] Ishizaka, A., and Nemery, P., 2013, Multi-Criteria Decision Analysis. Willey & Sons Ltd, Chichester

[15] Ρούσης, Μ., 2009,Θεωρητική Μελέτη Πολυκριτηριακών Μεθόδων Λήψης Αποφάσεων. Διπλωματική εργασία στη Σχολή Θετικών Επιστημών-Τμήμα Πληροφορικής. Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη

[16] Alexandri, E., 2019, MAUT for the Energy Upgrade of Dwellings. Mendeley Data. Reference Number: 10.17632/d2g67rz5hg.2. [Online]. Διαθέσιμο: http://dx.doi.org/10.17632/d2g67rz5hg.2

[17] Chomkhamsri et al., 2011, “International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook: Review Schemes for Life Cycle Assessment”. Στο: “Towards Life Cycle Sustainability Management”. Springer, Dordrecht, pp. 107-117.

[18] O'Connor, J., and Bowick, M., 2014. Advancing Sustainable Design with Life Cycle Assessment. Athena Sustainable Materials Institute. SAB Magazine.

[19] Haapio, A., and Viitaniemi, P., 2008. “A Critical Review of Building Environmental Assessment Tools”. Environmental Impact Assessment Review, 28(7), pp. 469-482.

[20] Stek, E., DeLon, D., McDonnell, T., and Rodriguez, J., 2011, “Life Cycle Assessment Using ATHENA Impact Estimator for Buildings: A Case Study”. In Structures, Congress, pp. 483-494.

[21] Θεοφάνη, Χ., 2017. Βιωσιμότητα των Διατηρητέων Προσφυγικών Πολυκατοικιών της Λεωφόρου Αλεξάνδρας - Υπολογισμός του Περιβαλλοντικού τους Αποτυπώματος. Μεταπτυχιακή Εργασία στο: Προστασία Μνημείων, ΕΜΠ, Αθήνα.

[22] Εφημερίδα της Κυβέρνησης της Ελληνικής Δημοκρατίας, 2017, “Κανονισμός Περιγραφικών Τιμολογίων Εργασιών για Δημόσιες Συμβάσεις Έργων,” Απόφαση Αρίθμ. ΔΝΣγ/οικ.35577/ΦΝ466/2017 (ΦΕΚ1746/Β/19.05.2017), Εθνικό Τυπογραφείο, Αθήνα.

[23] Natural Resources Canada, 2019, Fuel Consumption Guide 2019, Canada.

[24] Petkakis, C., and Nikolaou, K., 2009, “Environmental Impact Evaluation of Biodiesel Use in Global and Local Scale” Proc. 3rd Conference in Green Chemistry and Sustainable Development, Hellenic Green Chemistry Network, Thessaloniki.

[25] Le Féon, S., et al., 2012, “Global Warming Impact Assessment of Urban Mobility Using Motivation Trip Perspective – A Case Study of Saint-Etienne, France”. International Journal of Environmental Science and Engineering Research, pp. 0976-3708.

[26] Pencheva, V., et al., 2012, “Study of the Use of Alternative Energy Sources in Inland Waterway Transport”. Transport Problems, 14 (3), 109-120.

[27] Δομαζινάκης, Φ., 2010, Πολυκριτηριακή προσέγγιση στη διαδικασία επιλογής υπεργολάβου μεγάλων έργων για λογαριασμό βιομηχανικής μονάδας. Διπλωματική εργασία, Τμήμα Οικονομικών και Κοινωνικών Επιστημών, Πανεπιστήμιο Μακεδονίας.

[28] Christidi, N.-O., and Alexandri, E., 2020, “Evaluation of the regeneration of Chalandri Stream; exploring blue and green infrastructure with sustainability indicators” 7th International Renewable and Clean Energy Conference, Yerevan.

[29] Alexandri, E., and Lampropoulos, A., 2020, “Which is the optimum option for parking in the city centre?” IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 410(1), pp 012-052.

ΑΕΙΦΟΡΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΒΑΣΙΚΩΝ ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ

Ευριπίδης Χανιάς[1] (*), Αργυρώ Δημούδη[1,2]

[1]Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο,
[2] Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης,
e-mail: hanias_euro@yahoo.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Διαχρονικά, το περιβάλλον είναι ένα από τα πιο πολύτιμα αγαθά της ύπαρξης του ανθρώπινου είδους. Η διαφύλαξη του ήταν ανέκαθεν χρέος της πολιτείας και υποχρέωση του συνόλου των πολιτών. Από τη δεκαετία του 1990 ακόμη ήταν έκδηλη η ανησυχία για το ζήτημα της προσέγγισης της κλιματικής αλλαγής και της διαφύλαξης της περιβαλλοντικής ισορροπίας, τόσο σε εθνικό όσο και σε ευρωπαϊκό επίπεδο.

Η προστασία του περιβάλλοντος και η ανεύρεση τρόπων εξοικονόμησης ενέργειας μέσω νέων τρόπων σχεδιασμού και εφαρμογής αντίστοιχων τεχνικών και συστημάτων, αποτελούν παγκόσμια απαίτηση και πεδίο αναζήτησης για τις χώρες που διαθέτουν σημαντικής ισχύος και μεγέθους Ένοπλες Δυνάμεις (ΕΔ) ανά την υφήλιο.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας διερευνώνται και οργανώνονται τα κριτήρια για μια ολιστική προσέγγιση σχεδιασμού βασικών στρατιωτικών εγκαταστάσεων με χαρακτηριστικά αειφορίας, εξεταζόμενα τόσο στη μακροκλίμακα, όσο και στη μικροκλίμακα μιας περιοχής. Παρατίθενται οι παράγοντες επιλογής θέσης και γίνεται η ανάλυση των φυσικών παραγόντων της μακροκλίμακας που επιδρούν στη στρατιωτική εγκατάσταση. Γίνεται παράθεση κριτηρίων σχεδιασμού και παρουσιάζονται τα ειδικά κριτήρια σχεδιασμού που πρέπει να διέπουν τη βασική στρατιωτική εγκατάσταση. Στόχος είναι η οργάνωση, ιεράρχηση των κριτηρίων και των οδηγιών σχεδιασμού με στόχο την αειφορία, οι οποίες είναι κατάλληλες για στρατιωτικές εγκαταστάσεις.

Αυτό εξακριβώνεται και μέσα από παραδείγματα των ΕΔ των ΗΠΑ και Ευρωπαϊκής Ένωσης και ο τρόπος που προσεγγίζουν το σχεδιασμό και την υλοποίηση της προστασίας του περιβάλλοντος στις μόνιμες στρατιωτικές εγκαταστάσεις τους. Επιπλέον, γίνεται μια σύντομη παρουσίαση και αποτίμηση των προσπαθειών των Ελληνικών ΕΔ για την υλοποίηση αειφορικού σχεδιασμού σε κτίρια και εγκαταστάσεις τους.

Λέξεις Κλειδιά: *Ελληνικές Ένοπλες Δυνάμεις, Αειφορία, Σχεδιασμός στρατιωτικών εγκαταστάσεων, Εξοικονόμηση ενέργειας*.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διαφύλαξη του περιβάλλοντος ήταν ανέκαθεν χρέος της πολιτείας και υποχρέωση του συνόλου των πολιτών. Σύμφωνα με το άρθρο 2 του Ν.1650/1986[1], ως περιβάλλον ορίζεται «*το σύνολο των φυσικών - ανθρωπογενών παραγόντων και στοιχείων που βρίσκονται σε αλληλεπίδραση και επηρεάζουν την οικολογική ισορροπία, την ποιότητα ζωής, την υγεία των κατοίκων, την ιστορική και πολιτιστική παράδοση και τις αισθητικές αξίες*».

Ο σχεδιασμός είναι μια διαδικασία με κύριο χαρακτηριστικό τη διασύνδεση της επιστημονικής γνώσης και της οργανωμένης δράσης. Είναι μια μορφή τεχνολογίας και είναι η τεχνική της χρήσης – της εφαρμογής της γνώσης, προκειμένου να προκύψει μεταβολή και αλλαγή[2] προς μια επιθυμητή κατεύθυνση. Πάνω από όλα, ο σχεδιασμός είναι μια από τις βασικές λειτουργίες ενός σύγχρονου κράτους (1).

Η προστασία του περιβάλλοντος και η ανεύρεση τρόπων εξοικονόμησης ενέργειας μέσω νέων τρόπων σχεδιασμού, αποτελούν πεδίο αναζήτησης για χώρες με σημαντικές ΕΔ ανά την υφήλιο. Έτσι και στη χώρα μας, το Υπουργείο Εθνικής Άμυνας (ΥΠΕΘΑ) και οι Ελληνικές Ένοπλες Δυνάμεις (ΕΕΔ), ακολουθώντας την διεθνή πρακτική και συμβαδίζοντας με την εγχώρια νομοθεσία, προστατεύουν το περιβάλλον. Άλλωστε αυτό συνάδει με την αποστολή τους, αφού ως φορέας άμυνας - ασφάλειας, οφείλουν να προασπίζονται την εδαφική ακεραιότητα και τα εθνικά συμφέροντα της χώρας και εκ του αποτελέσματος «*κατά την εκτέλεση της αποστολής τους αλληλεπιδρούν με το φυσικό και το ανθρωπογενές περιβάλλον*» (2).

2. ΣΤΡΟΦΗ ΤΩΝ ΕΝΟΠΛΩΝ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΣΕ ΒΙΩΣΙΜΕΣ ΛΥΣΕΙΣ

Η προστασία του περιβάλλοντος γενικότερα και η ανεύρεση τρόπων εξοικονόμησης ενέργειας μέσω νέων τεχνολογιών αποτελεί ένα σημαντικό πεδίο αναζήτησης για τις χώρες ΕΔ σημαντικής ισχύος και μεγέθους, οι οποίες αναγκαστικά στράφηκαν σε βιώσιμες λύσεις. Σύμφωνα με το Νικητάκο (3), οι ΕΔ των χωρών αυτών έθεσαν μία σειρά κοινά αποδεκτών μέτρων που εξασφαλίζουν την έστω και μερική αποδέσμευση τους από τις συμβατικές μορφές ενέργειας:

- Η μείωση της σπατάλης ενέργειας στις υπάρχουσες στρατιωτικές εγκαταστάσεις είναι η πρώτη και πιο σημαντική ενέργεια, διότι, αφενός θα πρέπει να τηρούν την υπάρχουσα επιχειρησιακή κατάσταση, αφετέρου δεν είναι δυνατόν να εφαρμοσθούν μεγάλης έκτασης διορθωτικά μέτρα λόγω του υψηλού κόστους.
- Η αύξηση της ενεργειακής απόδοσης στις νέες κατασκευές και τα σύγχρονα οπλικά συστήματα με βάση πλέον τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) και ταυτόχρονη απεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα.
- Η περιβαλλοντική σχεδίαση και η διαχείριση της για μείωση της εξάρτησης από καύσιμα με αύξηση της χρήσης ΑΠΕ, μείωση των αποβλήτων, αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας και βελτιστοποίηση περιβαλλοντικών πλεονεκτημάτων.

Η βελτίωση της ενεργειακής ασφάλειας μέσω της ασφάλειας παροχής και αποθήκευσης καυσίμων (αγωγοί, δεξαμενές, κλπ.) αποτελεί σημαντικό στοιχείο, ιδίως τη σύγχρονη εποχή που χαρακτηρίζεται από ασύμμετρες απειλές.

2.1. Το ενεργειακό παράδειγμα των ΗΠΑ

Γνωρίζοντας τα ανωτέρω μέτρα, είναι δυνατό να παρατεθεί ως καλή πρακτική και ορθό παράδειγμα εφαρμογής σχεδιασμού σε μόνιμες στρατιωτικές εγκαταστάσεις οι ΕΔ των ΗΠΑ, των οποίων το μέγεθος όσο και η πρωτοπορία σε θέματα τεχνολογίας θεωρούνται ως αναμφισβήτητα. Επιπλέον, για τις εγκαταστάσεις του οργανισμού αυτού, υφίσταται αριθμός ανοικτών πηγών[3] των οποίων η μελέτη δύναται να αποδώσει το μέγεθος της επιτυχίας.

Το Υπουργείο Άμυνας (ΥΠΑΜ) των ΗΠΑ θεωρεί ότι υφίστανται δυο σημαντικές προκλήσεις, που δύναται να καθορίσουν το μελλοντικό χαρακτήρα των εγκαταστάσεων. Η πρώτη είναι η ικανότητα να εξελιχθούν αυτές σε περισσότερο ανθεκτικές για τη στρατιωτική δύναμη που φιλοξενείται. Η δεύτερη είναι να παραμείνουν ικανές να υποστηρίξουν την αποστολή τους συνυπολογίζοντας επιμέρους

[1] Το ισχύον θεμελιώδες θεσμικό κείμενο για την προστασία του περιβάλλοντος.
[2] Κοινωνική, οικονομική, περιβαλλοντική.
[3] Μη διαβαθμισμένων.

παράγοντες, όπως το μικροκλίμα, η αστικοποίηση, οι οικονομικές συνθήκες, και άλλους, που αλλάζουν συνεχώς (4).
Έτσι, για πρώτη φορά το 2005 το ΥΠΑΜ και οι ΕΔ των ΗΠΑ, ακολουθώντας την ομώνυμη ομοσπονδιακή οδηγία, θέσπισαν τα Ενοποιημένα Κριτήρια για τις Εγκαταστάσεις (Unified Facilities Criteria) και τον οδηγό των εξειδικεύσεων για τις ενοποιημένες στρατιωτικές εγκαταστάσεις (Unified Facilities Guide Specifications, UFGS), ο οποίος και κωδικοποιήθηκε σε υπηρεσιακό κανονισμό το 2006. Εν συνεχεία με τον κανονισμό MIL STD 30007F τέθηκε σε εφαρμογή στις εγκαταστάσεις όλων των κλάδων, ο διακλαδικός χωροταξικός σχεδιασμός εγκαταστάσεων (5) που βασίστηκε στο αντίστοιχο του στρατού (έκδοσης έτους 1986) ο οποίος κωδικοποιήθηκε[4] και επικαιροποιήθηκε το έτος 2012 (4). Το 2011, το ΥΠΑΜ μεταξύ των έτερων δράσεων, με την πρωτοβουλία «μηδενικού ισοζυγίου» (Net Zero Initiative), αποφάσισε τη σταδιακή μετατροπή των μόνιμων στρατιωτικών εγκαταστάσεων σε εγκαταστάσεις όπου το συνολικό ενεργειακό προφίλ θα έχει μηδενικό ισοζύγιο, εστιάζοντας όχι σε μια (την ενεργειακή) αλλά σε τρεις κατηγορίες, δηλαδή στην κατανάλωση ενέργειας, ύδατος και παραγωγής αποβλήτων. Αρχικά, πραγματοποιήθηκε η επιλογή είκοσι στρατιωτικών βάσεων και των τεσσάρων κλάδων θέτοντας αντίστοιχους στόχους για επί τόπου παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ, για τον περιορισμό της κατανάλωσης ύδατος και την πρόληψη καταστροφής των υπόγειων και επιφανειακών υδάτινων πόρων της περιοχής και τη μείωση, την επαναχρησιμοποίηση και την ανακύκλωση των στερεών αποβλήτων (6).

2.2. Ενεργειακή αναζήτηση της Ευρωπαϊκής Ένωσης

Η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) έχοντας την εμπειρία των κοινών θεσμών σε πολλούς τομείς προχώρησε και στο τομέα της προστασίας του περιβάλλοντος. Στο άρθρο II-97 της Συνθήκης της Λισαβόνας επικαιροποιείται η προστασία του περιβάλλοντος αναφέροντας ότι «*το υψηλό επίπεδο προστασίας του περιβάλλοντος και η βελτίωση της ποιότητάς του πρέπει να ενσωματώνονται στις πολιτικές της Ένωσης και να διασφαλίζονται σύμφωνα με την αρχή της βιώσιμης ανάπτυξης*» (6). Μάλιστα το Σεπτέμβριο 2012, η ΕΕ εξέδωσε την οδηγία 01574/1252 με αντικείμενο «EU Military Concept on Environmental Protection and Energy Efficiency for EU-led Military Operations», η οποία περιέχει τις γενικές κατευθύνσεις για την προστασία του περιβάλλοντος και τη βέλτιστη ενεργειακή απόδοση σε όλες τις φάσεις των επιχειρήσεων. Επιπλέον, δια μέσω του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Άμυνας (ΕΟΑ) (European Defence Agency, EDA) ο οποίος αποτελεί την αιχμή του δόρατος της ΕΕ στην έρευνα και στη τεχνολογία, αφενός πραγματοποιείται η παρακολούθηση της εξέλιξης της ενεργειακής τεχνολογίας σε όλα τα στάδια από τη γένεση στην αποθήκευση, τη μεταφορά και τη διανομή της, αφετέρου χρηματοδοτούνται διάφορα καινοτόμα και μη, προγράμματα[5]. Συνάμα από το 2014, λειτουργεί η ομάδα εργασίας Ενεργείας και Περιβάλλοντος[6] η οποία «*υποστηρίζει το συλλογικό ταξίδι των συμμετεχόντων κρατών μελών προς την αύξηση της ανθεκτικότητας των ΥΠΑΜ, των ΕΔ και του αμυντικού τεχνολογικού και βιομηχανικού τομέα σε υφιστάμενα και αναδυόμενα τρωτά σημεία που προκύπτουν από στρατηγικές εκτιμήσεις σχετικά με την ενεργειακή ασφάλεια και την εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα, την ασφάλεια των πόρων του εφοδιασμού, την ασφάλεια των υδάτων και τις περιβαλλοντικές αλλαγές*»(7).

2.3. Περιβαλλοντική πολιτική ΥΠΕΘΑ

Στην Ελλάδα, το έτος 2007 το ΥΠΕΘΑ εξέδωσε σε κείμενο την περιβαλλοντική πολιτική του[7]. Ως βασικός άξονας της θεωρήθηκε η «*ευαισθητοποίηση και η υπευθυνότητα του συνόλου του προσωπικού των ΕΕΔ στα περιβαλλοντικά προβλήματα, δεδομένου ότι η προστασία του περιβάλλοντος και των φυσικών πόρων είναι ζωτικό θέμα και καθοριστικός παράγοντας για το μέλλον της Ελλάδας*» (8). Σύμφωνα με τα προαναφερθέντα, ο άξονας βασίζεται στους παρακάτω πυλώνες :

- Δόμηση νέου μοντέλου διοίκησης και ηγεσίας με ενσωμάτωση περιβαλλοντικής ηθικής
- Περιβαλλοντική εκπαίδευση.
- Δημιουργία δεσμών εμπιστοσύνης με την κοινωνία.
- Αποδοτικότερη διαχείριση μέσων και εγκαταστάσεων.
- Μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος επιχειρησιακών και λειτουργικών δραστηριοτήτων.

[4] Με αρίθμηση UFC 2-000-02AN.
[5] Θα γίνει αναφορά στην παράγραφο 2.4.
[6] Energy and Environment Working Group (EnE WG).
[7] Το κείμενο επικαιροποιήθηκε τα έτη 2014 και 2020.

2.4. Αποτίμηση των προσπαθειών των ΕΕΔ

Έχοντας υπόψη τα ανωτέρω τεθέντα, αλλά και επειδή η στρατιωτική υπηρεσία πλέον επιζητεί την ενσωμάτωση των αρχών βιώσιμης ανάπτυξης (8) στην καθημερινότητα της, διαμορφώθηκε μια σημαντική πρόκληση για αυτή. Παρατηρώντας και τα δεδομένα που αναπτύχθηκαν στην παράγραφο 2.1 και αφορούν την αλλοδαπή, οι ΕΕΔ οφείλουν να προετοιμαστούν και να εφαρμόσουν (στο μέτρο του δυνατού) νέες και καινοτόμες τεχνολογίες τόσο στην περίπτωση της επέκτασης επιμέρους υποδομών μιας βασικής στρατιωτικής εγκατάστασης, όσο και στην περίπτωση που θα προγραμματιστεί η εξ αρχής κατασκευή μιας εγκατάστασης αυτής της κατηγορίας.
Με βάση το υπογραφέν το έτος 2010, μνημόνιο συνεργασίας ΥΠΕΘΑ - τέως ΥΠΕΚΑ, προγραμματίστηκε η υλοποίηση δώδεκα δράσεων, οι περισσότερες εκ των οποίων αφορούσαν τις εγκαταστάσεις, όπως η εφαρμογή προγραμμάτων ΑΠΕ και ΕΞΕ, η εξέλιξη στρατοπέδων με τη δημιουργία προτύπων αειφόρου ανάπτυξης, προώθηση χρήσης φυσικού αερίου κ.α. (8), με σημαντικότερες τις εξής:

- Πρόγραμμα LIFE+/MECM[8], το οποίο μεταξύ των άλλων αφορούσε την εγκατάσταση ενός Συστήματος Διαχείρισης Ενέργειας (ΣΔΕ) σε τρεις βασικές στρατιωτικές εγκαταστάσεις (ανά κλάδο).
- Ενεργειακή αναβάθμιση σε τρία στρατιωτικά νοσοκομεία («Πράσινα» νοσοκομεία).
- Ενεργειακή αναβάθμιση ενός σημαντικού κτιρίου διοικητικών υπηρεσιών (Βοηθητικό κτίριο Γενικού Επιτελείου Ναυτικού, ΓΕΝ).

Πέραν των προαναφερθέντων δράσεων του εν λόγω μνημονίου, περατώθηκαν (ή και συνεχίζονται) μεσαίου και μικρού μεγέθους προγράμματα, τα οποία αφορούσαν και αυτά τις στρατιωτικές εγκαταστάσεις, όπως τα παρακάτω:

- Πρόγραμμα “Smart Blue Water Camp” που πραγματεύεται τη διαχείριση υδατικών πόρων σε στρατιωτικές εγκαταστάσεις κρατών-μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Με χρηματοδότηση του ΕΟΑ).
- Πρόγραμμα ανάπτυξης και εφαρμογής ΣΔΕ σε 3 βασικές στρατιωτικές εγκαταστάσεις, ανά κλάδο (Με χρηματοδότηση του ΕΟΑ).
- Προγράμματα ενεργειακής αναβάθμισης σε επιμέρους κτιριακές εγκαταστάσεις.
- Ανάπτυξη αυτόνομων μικρής ισχύος ΑΠΕ σε εγκαταστάσεις μικρονήσων.

3. ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΕΕΔ

Προτού γίνει εισαγωγή στην εφαρμογή της αειφορίας στις βασικές εγκαταστάσεις των ΕΕΔ είναι απαραίτητο να παρατεθούν μερικές πληροφορίες για αυτές. Ο όρος «στρατιωτική εγκατάσταση» χρησιμοποιείται ευρύτερα στην ελληνική υπηρεσιακή βιβλιογραφία προκειμένου να οριστεί το σύνολο των κτιρίων και λοιπών υποδομών οποιασδήποτε κλίμακας.

3.1 Κατηγοροποίηση εγκαταστάσεων

Λαμβάνοντας υπόψη την αποστολή, το μέγεθος αλλά και τη διασπορά τους, οι υφιστάμενες στρατιωτικές εγκαταστάσεις των ΕΕΔ δύνανται να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

- Ανάλογα με το είδος, σε: προσωρινές και μόνιμες.
- Αναλόγως με το μέγεθος, σε: μεγάλες εγκαταστάσεις (Στρατόπεδο βάσεως / Ναύσταθμος / Πολεμικό Αεροδρόμιο), μεσαίες εγκαταστάσεις (Στρατόπεδο / Αεροπορικό Απόσπασμα / Ναυτικό Κλιμάκιο) και σε μεμονωμένα κτίρια (Φυλάκιο προκάλυψης, Στρατιωτικό Οίκημα, Λέσχη Αξιωματικών).
- Αναλόγως της επιχειρησιακής δραστηριότητας, σε εγκαταστάσεις: στην περιοχή βάσεως και στην περιοχή επιχειρήσεων.
- Αναλόγως της θέσης, σε: εντός Ελλαδικής επικράτειας και εκτός αυτής.

3.2 Χαρακτηριστικά εγκαταστάσεων

Οι στρατιωτικές εγκαταστάσεις εντάσσονται στην κατηγορία του δομημένου περιβάλλοντος. Επίσης, η εγκατάσταση οποιασδήποτε κλίμακας και στους τρεις κλάδους των ΕΕΔ, «*είναι ένας ζωντανός οργανισμός*» (9), που λειτουργεί συνεχώς, 24 ώρες το 24ωρο, 12 μήνες το έτος, αποτελώντας ουσιαστικά έναν οικισμό. Το σύνολο των ατόμων που εργάζονται και διαβιώνουν σε μια στρατιωτική εγκατάσταση, βρίσκονται σε αρκετά μικρή απόσταση μεταξύ τους και με τον τρόπο αυτό δημιουργούνται ανάμεσά τους ορισμένες χωρικές και λειτουργικές σχέσεις (10).

[8] Πρόγραμμα LIFE 11 ENV/GR/938 "Military Energy and Carbon Management - MECM".

3.3. Φύση των ενοτήτων και υποενοτήτων

Ο αριθμός των ατόμων που διαβιεί και δραστηριοποιείται σε μια εγκατάσταση ποικίλει. Για τη βασική εγκατάσταση που εξετάζεται, είναι αυτό του στρατοπέδου βάσεως για τις χερσαίες δυνάμεις, του ναυστάθμου για τις ναυτικές και του πολεμικού αεροδρομίου για τις αεροπορικές και ως εκ τούτου, ο αριθμός αυτός κατατάσσει την εγκατάσταση σε μια τάξη μεγέθους μεταξύ χωριού (έως 2.000 κατοίκους) και κωμόπολης (μέχρι 10.000 κατοίκους). Μια ενδεικτική κατηγοριοποίηση και δυναμικότητα του στρατωνισμού ανά κλάδο και επίπεδο διοίκησης, παρουσιάζεται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1*. Κατηγοριοποίηση στρατωνισμού ανά κλάδο*

Α/Α	Ονομασία ανά κλάδο	Επίπεδο Διοίκησης	Ενδεικτικό μέγεθος προσωπικού
1	Στρατόπεδο βάσεως	Ταξιαρχία	1.200
2	Ναύσταθμος	--	>1.000
3	Πολεμικό Αεροδρόμιο	Πτέρυγα Μάχης	>1.000
Σημειώσεις:			
(1) Στα Στρατόπεδα Βάσεως εντάσσονται και τα αεροδρόμια της Αεροπορίας Στρατού του Ελληνικού Στρατού (ΕΣ).			
(2) Στα Πολεμικά Αεροδρόμια εντάσσονται και οι βάσεις ελικοπτέρων του Πολεμικού Ναυτικού (ΠΝ).			
(3) Ένας Ναύσταθμος κατηγοριοποιείται σε κύριο και δευτερεύοντα και ανάλογα κατανέμεται το μέγεθος του προσωπικού που απασχολείται σε αυτό. Εξυπηρετεί αριθμό πλοίων και εν ξηρά υπηρεσιών που δεν μπορούν να κατηγοριοποιηθούν.			

3.4. Τυπικές ενοτήτες

Σύμφωνα με τον Μπάκα (9) οι τυπικές ενότητες ενός στρατοπέδου διακρίνονται σε τρεις βασικές: την ενότητα της Διοίκησης, του Προσωπικού και των Οχημάτων – Μηχανοκινήτων. Λαμβάνοντας όμως υπόψη τις πρόσφατες εξελίξεις και τα χαρακτηριστικά της διακλαδικότητας, η τελευταία ενότητα θα μπορούσε ορθότερα να χαρακτηριστεί ως «ενότητα Υποστήριξης». Οι ενότητες αυτές υφίστανται σε όλες τις στρατιωτικές εγκαταστάσεις ανεξαρτήτως κλάδου, μεγέθους, αποστολής, σύνθεσης και υπηρεσιών που στεγάζονται σε αυτές.

4. ΕΞΕΤΑΣΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ-ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ

Περνώντας στα κριτήρια της χωροθέτησης των βασικών στρατιωτικών εγκαταστάσεων, αυτά πρέπει να εξεταστούν με αειφορική διάσταση σε τέσσερις και μία φάσεις, εκ των οποίων οι τρεις αφορούν στους τεχνικούς παράγοντες επιλογής καθώς και σε αυτά της επίδρασης της μακροκλίμακας και της μικροκλίμακας, ενώ ακολουθούν τα γενικά καθώς και τα ειδικά – λειτουργικά κριτήρια σχεδιασμού.

4.1. Τεχνικοί παράγοντες επιλογής

Οι τεχνικοί (όπως και οι τακτικοί) παράγοντες είναι σημαντικής αξίας δεδομένα από το οποία αρχίζει η επιλογική έρευνα για την αειφορική στρατιωτική εγκατάσταση. Οι τακτικοί παράγοντες δεν θα εξεταστούν εδώ, αλλά θα δοθεί έμφαση, στους τεχνικούς οι οποίοι μπορούν να προσδώσουν σημαντική αειφορική αξία στην εγκατάσταση. Η ακολουθούμενη σειρά εξετάσεων τους δεν είναι αξιολογική και ενδεικτικά είναι: η εγγύτητα ή μη αστικού κέντρου, οι οδοί προσπελάσεως, η ύπαρξη επαρκούς και κατάλληλης έκτασης, η σύνδεση με δίκτυο ύδρευσης, η κυριότητα του οικοπέδου, η ενότητα του χώρου καθώς και λοιποί τυχαίοι (9).

4.2. Χαρακτηριστικά μακροκλίμακας

4.2.1. Μορφολογία εδάφους

Η μορφολογία παίζει μεγάλο ρόλο. Προτιμούνται οι εκτάσεις σε κορυφές εδαφικών εξάρσεων ή οι παραθαλάσσιες περιοχές και αποφεύγονται οι κάμποι, εξαιτίας της ύπαρξης υγρασίας και της μη δυνατότητας φυσικού αερισμού (11). Είναι μη επιθυμητή η ύπαρξη μεγάλων κλίσεων στο έδαφος, διότι απαιτούν την κατασκευή έργων αντιστήριξης, αλλά ούτε και μικρών κλίσεων αφού δημιουργούνται προβλήματα αποστραγγίσεων – αποχετεύσεων (9).

4.3. Χαρακτηριστικά μικροκλίμακας

4.3.1. Σχήμα εγκατάστασης

Το σχήμα της εγκατάστασης παίζει σπουδαίο ρόλο και εξετάζεται στη φάση αυτή, διότι εντός της περιμέτρου της «εντάσσονται» όλα τα χαρακτηριστικά του μικροκλίματος. Η ενδεδειγμένη διάταξη είναι το ορθογώνιο σχήμα με σχέση διαστάσεων 1Χ1,5 ή και 1Χ2 (9). Αυτό συνάδει και με τον αειφορικό σχεδιασμό όταν η μεγάλη πλευρά των κτιρίων έχει το μέτωπο της προς το Νότο.

4.3.2. Ηλιασμός – Σκιασμός

Η ηλιακή πρόσοδος είναι ένας από τους βασικούς περιβαλλοντικούς παράγοντες που επηρεάζουν το μικροκλίμα (12). Όπως και στον αστικό ιστό, ο απρόσκοπτος ηλιασμός[9] των κτιρίων και των ελεύθερων επιφανειών της κάθε στρατιωτικής εγκατάστασης θεωρείται επιβεβλημένος, ιδίως κατά τη χειμερινή περίοδο κατά την οποία ο ήλιος βρίσκεται χαμηλά. Για λόγους οικονομίας, ευκολίας και στρατιωτικής τυποποίησης των κτιρίων, προτείνεται η υιοθέτηση μόνο ενός, του συστήματος άμεσου ηλιακού κέρδους με τη δέσμευση της ηλιακής ακτινοβολίας «*μέσα από τα γυάλινα ανοίγματα του κτηρίου, τα προσανατολισμένα προς το Νότο (ή με απόκλιση έως 30ο, ανατολικά ή δυτικά). Στην περίπτωση αυτή το κτίριο λειτουργεί ως συλλέκτης, αποθήκη και διανομέας της θερμότητας*» (13).

4.3.3. Προσανατολισμός κτιρίων

Ο ορθός προσανατολισμός για τα Ελλαδικά δεδομένα είναι ο Νότιος. Αυτός επιτρέπει να εισέρχεται η ηλιακή ακτινοβολία στον εσωτερικό χώρο το χειμώνα, ενώ, κατά τους θερινούς μήνες, καθώς ο ήλιος ανεβαίνει να είναι δυνατή η προστασία από τις τότε ενοχλητικές ακτίνες με ένα σκιάδιο ή ένα μικρό πρόβολο (9). Από την άλλη, στους χώρους διαβίωσης μιας στρατιωτικής εγκατάστασης εξυπηρετεί πολύ ο ανατολικός προσανατολισμός, διότι οι ηλιακή ακτινοβολία εισέρχεται στους εσωτερικούς χώρους τις πρωινές ώρες, όταν το προσωπικό βρίσκεται εκτός, για εκπαίδευση ή έτερες εργασίες.

4.3.4. Φύτευση

Η ύπαρξη πρασίνου είναι πολύ σημαντική αλλά και υψηλού συμβολισμού. Σκοπός της η καθαρότητα της ατμόσφαιρας, η προστασία από τον ήλιο, η κατάλληλη διοχέτευση του ανέμου, η προστασία από τους θορύβους (11), η απομόνωση μιας λειτουργίας ή η δημιουργία θέας προς μια κατεύθυνση και η υλοποίηση προσεγγίσεων (9). Η φύτευση χαμηλής και ψηλής βλάστησης, είναι δυνατό να παρέχει συνδυαστικά και με άλλους παράγοντες σοβαρό αειφορικό όφελος στο μικροκλίμα.

4.3.5. Αερισμός

Ο ατμοσφαιρικός αέρας είναι ένας ανανεώσιμος, μη αναλώσιμος φυσικός πόρος. Ο τρόπος κίνησης του αέρα είναι συνάρτηση της γεωμετρίας του αστικού ιστού (14). Ο αερισμός πρέπει να εξεταστεί διπτά. Αρχικά αφορά συνολικά την εγκατάσταση και εν συνεχεία αφορά το φυσικό αερισμό των εσωτερικών χώρων κάθε κτιρίου της.

4.3.6. Υλικά εξωτερικών χώρων

Τα δομικά υλικά[10] των εξωτερικών χώρων επηρεάζουν καθοριστικά τόσο το θερμικό όσο και το οπτικό περιβάλλον (13) και παίζουν σημαντικό ρόλο στο μικροκλίμα της κάθε περιοχής και φυσικά της στρατιωτικής εγκατάστασης. Μια σημαντική παράμετρος που πρέπει να προβλεφθεί, είναι η αποφυγή ευρείας κάλυψης του εδάφους με τεχνητά υλικά.

4.4. Κριτήρια σχεδιασμού

4.4.1. Εξοικονόμηση ενέργειας – Ενεργειακή αποδοτικότητα

Κυρίαρχος στόχος πρέπει να αποτελεί η απόλυτη εφαρμογή των όρων της Ενεργειακής Αποδοτικότητας (ΕΝΑ) και της Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΕΞΕ) σε κάθε νέο στρατιωτικό κτίριο με την πλήρη συμμόρφωση με τις διατάξεις του Κανονισμού Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων – ΚΕΝΑΚ (15). Η τυποποίηση τους εντός των ενοτήτων που περιγράφηκαν στην παράγραφο 3.3, βοηθά έως ένα βαθμό την εφαρμογή της ΕΝΑ και της ΕΞΕ, σε οποιοδήποτε γεωγραφική περιοχή της χώρας.

4.4.2. Παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ

Η χρήση ΑΠΕ είναι η λύση που ενδείκνυται, αφού η μείωση κάλυψης των ενεργειακών αναγκών της στρατιωτικής εγκατάστασης από τις συμβατικές πηγές ενέργειας (κυρίως τα ορυκτά καύσιμα), αποτελεί «μονόδρομο». Στη χώρα μας, για την πλειοψηφία των εγκαταστάσεων είναι δυνατή η χρήση της ηλιακής και της αιολικής ενέργειας, αφού παρέχεται ικανός αδόμητος χώρος. Εξαιρετικά ωφέλιμη είναι η χρήση ηλιακών θερμικών συστημάτων που χρησιμοποιούν ένα συνδυασμό καθρεπτών, φακών προκειμένου να συγκεντρώσουν μια άμεση δέσμη ηλιακής ακτινοβολίας προκειμένου να παράγουν θερμότητα, ηλεκτρική ενέργεια και καύσιμα (16). Είναι επίσης χρήσιμο να εξεταστούν *ad-hoc* και ανάλογα την εγκατάσταση, η χρήση μη διαδεδομένων ΑΠΕ, όπως της αβαθούς γεωθερμίας, της συμπαραγωγής ηλεκτρισμού – θερμότητας ή ακόμα και η χρήση βιομάζας.

[9] Δηλαδή, η «*επιδίωξη επιλεκτικής έκθεσης χώρων στην ηλιακή ακτινοβολία*» (14).
[10] Επιζητούνται υλικά εξωτερικών χώρων με υψηλή περιβαλλοντική απόκριση (21).

4.4.3. Θερμομόνωση κτιρίου

Η μόνωση κάθε στρατιωτικού κτιρίου σε όλες τις διαστάσεις του είναι σημαντική. Προφανώς, πρέπει να δοθεί προτεραιότητα στα κτίρια Διοίκησης και διαβίωσης, ενώ όσον αφορά τα κτίρια Υποστήριξης οι απαιτήσεις μεταβάλλονται, αναλόγως. Πρακτικά, αυτό θα πραγματοποιηθεί από το συνδυασμό τοποθέτησης καλής ποιότητας και ικανού πάχους μόνωσης στα εξωτερικά τοιχία, το δάπεδο και την οροφή, καθώς και τοποθέτηση υαλοπινάκων με διπλά υαλοστάσια χαμηλής εκπεμψιμότητας.

4.4.4. Διαχείριση ύδατος

Στο πλαίσιο μιας ολιστικής προσέγγισης του σχεδιασμού, αποτελεί αναγκαιότητα η ορθολογική διαχείριση του ποσίμου και μη, ύδατος. Η διαχείριση θα εστιάσει σε δύο τομείς, αφενός στη λειτουργία των κτιρίων και αφετέρου στις λοιπές δραστηριότητες που αφορούν τον υπαίθριο χώρο. Επίσης, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, είναι υψηλής αξίας είναι η σύνδεση (ή μη) με το τοπικό δίκτυο ύδρευσης.

4.4.5. Διαχείριση αποβλήτων / απορριμμάτων

Η αποφυγή ρύπανσης εντός και πέριξ της εγκατάστασης αποτελεί παράγοντα για την ποιότητα ζωής αλλά και την αειφορία. Είναι σημαντική η συστηματοποίηση των ενεργειών για τα στέρεα/υγρά απόβλητα/ απορρίμματα. Για τα Αστικά Στερεά Απορρίμματα (ΑΣΑ), αρκεί η εφαρμογή των πέντε επιλογών (πρόληψη, επαναχρησιμοποίηση, ανακύκλωση, ανάκτηση, ταφή) σε συνεργασία με τον τοπικό Φορέα Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων. Για τα υγρά απόβλητα, οι επιλογές είναι δύο. Εάν η εγκατάσταση βρίσκεται στα όρια κάποιου «Καλλικρατικού» Δήμου αρκεί η σύνδεση με το υπάρχον σύστημα ακαθάρτων. Στην περίπτωση μη εγγύτητας, είναι απαραίτητη – ουσιώδης, η κατασκευή μονάδας βιολογικής επεξεργασίας, η οποία πλέον αποτελεί συνήθη καλή πρακτική και για τις σημαντικές στρατιωτικές εγκαταστάσεις στη χώρα μας.

4.4.6. Διαχείριση λοιπών δικτύων

Στις προηγούμενες παραγράφους, αναφέρθηκε η ενέργεια από μη συμβατικές πηγές, η ύδρευση, η αποχέτευση και η εξυγίανση μιας στρατιωτικής εγκατάστασης, που υποστηρίζονται από τα αντίστοιχα δίκτυα. Επιπλέον, είναι κρίσιμο να προνοούνται σχεδιαστικά και έτερα δίκτυα για την ικανοποίηση ζωτικών λειτουργιών όπως: χορήγησης καυσίμου, πυρόσβεσης, συλλογής ομβρίων, τηλεθέρμανσης, παροχής δεδομένων - πληροφοριών και σημάτων, φωτεινής σηματοδότησης, και άλλες.

4.5. Ειδικά - λειτουργικά κριτήρια σχεδιασμού

Εκτός των προαναφερθέντων κριτηρίων των βασικών στρατιωτικών εγκαταστάσεων, υφίστανται επιπλέον και ικανός αριθμός ειδικών κριτήριων σχεδιασμού που δεν εμπλέκονται άμεσα στην αειφορική προσέγγιση, αλλά επηρεάζουν τον ευρύτερο χωροταξικό σχεδιασμό.

4.5.1. Ειδικές απαιτήσεις ασφαλείας

Απαραίτητα ο χωροταξικός σχεδιασμός πρέπει να λάβει υπόψη του τις ειδικές απαιτήσεις ασφαλείας που σχετίζονται με τα εξελιγμένα τεχνολογικά συστήματα που απαιτούνται να υπάρχουν στις στρατιωτικές εγκαταστάσεις. Ειδικά, όταν αυτές χρησιμοποιούνται και για συμμαχικές ανάγκες (ΝΑΤΟ ή ΕΕ), οι απαιτήσεις αυξάνονται κατακόρυφα. Ενδεικτικά, αναφέρονται η αντοχή των κτιρίων σε κρούση, σε διάτρηση και σε ωστικό κύμα, η συμπεριφορά τους σε σεισμικές φορτίσεις, η ασφάλεια των ηλεκτρονικών συστημάτων, των δικτύων και των ηλεκτρομαγνητικών εκπομπών.

4.5.2. Υπογειοποίηση εγκαταστάσεων

Μια ενδιαφέρουσα και «ρεαλιστική» πρόταση αντιμετώπισης από πλευράς χωροταξικού σχεδιασμού, είναι η μερική ή ολική υπογειοποίηση των στρατιωτικών εγκαταστάσεων σε φρέατα ή θαλάμους (17), πρακτική που δεν είναι άγνωστη στην εγχώρια στρατιωτική υπηρεσία διαχρονικά (πχ 21 οχυρά «Γραμμής Μεταξά»). Η υπογειοποίηση δύναται να προσφέρει και στον αειφορικό σχεδιασμό της εγκατάστασης.

4.5.3. Ειδικές κατασκευές

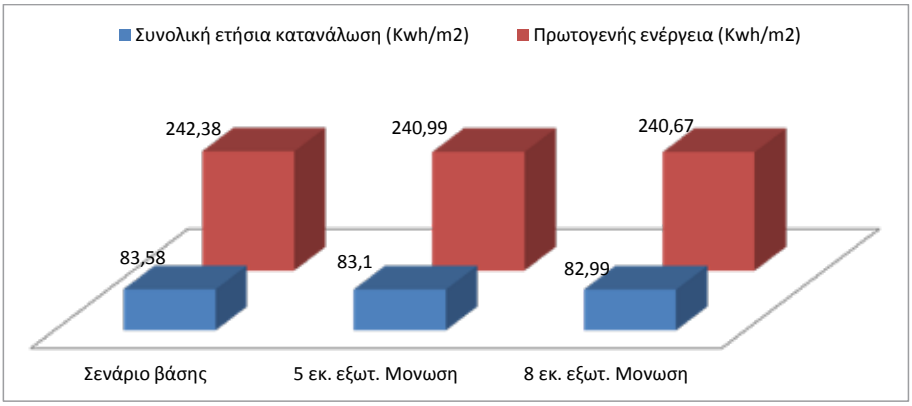
Εγγύς κάθε βασικής εγκατάστασης των ΕΕΔ, εξαιτίας επιχειρησιακών παραγόντων υφίσταται αριθμός «ειδικών κατασκευών», που βεβαίως ποικίλουν ανάλογα με τον κλάδο. Ως προς την χωροταξία, αποτελεί συνήθη πρακτική ο διαχωρισμός αυτών των ειδικών κατασκευών από την υπόλοιπη βασική στρατιωτική εγκατάσταση. Αυτές οι κατασκευές δύνανται να είναι χώροι αποθήκευσης καύσιμου[11] και αποθήκευσης πυρομαχικών - εκρηκτικών υλών κ.α.

[11] Κοινού και αεροπορικού.

5. ΣΥΝΤΟΜΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΛΕΤΩΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ

5.1. Ενεργειακή προσομοίωση κτιρίου

Εστιάζοντας στις δυνατότητες που παρέχει η ΕΞΕ και στο πλαίσιο της περιπτωσιολογικής μελέτης μιας βασικής εγκατάστασης που πραγματοποιήθηκε, εξετάστηκε το πλέον διαδεδομένο κτίριο διαβίωσης στην εγκατάσταση του ΕΣ, το οποίο είναι το κτίριο «Λόχου χωρητικότητας 120 ατόμων». Η ενεργειακή προσομοίωση έγινε με τη βοήθεια του προγράμματος EnergyPlus™, αφού πρώτα δημιουργήθηκε το τρισδιάστατο σχέδιο στο πρόγραμμα SketchUp. Το κτίριο χωρίστηκε σε τέσσερις θερμικές ζώνες, σύμφωνα και με τις κατευθύνσεις της Τεχνικής Οδηγίας ΤΕΕ με αριθμό 20701-1/2017. Πιο συγκεκριμένα, η πρώτη (διπλή) αποτελείται από οκτώ τυπικούς θαλάμους διαβίωσης προσωπικού (σε δυο τομείς-εκατέρωθεν κεντρικού άξονα του κτιρίου), η δεύτερη είναι η είσοδος-εσωτερικός προθάλαμος, η τρίτη αφορά τα πέντε γραφεία της διοίκησης. Η προσομοίωση αφορούσε χρονικό διάστημα ενός έτους (8.760 ώρες), έλαβε υπόψη τη συνεχή, επί ετήσια βάσης, λειτουργία του κτιρίου.
Αφού τα παραπάνω στοιχεία εισήχθησαν στο πρόγραμμα, έγινε προσομοίωση των δεδομένων του κτιρίου εκτελώντας την εντολή "simulate" στο IDF Editor, ώστε να δημιουργηθεί το σενάριο βάσης. Σύμφωνα με το σενάριο βάσης, η συνολική ετήσια κατανάλωση ενέργειας ("Total energy") υπολογίστηκε ότι ανέρχεται στις 83,58 kWh/m^2 (ή 61,78 MWh) και η πρωτογενής ενέργεια σε 242,38 kWh/m^2. Παρόλα αυτά, εξαιτίας του γεγονότος ότι η πραγματική ηλικία των κτιρίων έχει ξεπεράσει τα είκοσι έτη και λόγω της διακύμανσης των θερμοκρασιών μεταξύ θέρους και χειμώνα, αλλά και της φθίνουσας απόδοσης της υπάρχουσας μόνωσης του κτιρίου, προτάθηκε η ενίσχυση της θερμικής μόνωσης σε όλες τις όψεις. Προς επίλυση του προβλήματος της βελτίωσης της ΕΝΑ, θα δημιουργηθούν δύο εναλλακτικές υποθέσεις που θα ασχολούνται αποκλειστικά με τη βελτίωση του κελύφους του κτιρίου[12], για τους λόγους που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Στην πρώτη εναλλακτική υπόθεση, προκειμένου να μειωθούν οι ενεργειακές απώλειες τοποθετηθούμε εξωτερικά, επιπλέον της υπάρχουσας, νέα μόνωση από εξηλασμένη πολυστερίνη[13] πάχους 5 εκατοστών. Με βάση το σενάριο αυτό, η συνολική ετήσια κατανάλωση ενέργειας υπολογίζεται στις 61,43 MWh (ή 83,1 kWh/m^2) και η πρωτογενής ενέργεια σε 240,99 kWh/m^2 (ή 178,15 MWh). Στη δεύτερη εναλλακτική υπόθεση, τοποθετείται στην εξωτερική πλευρά της τοιχοποιίας, νέα μόνωση από το ίδιο υλικό αλλά με πάχος 8 εκατοστών. Κατόπιν, αφού εκτελείται εκ νέου προσομοίωση των δεδομένων του κτιρίου υπολογίζεται ότι η συνολική ετήσια κατανάλωση ενέργειας υπολογίζεται ότι ανέρχεται στις 61,34 MWh (ή 82,99 kWh/m^2) και η πρωτογενής ενέργεια σε 240,67 kWh/m^2 (ή 177,89 MWh). Αντίστοιχα, οι περιβαλλοντικοί δείκτες είναι για την υφιστάμενη κατάσταση, 239,71 kg CO_2/m^2 ή συνολικά 177,18 tn CO_2, για την πρώτη εναλλακτική 238,33 kg CO_2/m^2 ή συνολικά 176,14 tn CO_2 και για τη δεύτερη εναλλακτική υπόθεση 238,02 kg CO_2/m^2 ή συνολικά 175,92 tn CO_2.
Η μείωση στη κατανάλωση ενέργειας φαίνεται στο Διάγραμμα 1 και αποτελεί ισχυρό εργαλείο λόγω και της δυνατότητας επανάληψης των αποτελεσμάτων σε κάθε κτίριο αυτής της κατηγορίας, το οποίο απαντάται τουλάχιστον οκτώ φορές σε κάθε βασική στρατιωτική εγκατάσταση.



Διάγραμμα 1: Σύγκριση κατανάλωσης ενέργειας στην υφιστάμενη κατάσταση και εναλλακτικά σενάρια.

[12] Και όχι με άλλες «κατηγορίες» βελτίωσης.
[13] Η αφρώδης εξηλασμένη πολυστερίνη αποτελεί ένα αφρώδες πλαστικό υλικό, με συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας (λ) να κυμαίνεται από 0,031 μέχρι 0,041W/(mK) (25).

5.2. Χρήση ΑΠΕ

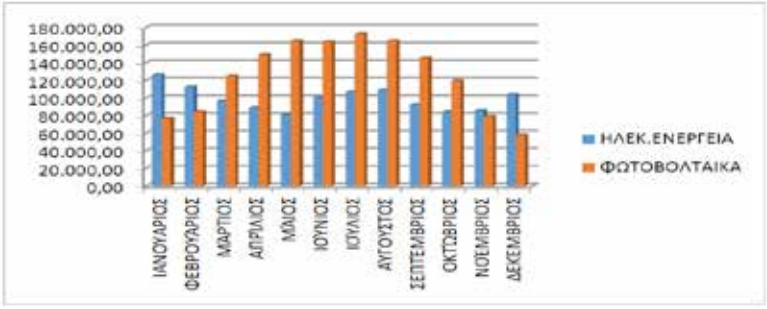
Μια ικανή λύση του ενεργειακού προβλήματος κάθε βασικής εγκατάστασης όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 4.4.2, είναι η χρήση της ηλιακής ενέργειας. Αυτό είναι δυνατό με τη δημιουργία ενός φωτοβολταϊκού πάρκου, συνδεδεμένο με το δίκτυο του ΔΕΔΔΗΕ. Μάλιστα, προτείνεται τα πλαίσια, να είναι μονοκρυσταλλικοί συλλέκτες με διαστάσεις 0,644 m X 1,282 m και ονομαστικής ισχύος 190 Wp[14], επί σταθερών βάσεων, τοποθετημένοι ανά τρείς, σε πλαίσια διαστάσεων με ύψος 1,932 m. και με πλάτος 1,282 m.

Οι βασικές αιτίες που προτείνεται η χρήση των σταθερών βάσεων πλαισίων[15] και όχι των συστημάτων ανίχνευσης της πορείας του ήλιου, εκτός από την ύπαρξη ικανού χώρου στη βόρεια πλευρά της εγκατάστασης, είναι η οικονομία στη δαπάνη για τη τοποθέτηση τους και η ευκολία στην απόσβεση της επένδυσης. Επιπλέον, ζητούμενο είναι η μέγιστη απολαβή ενέργειας των σταθερών φωτοβολταϊκών. Ένας πρακτικός κανόνας για να υπάρχει η μέγιστη απολαβή, είναι η τοποθέτηση των πάνελ με νότιο προσανατολισμό και με ανάλογη κλίση με το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής. Πάντως για τα ελληνικά δεδομένα, μια τυπική, χαρακτηριστική μέση κλίση είναι αυτή των 30 μοιρών (18).

Η συνολική ηλεκτρική ενέργεια ανά έτος, που δύναται να παραχθεί από αυτή την κατηγορία ΑΠΕ για την περιοχή της Αλεξανδρούπολης, ανέρχεται σε 1.505.790 kWh. Ο υπολογισμός της ενέργειας προήλθε από ανοικτό λογισμικό που υπάρχει στο διαδίκτυο, το οποίο μπορεί επίσης να μετρήσει και τις απώλειες. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα που αφορά την Αλεξανδρούπολη, οι συνολικές απώλειες υπολογίζονται στο 24,1%.

Συγκρίνοντας τα δεδομένα για την καταναλωθείσα ενέργεια για το έτος 2019, με τα αποτελέσματα ανά μήνα για τη ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τα στοιχεία του φωτοβολταϊκού πάρκου, εξάγεται το Διάγραμμα 2, από το οποίο διαπιστώνεται ότι η ηλιακή ενέργεια που παράγεται τη χρονική περίοδο από τον Μάρτιο έως και τον Οκτώβριο δύναται να υπερκαλύψει τις ανάγκες, ενώ τους υπόλοιπους τέσσερις μήνες πρέπει να συμπληρωθεί από το δίκτυο του ΔΕΔΔΗΕ.

Με βάση τα προαναφερθέντα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και λαμβάνοντας τις κατάλληλες ανά τόπο υποθέσεις για την έκταση των στρατιωτικών εγκαταστάσεων, το μέγεθος και την ποσότητα των κτιρίων ανά βασική στρατιωτική εγκατάσταση, είναι δυνατόν να εκτιμηθούν τα συνολικά οφέλη. Επί της ενεργειακής προσομοίωσης, λαμβάνοντας υπόψη ότι σε κάθε βασική στρατιωτική εγκατάσταση του ΕΣ υπάρχουν τουλάχιστον 8 κτίρια όμοια με αυτό που μελετήθηκε, είναι δυνατόν να πολλαπλασιαστεί η δυναμικότητα του εγχειρήματος και το συγκεκριμένο παράδειγμα να αποτελέσει οδηγό για τη γενίκευση των αποτελεσμάτων της έρευνας. Όσον αφορά τη χρήση τουλάχιστον μιας ΑΠΕ, αυτό είναι πολύ σημαντικό και ταυτόχρονα εφικτό, εξαιτίας της διαθεσιμότητας μεγάλων εκτάσεων και της μη ύπαρξης γειτονικών εμποδίων. Επιπρόσθετα, είναι πολύ σημαντικό το γεγονός ότι η μελέτη (που συνοπτικά παρουσιάστηκε στην παράγραφο 5) αφορά τη κατασκευή βασικών εγκαταστάσεων από την αρχή, η οποία θα έχει προφανώς θετικότερα αποτελέσματα, διότι θα συνυπολογίζει το μέγιστο δυνατό αριθμό αειφορικών παραγόντων και χαρακτηριστικών.



Διάγραμμα 2: Σύγκριση αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια (kWh) και παραγωγής φωτοβολταϊκών.

[14] Ενδεικτικά αναφέρεται ότι υπάρχει εγγύηση για την ισχύ των φωτοβολταϊκών πλαισίων δεν θα μειωθεί περισσότερο από το 10% της ονομαστικής αξίας στα 12 χρόνια και το 20% στα 25 χρόνια.

[15] «*Οι σταθερές βάσεις αποτελούν τον απλούστερο και οικονομικότερο τρόπο έδρασης φωτοβολταϊκών πάνελ*»(18).

6. ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΧΡΗΜΑΤΟΔΟΤΗΣΗΣ

Προκειμένου να υπάρξει η κατασκευή νέων βασικών στρατιωτικών εγκαταστάσεων με αειφορική αντίληψη, επιβάλλεται να υπάρχει και η ανάλογη χρηματοδότηση.

6.1. Υφιστάμενες δυνατότητες

Ο αποδεκτός τρόπος χρηματοδότησης νεόδμητων στρατιωτικών εγκαταστάσεων προέρχεται από τον προϋπολογισμό του ΥΠΕΘΑ και των Γενικών Επιτελείων (Γ.Ε.). Δυστυχώς, από το 2011 και μεταγενέστερα, λόγω της δημοσιονομικής πολιτικής, οι πιστώσεις ήταν εξαιρετικά περιορισμένες. Επίσης υφίστανται τα προγράμματα κοινής αμυντικής υποδομής που αφορούν στα έργα, μέσω των πακέτων υποδομής[16] του ΝΑΤΟ, τα οποία τα τελευταία έτη είναι και αυτά μειωμένα προς όφελος των ημιμόνιμων υποδομών που αναπτύσσει η συμμαχία. Επιπρόσθετα, μετά το 2010, υπάρχει η ευκαιρία εκτέλεσης έργων σε στρατιωτικές εγκαταστάσεις, με οικονομικούς πόρους Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς (ΕΣΠΑ), μέσω του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΝ). Μια έτερη πηγή, είναι τα κοινά προγράμματα της ΕΕ και αυτά υπό τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Άμυνας, πλέον αυτών που χρηματοδοτούνται από το ΕΣΠΑ. Αυτή αποτελεί «έμμεση» και όχι ολοκληρωμένη πηγή χρηματοδότησης, διότι υποστηρίζει την κατασκευή μιας σημαντικής της λειτουργίας και όχι όλης της αειφορικής εγκατάστασης. Τέλος, χρηματοδότηση μπορεί να προέλθει και από την προσπάθεια αξιοποίησης της περιουσίας που ανήκει στους κλάδους των ΕΕΔ, με την Υπηρεσία Αξιοποίησης Ακίνητης Περιουσίας ΕΔ (ΥΠ.Α.Α.Π.Ε.Δ) κατόπιν της ψήφισης του Ν.4407/2016.

6.2. Προτεινόμενες δυνατότητες

Πρώτη δυνατότητα, αποτελεί η συνέχιση της υποβολής προτάσεων για την ένταξη στα προγράμματα κατηγορίας ΕΣΠΑ. Αυτές όμως πρέπει να είναι πιο ολοκληρωμένες και να καλύπτουν περισσότερες και πιο σύνθετες λειτουργίες. Δεύτερη, είναι εφικτή με τη δημιουργία ενός χωριστού ταμείου σε επίπεδο ΥΠΕΘΑ (σε αναλογία με το «Πράσινο Ταμείο»[17] του ΥΠΕΝ), στο οποίο οι οικονομικοί πόροι, θα δεσμεύονται για τη δημιουργία αποκλειστικά στρατιωτικών εγκαταστάσεων με αειφορικό σχεδιασμό. Τρίτη πρόταση, η ανεύρεση οικονομικών πόρων από το τέλος που επιβλήθηκε στη χρήση πλαστικής σακούλας υπέρ του Ελληνικού Οργανισμού Ανακύκλωσης (Ε.Ο.ΑΝ.). Τέταρτη, αν και μη σύνηθες για τα ελληνικά δεδομένα, είναι η ανεύρεση ευεργετών-χορηγών κυρίως για την επέκταση ή ανακαίνιση παλαιότερων εγκαταστάσεων με βιοκλιματική αντίληψη. Τέλος, η ενεργοποίηση αριθμού ΣΔΙΤ (Συμπράξεων Δημόσιου-Ιδιωτικού Τομέα) για βασικές στρατιωτικές εγκαταστάσεις μπορεί να λειτουργήσει προς τη θετική κατεύθυνση.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο αειφορικός σχεδιασμός είναι πλέον επιβεβλημένος και για τις νέες μόνιμου χαρακτήρα στρατιωτικές εγκαταστάσεις. Μπορεί τα οικονομικά μεγέθη που απαιτούνται για την κατασκευή μιας τέτοιας εγκατάστασης με βάση τις αρχές της αειφορίας, να μην είναι ευκαταφρόνητα, ιδιαίτερα στη σημερινή εποχή όπου η οικονομική κρίση δεν αφήνει περιθώρια για «επενδύσεις».
Όμως υπάρχουν πολύ σημαντικοί λόγοι για να εφαρμοστούν οι αρχές αυτές. Πρώτον, η ανάγκη μείωσης των δαπανών λειτουργίας και συντήρησης των εγκαταστάσεων. Δεύτερον, η προστασία του περιβάλλοντος με οποιονδήποτε τρόπο και φυσικά με εγκαταστάσεις μηδενικού, ενεργειακού ή άλλου, ισοζυγίου. Τρίτον, είναι η απαίτηση για απόλυτη χρηστικότητα των εγκαταστάσεων. Υπάρχει πλέον απαίτηση και οι τρεις λόγοι να διέπουν το σχεδιασμό των σύγχρονων μόνιμων στρατιωτικών εγκαταστάσεων των ΕΕΔ. Άλλωστε τα αποτελέσματα της περιπτωσιολογικής μελέτης εφαρμογής της παραγράφου 5, «δικαιώνουν» την επιμονή στην αειφορική προσέγγιση, ενώ τα πολλαπλά οφέλη θα μεγιστοποιηθούν με τη μαζική εξ αρχής κατασκευή νέων αειφορικών εγκαταστάσεων και την ενεργειακή αναβάθμιση των παλαιοτέρων, εδραιώνοντας μια καινούργια εποχή στις ΕΕΔ.
Η υπάρχουσα τεχνογνωσία αξιοποιείται με σχετικά αργό ρυθμό στην ανακατασκευή των μονίμων υποδομών των ΕΕΔ. Γι' αυτό, η στρατιωτική υπηρεσία πρέπει να είναι έτοιμη για την υλοποίηση της «νέας εποχής» των Κτίριων Σχεδόν Μηδενικής Κατανάλωσης Ενέργειας (ΚΣΜΚΕ) ώστε να εναρμονιστεί και με την εθνική και κοινοτική νομοθεσία. Παράλληλα, πρέπει να υπάρχουν έτοιμα

[16] "Capability Packages".

[17] Στη χώρα μας, λειτουργεί το «Πράσινο Ταμείο» ως Νομικό Πρόσωπο Δημοσίου Δικαίου με σκοπό «*τη διαχειριστική, οικονομική, τεχνική και χρηματοπιστωτική υποστήριξη προγραμμάτων, μέτρων και ενεργειών που αποβλέπουν στην ανάδειξη και αποκατάσταση του περιβάλλοντος* (ΥΠΕΝ 2017).

χρηματοδοτικά «εργαλεία» που να λύνουν καινοτόμα, αποτελεσματικά και χωρίς γραφειοκρατία, τη χρηματοδότηση νέων στρατιωτικών εγκαταστάσεων στο πνεύμα των ΚΣΜΚΕ.
Η κατασκευή επιμέρους εγκαταστάσεων με βάση την ΕΝΑ και την ΕΞΕ θα προσδώσει αξιοπιστία και μεγάλη διάρκεια ζωής στις κατασκευές, καθώς και οικονομία στην υπηρεσία. Συγχρόνως θα είναι προς όφελος της υπηρεσίας, να συνεχιστεί και να ενταθεί ο μακρόπνοος σχεδιασμός των κτιρίων που κατασκευάζονται και αυτό δεν αφορά μόνο τον ωφέλιμο χρόνο ζωής του κτιρίου, αλλά και την αλλαγή χρήσης. Η συνθήκη αυτή είναι εύκολη να πραγματοποιηθεί με τήρηση απλών κανόνων δόμησης.
Τέλος, οι ΕΕΔ ως μέρος του ευρύτερου δημόσιου τομέα, πρέπει να αποτελέσουν εγχώριο πρότυπο και παράδειγμα καλής πρακτικής προκειμένου τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας να επεκταθούν και σε άλλες εγκαταστάσεις.

ACKNOWLEDGEMENT

Η παρούσα εργασία αποτελεί τμήμα πρωτότυπης έρευνας και μελέτης στα πλαίσια της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας του Ευριπίδη Χανιά με τίτλο «Αειφορικός Σχεδιασμός Βασικών Στρατιωτικών Εγκαταστάσεων» που εκπονήθηκε στη Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας και στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών «Περιβαλλοντικός Σχεδιασμός Πόλεων και Κτιρίων» του Ελληνικού Ανοικτού Πανεπιστημίου τον Σεπτέμβριο 2020, με επιβλέπουσα καθηγήτρια την Δρ. Αργυρώ Δημούδη, Καθηγήτρια στο Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος του Δημοκριτείου Πανεπιστημίου Θράκης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. **Βανσεχόνβεν, Κ.Λ.***Θεωρία του σχεδιασμού του χώρου: Διδακτικού εγχειριδίου.* Αθήνα : Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, 2004.
2. **Υπουργείο Εθνικής, Άμυνας.***Περιβαλλοντική πολιτική του ΥΠΕΘΑ.* Αθήνα : Περιβαλλοντική πολιτική του ΥΠΕΘΑ, 2014.
3. *Εισήγηση.* **Νικητάκος, Ν.** Αθήνα : Εθνικές Επάλξεις, 2008.
4. **Harmon, B. A. Goran, W. M. & Harmon R. S.** Military installations and cities in the twenty-first century: Towards sustainable military installations and adaptable cities. *NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security.* s.l. : Springer Science and Business Media, 2014.
5. **Department of, Defense (DoD).***Installation Master Planning, Unified Facilities.* ΗΠΑ : US DoD, 2005.
6. **Ενωση, Ευρωπαική.** Συνθήκη Λισαβώνας. *https://europa.eu/european-union/law/treaties_el.* [Ηλεκτρονικό] 2009. [Παραπομπή: 19 Μαρτιος 2021.]
7. **Energy-and-environment-WG.** energy-and-environment-programme. [Ηλεκτρονικό] European Defence Agency, 2020. [Παραπομπή: 20 Μάρτιος 2021.] https://eda.europa.eu/what-we-do/all-activities/activities-search/energy-and-environment-programme.
8. **Υπουργείο Εθνικής, Άμυνας.***Πράσινη Βίβλος.* Αθήνα : Υπουργείο Εθνικής Άμυνας, 2013.
9. **Μπάκας, Δ. Υποστράτηγος.***Γενικές Αρχές Πολεοδομικού Στρατοπέδου.* Βάρη Αττικής : Στρατιωτική Σχολή Ευελπίδων, 1997.
10. **Αραβαντινός, Α.***Πολεοδομικός Σχεδιασμός: Για μία Βιώσιμη Ανάπτυξη του.* Αθήνα : Συμμετρία, 1997.
11. **Αλεξανδρή, Ε.***Παρουσίαση στο μάθημα: «Το Ανθρωπογενές Περιβάλλον».* Αθήνα : Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, 2016.
12. **Τσίπηρας, Κ. & Θ.***Οικολογική Αρχιτεκτονική.* Αθήνα : Κέδρος, 2005.
13. **Τεχνικό Επιμελητήριο, Ελλάδας.***Βιοκλιματικός Σχεδιασμός Κτιρίων (Τεχνική οδηγία).* Αθήνα : Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, 2011.
14. **Γιαννάς, Σ.** Βιοκλιματικές Αρχές Πολεοδομικού Σχεδιασμού. [συγγρ. βιβλίου] Σ. et al. Αμβούργη. *Περιβαλλοντική Τεχνολογία.* Πάτρα : Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, 2001.
15. **Νόμος 3661/2008, ΦΕΚ 89/Α/19.05.2008.***Μέτρα για τη μείωση της ενεργειακής.* 2008.
16. **Δημούδη, Α. Βάβαλος, Π. Στάθης, Β. Θεοφύλακτος, Κ.***Μετατροπή του διατηρητέου κτιρίου που θα στεγάσει την πινακοθήκη «Κωνσταντίνος Ξενάκης» σε κτίριο σχεδόν μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης.* Σέρρες : Δήμος Σερραίων, 2018.
17. **Καλιαμπάκος, Δ. Μπενάρδος, Α.***Υπόγεια έργα (Σημειώσεις μαθήματος).* Αθήνα : Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, 2010.
18. **Στεργίοπουλος, Φ.** Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία. [συγγρ. βιβλίου] Δαμιανίδης et al. *Οδηγός Μελέτης και Υλοποίησης Φωτοβολταϊκών Έργων.* Θεσσαλονίκη : Εκδόσεις ΤΕΕ –Τμήμα Κεντρικής Μακεδονίας, 2011.
19. **Ανδρεαδάκη-Χρονάκη, Ε.** Η βιωσιμότητα του δομημένου χώρου. *Αρχιτέκτονες.* 2008, Ιούλιος - Αύγουστος.

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗ ΚΑΙ ΕΠΑΝΑΧΡΗΣΗ ΚΤΙΡΙΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΜΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ. Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΠΡΩΗΝ ΚΑΠΝΑΠΟΘΗΚΗΣ ΣΤΗ ΣΤΑΥΡΟΥΠΟΛΗ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

Βασιλική Αντωνίου[1]*, Ελένη Ανδρέου[2]*

[1]Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών MSc,
[2] Αρχιτέκτων Μηχανικός MSc, Διδάκτωρ ΑΠΘ, Σχολή Θετικών Επιστημών, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο
e-mail: antoniouvasiliki@gmail.com, eandreou3@gmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στη χώρα μας υπάρχει μεγάλος αριθμός ανενεργών βιομηχανικών κελυφών που εγκαταλείφθηκαν μετά την παύση της λειτουργίας τους. Με δεδομένη τη σημασία της διατήρησης της βιομηχανικής-πολιτιστικής κληρονομιάς και αναγνωρίζοντας το γεγονός ότι η επανάχρηση των εγκαταλελειμμένων κτιρίων συνάδει με τη λογική της αειφόρου ανάπτυξης, εξετάζονται οι εμπλεκόμενες δεσμεύσεις και τα μέσα εφαρμογής των αρχών του περιβαλλοντικού σχεδιασμού σε κτίρια της βιομηχανικής κληρονομιάς. Επίσης εξετάζονται οι διάφορες μέθοδοι εφαρμογής της επανάχρησης με βάση τον τρόπο προσέγγισής τους.

Κύριο αντικείμενο της εργασίας είναι η διερεύνηση επανάχρησης του εγκαταλελειμμένου «κόκκινου καπνομάγαζου» στην περιοχή της Σταυρούπολης Θεσσαλονίκης με σκοπό την επανένταξη του στον αστικό ιστό και τη διατήρηση του ιστορικού του χαρακτήρα αλλά και ο επανασχεδιασμός του με βάση τις αρχές του βιοκλιματικού σχεδιασμού. Πραγματοποιείται διερεύνηση και αξιολόγηση της ενεργειακής κατάστασης της υφιστάμενης πρώην καπναποθήκης με χρήση ειδικού υπολογιστικού προγράμματος. Πραγματοποιείται πρόταση επανάχρησης με πλήρη επανασχεδιασμό του κτιρίου για την ικανοποίηση της νέας χρήσης, ο οποίος περιλαμβάνει νέα λειτουργική διαρρύθμιση, λοιπές απαραίτητες επεμβάσεις στο κέλυφος, εφαρμογή μέτρων ενεργειακής αναβάθμισης, νέων μηχανολογικών συστημάτων καθώς και ενεργητικών ηλιακών συστημάτων. Η πρόταση επανάχρησης της καπναποθήκης και μετατροπής της σε σύγχρονο κτίριο γραφείων ακολουθεί τις αρχές του βιοκλιματικού σχεδιασμού, λαμβάνοντας υπόψη τις μορφολογικές ιδιαιτερότητες και τις δεσμεύσεις που προκύπτουν από την ιστορικότητα του κτιρίου. Επίσης, με χρήση του ειδικού υπολογιστικού εργαλείου εφαρμόζεται συγκεκριμένη μεθοδολογία για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της πρότασης σε σχέση με την ενεργειακή απόδοση, την εξοικονόμηση ενέργειας, τις εκπομπές CO_2 και τις συνθήκες φυσικού φωτισμού και θερμικής άνεσης στο εσωτερικό του κτιρίου.

Λέξεις Κλειδιά: *Βιοκλιματικός Σχεδιασμός, Ενεργειακή αναβάθμιση, Επανάχρηση, Καπναποθήκη, Βιομηχανική Κληρονομιά*

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η βιομηχανική κληρονομιά, ως κομμάτι της πολιτιστικής κληρονομιάς, έχει ιστορική αξία καθώς αποτελεί τεκμήριο των δραστηριοτήτων που έπαιξαν σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη της ιστορίας του κόσμου, έχει κοινωνική αξία καθώς καθόρισε την καθημερινή ζωή των ανθρώπων, έχει τεχνολογική αξία λόγω της εξέλιξης των μηχανών, έχει αισθητική αξία καθώς καθόρισε ένα κομμάτι της αρχιτεκτονικής και τέλος έχει ιδιαίτερη αξία η διατήρηση διαδικασιών και τεχνολογιών που έχουν

αρχίσει να εκλείπουν [1]. Η βιομηχανική κληρονομιά αυτή, περιλαμβάνει τόσο τα κτίρια που στεγάζουν τις βιομηχανικές δραστηριότητες, τις τεχνολογίες και τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για τις δραστηριότητες αυτές όσο και τις πόλεις και τα τοπία που διαμορφώθηκαν από την ύπαρξη των κτιρίων αυτών [2].

Η πόλη της Θεσσαλονίκης λόγω του μεγάλου λιμανιού και της εγγύτητας της με τις περιοχές καλλιέργειας του καπνού έπαιξε μεγάλο ρόλο στην εξάπλωση των καπνοβιομηχανιών και αυτός είναι ο λόγος που το εμπόριο του καπνού καθόρισε την βιομηχανική ανάπτυξη της πόλης [3]. Στις περιόδους άνθισης της καπνοβιομηχανίας ανεγέρθηκαν πολλά βιομηχανικά κτίρια αλλά κυρίως καπναποθήκες οι οποίες λειτουργούσαν μέσα στον αστικό ιστό της πόλης και καθόριζαν τον χαρακτήρα των περιοχών της. Αρκετά από αυτά τα κτίρια των καπναποθηκών έχουν διατηρηθεί μέχρι και σήμερα και έχουν σημαντική ιστορική αξία για την πόλη.

Η πρακτική της αξιοποίησης των ανενεργών βιομηχανικών κελυφών συμβάλλει αφενός στη διατήρηση της ιστορικής μνήμης που φέρουν και αφετέρου στην αναβάθμιση του αστικού περιβάλλοντος των περιοχών που εντοπίζονται. Είναι αυτονόητη η σημασία της διατήρησης της εμπεριεχόμενης ενέργειας των υλικών των υφιστάμενων κτιρίων. Παράλληλα, καθώς τα υφιστάμενα κτίρια λόγω παλαιότητας είναι συνήθως αρκετά ενεργοβόρα, κρίνεται εξαιρετικά σημαντική η ενεργειακή αναβάθμιση στο πλαίσιο της επανάχρησης, με κατάλληλες παρεμβάσεις, καθώς μπορεί να συμβάλλει καθοριστικά στην εξοικονόμηση ενέργειας, στον περιορισμό του λειτουργικού κόστους, στην επίτευξη συνθηκών θερμικής και περιβαλλοντικής άνεσης στο εσωτερικό τους και ασφαλώς σε σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη. Όπως έχει αναφερθεί [4] ένα από τα χαρακτηριστικά της αειφόρου πόλης είναι η διαχείριση των υφιστάμενων οικοδομικών κελυφών, τα οποία θεωρούνται πολύτιμος πόρος, με γνώμονα τη συνειδητή και ακριβή επιχείρηση συντήρησης, εκσυγχρονισμού και επανάχρησής τους αφενός και την αντιμετώπισή τους ως πολιτισμικού αγαθού και στοιχείου ιστορικής μνήμης του αστικού ιστού αφετέρου.

Ως ΄΄προσαρμοσμένη επανάχρηση΄΄ ορίζεται ‘κάθε παρέμβαση σε κτίριο με σκοπό να αλλάξει η ικανότητα, η λειτουργία και η απόδοση του ώστε να προσαρμοστεί και να αναβαθμιστεί και να ανταποκρίνεται στις νέες συνθήκες.’ [5] Η προσαρμοσμένη επανάχρηση των κτιρίων είναι μια μορφή βιώσιμης αστικής αναγέννησης, καθώς με αυτόν τον τρόπο επεκτείνεται η ζωή του κτιρίου και αποφεύγονται τα απόβλητα που θα προέκυπταν από την κατεδάφισή του, ενθαρρύνεται η επανάχρηση της ενσωματωμένης ενέργειας και παρέχονται επίσης σημαντικά κοινωνικά και οικονομικά οφέλη στην κοινωνία [6]. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την προσαρμοσμένη επανάχρηση έχουν εξεταστεί από μελετητές [7]) και έχει υποστηριχθεί η περιβαλλοντική σημασία της επανάχρησης [8]. Η έννοια της «πράσινης» επανάχρησης των κτιρίων πολιτιστικής κληρονομιάς είναι μια αποτελεσματική στρατηγική, που όχι μόνο επεκτείνει τον κύκλο ζωής των κτιρίων αυτών αλλά καταφέρνει να μειώσει τις εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα και να βελτιώσει την οικονομική αποδοτικότητα [9].

Οι δυνατότητες επεμβάσεων σε υφιστάμενα κτίρια συνοψίζονται σε επεμβάσεις στο κέλυφος του κτιρίου, επιλογή βέλτιστου συστήματος θέρμανσης και ψύξης, αερισμού και φωτισμού, εγκατάσταση αυτοματισμών για την σωστή χρήση των εγκατεστημένων συστημάτων και τέλος χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Στην περίπτωση κτιρίων ιδιαίτερης ιστορικής σημασίας υπάρχουν πρόσθετες παράμετροι που προκύπτουν από δομοστατικές και μορφολογικές ιδιαιτερότητες, καθώς και ενδεχόμενες δεσμεύσεις που προέρχονται από το θεσμικό πλαίσιο προστασίας τους.

Στη μεθοδολογία αποκατάστασης και επανάχρησης που προτείνει ο Νομικός [10] δίνεται σημασία στη διερεύνηση της σχέσης του κτιρίου με τη ευρύτερη περιοχή, στη διεξαγωγή ιστορικής, αρχιτεκτονικής και δομοστατικής ανάλυσης πριν από τη σύνταξη πρότασης επανάχρησης. Σύμφωνα με τους Klopotowski και Zagroba [11] βάσει ανάλυσης υλοποιημένων παραδειγμάτων, μπορούν να διακριθούν πέντε διαφορετικοί τρόποι επανάχρησης βιομηχανικών κτιρίων:

1. Προσαρμογή των υπαρχόντων βιομηχανικών κτιρίων στις ανάγκες των νέων λειτουργιών, ανακατασκευάζοντας το εσωτερικό των εγκαταστάσεων και αναπτύσσοντας τον περιβάλλοντα χώρο.

2. Προσαρμογή της μετά-βιομηχανικής γης στις ανάγκες των νέων λειτουργιών, κατεδαφίζοντας τις κατασκευές που δεν χρησιμεύουν και στην ανακατασκευή των κατασκευών που θα χρησιμοποιηθούν στην νέα χρήση αλλά και στην προσθήκη νέων κατασκευών.

3. Προσαρμογή των απομειναριών των κτιρίων και ανακατασκευή τους με στόχο τη διατήρηση της ταυτότητας της περιοχής.

4. Προσαρμογή της μετά-βιομηχανικής γης στις ανάγκες των νέων λειτουργιών, κατασκευάζοντας ένα νέο κτίριο με σεβασμό στην βιομηχανική αρχιτεκτονική της συγκεκριμένης χρονικής περιόδου.

5. Ανακατασκευή ενός μοντέρνου κτιρίου και μακριά από το αρχική βιομηχανική αρχιτεκτονική του αρχικού κτιρίου.

Η επιλογή του τρόπου προσέγγισης σε ένα υφιστάμενο κέλυφος είναι μια πολύπλοκη διαδικασία καθώς οι συνθήκες κάθε φορά είναι διαφορετικές. Στις συνηθέστερες προσεγγίσεις μπορούν να συμπεριληφθούν: η ολοκληρωτική διατήρηση του σκελετού και του κελύφους, και η εφαρμογή ήπιων επεμβάσεων, η διατήρηση του κελύφους με υλοποίηση προσθηκών και παρεμβάσεων για την εξυπηρέτηση των νέων αναγκών, η διατήρηση μόνο του σκελετού του κτιρίου με αναδιαμόρφωση τόσο του εσωτερικού όσο και των όψεων, όπως επίσης και η εγκατάσταση προσθηκών και επεκτάσεων, όπου το νέο συνυπάρχει με το παλιό. Σύμφωνα με τον Rojic [12], οι προσεγγίσεις μπορούν να συνοψιστούν σε τρεις βασικές κατηγορίες: την επιβολή, την συνύπαρξη και την συγχώνευση. Η τελική επιλογή του τρόπου προσέγγισης εξαρτάται από τις αξίες του βιομηχανικού μνημείου, από την κατάσταση του λόγω της εγκατάλειψης του, από την νέα χρήση που θα επιλεγεί και από τις επεμβάσεις που αυτή απαιτεί. Οι κατηγορίες επανάχρησης βασίζονται στις χρήσεις και στη συμβατότητά τους με συγκεκριμένους τύπους και ποιότητες του κτιρίου. Οι νέες χρήσεις που έχουν εφαρμοστεί στην επανάχρηση βιομηχανικών κτιρίων είναι η βιομηχανική, η μουσειακή, η πολιτιστική, η οικιστική, η επαγγελματική καθώς και η συνύπαρξη πολλών χρήσεων [13]. Αποτελεί κομβικό σημείο ο προσδιορισμός της καταλληλότερης χρήσης για το προς επανάχρηση βιομηχανικό κτίριο Είναι πολύ σημαντικό για την επανάχρηση των βιομηχανικών κτιρίων να διερευνηθεί ποια είναι η χρήση που θα αναδείξει και θα προβάλλει τα στοιχεία εκείνα τα οποία το κάνουν να αποτελεί στοιχείο της πολιτιστικής μας κληρονομιάς. Τα κτίρια γραφείων αποτελούν μια κατηγορία επανάχρησης βιομηχανικών κτιρίων που εφαρμόζεται τα τελευταία χρόνια, καθώς οι μεγάλοι ενιαίοι χώροι είναι ιδανικοί για εργασιακούς χώρους ανοιχτής κάτοψης και επιτρέπουν τη λειτουργική διαμόρφωση σύμφωνα με τις εκάστοτε ανάγκες.

Είναι έντονο το ενδιαφέρον των μελετητών σχετικά με τη συσχέτιση των αρχών περιβαλλοντικού σχεδιασμού με την επανάχρηση κτιρίων πολιτιστικής κληρονομιάς μέσω συστηματικής μελέτης [14], [15]. Σύμφωνα με την μελέτη των Şahin et al. [16] υλοποιήθηκαν προσομοιώσεις της ενεργειακής απόδοσης ενός ιστορικού κτιρίου στην περιοχή της Σμύρνης για την εκτίμηση των επιπτώσεων της εισαγωγής μόνωσης και της αλλαγής των κουφωμάτων του κτιρίου με στόχο να επιτευχθεί εξοικονόμηση ενέργειας 20-40%. Υποστηρίζεται ότι θα μπορούσε να επιτευχθεί εξοικονόμηση 20% χωρίς να διαταραχθεί η αξία κληρονομιάς του κτιρίου, ενώ η εξοικονόμηση 40% μπορεί να επιτευχθεί επεμβαίνοντας στο εξωτερικό κέλυφος και την πρόσοψη του κτιρίου. Στην μελέτη των Rasmussen et al. [17] χρησιμοποιήθηκε μια παρόμοια προσέγγιση για την πρόβλεψη των επιπτώσεων ενός ευρέος φάσματος μέτρων για την αναβάθμιση της ενέργειας συμπλέγματος κτιρίων του 17ου και του 18ου αιώνα στην Κοπεγχάγη. Το ποσοστό της μείωσης των εκπομπών CO2 μειώθηκε σε ποσοστό 20%. Στην μελέτη των Galatioto et al [18] υλοποιήθηκαν προσομοιώσεις της ενεργειακής απόδοσης ενός κτιρίου γραφείων στην Carbonia της Σαρδηνίας. Εκτίμησαν ξεχωριστά κάθε προτεινόμενο μέτρο βελτίωσης, αλλά και συγκεντρωτικά επιτρέποντας τη σύγκριση με την αντίστοιχη μεταβολή της υπολογισμένης χρήσης ενέργειας και των εκπομπών CO2 για θέρμανση και ψύξη. Εκτιμήθηκαν επίσης και οι αλλαγές που αποφέρει στην ενεργειακή κατανάλωση η κλιματική ζώνη στην οποία είναι εγκατεστημένο το κτίριο συμπεραίνοντας ότι ο συνδυασμός των επεμβάσεων -θερμομόνωση, μόνωση οροφής, αντικατάσταση κουφωμάτων και σκίαστρα- επιτυγχάνει μείωση του συνολικού ενεργειακού φορτίου από 43% έως 56% σε όλες τις κλιματικές ζώνες.

2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ

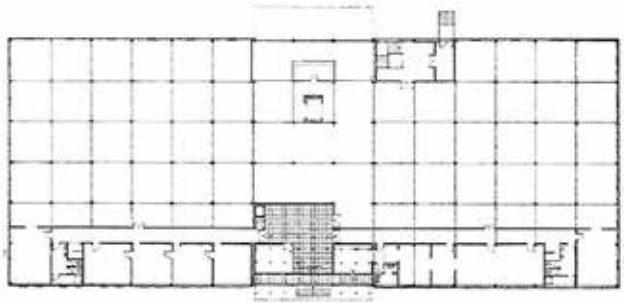
Η παρούσα εργασία εξειδικεύει την μελέτη της στο υφιστάμενο βιομηχανικό κέλυφος του εγκαταλελειμμένου «κόκκινου καπνομάγαζου» που ανεγέρθηκε το 1963 στην περιοχή της Σταυρούπολης του Δήμου Παύλου Μελά για να στεγάσει καπνεμπορική δραστηριότητα και πλέον έχει καθιερωθεί με αυτή την ονομασία λόγω του τούβλινου κελύφους του. Η περιοχή της Σταυρούπολης λόγω της θέσης της στην δυτική είσοδο της πόλης και λόγω του μεγάλου αδόμητου χώρου προσέλκυσε στο παρελθόν την ίδρυση βιομηχανικών εγκαταστάσεων και ιδιαίτερα καπναποθηκών.

Το κτίριο είναι μια από τις καπναποθήκες της περιοχής η οποία έχει διατηρηθεί στην πάροδο του χρόνου. Μετά την παύση της λειτουργίας του κτιρίου ως καπναποθήκη, στο ισόγειο του κτιρίου στεγάστηκαν για κάποια χρόνια υπηρεσίες του δημοσίου, ενώ σήμερα χρησιμοποιείται μόνο ως αποθηκευτικός χώρος. Είναι ιδιαίτερα θετικό το γεγονός ότι το κτίριο διατηρεί την αρχική του μορφή και αισθητική. Το κτίριο ξεχωρίζει ανάμεσα στα γειτονικά κτίρια λόγω του μεγάλου όγκου του αλλά και λόγω της αισθητικής που το χαρακτηρίζει, που απορρέει από τη χρήση των οπτόπλινθων ως δομικό

υλικό πλήρωσης των εξωτερικών της τοιχοποιιών. Σημαντικό στοιχείο του κελύφους είναι και το εμφανές περιμετρικό σενάζ της τοιχοποιίας του, το οποίο εκφράζει με πρόσθετο τρόπο την ειλικρίνεια στη χρήση των υλικών. (Γκουβούση, Ταβλίκος 2018). Το κτίριο δεν έχει χαρακτηρισθεί ως διατηρητέο.

Εικόνα 1: Η θέση του κτιρίου *Εικόνα 2:Το 'κόκκινο καπνομάγαζο'. Πηγή:Γκουβούση,Ταβλίκος,2018*

Το κτίριο είναι πανταχόθεν ελεύθερο με ορθογώνια κάτοψη. Η επιφάνεια του τυπικού ορόφου είναι 2.828τ.μ.και οι μεγάλες πλευρές του κτιρίου έχουν ΒΑ και ΝΔ προσανατολισμό. Η ΒΔ, η ΝΔ και η ΝΑ πλευρά του κτιρίου απέχουν κατά περίπου 20 μέτρα από παρακείμενα κτίρια, ενώ στα ΒΔ το κτίριο συνορεύει με ανοιχτό χώρο πρασίνου. Τα παρακείμενα κτίρια είναι σχετικά χαμηλού ύψους (2-3 ορόφων) με εξαίρεση τις πολυκατοικίες στα νότια του κτιρίου που έχουν ύψος 5-6 ορόφων.



Εικόνα 3: Κάτοψη ισογείου του υφιστάμενου κτιρίου. Πηγή: Γκουβούση,Ταβλίκος, 2018

Το κτίριο, με φέροντα οργανισμό από σκυρόδεμα, περιλαμβάνει υπόγειο, ισόγειο και τέσσερις ορόφους. Οι εσωτερικοί χώροι του κτιρίου οργανώνονται βάσει τετραγωνικού καννάβου που δημιουργείται από τα υποστυλώματα του φέροντα οργανισμού. Ο πρώτος, ο δεύτερος και ο τρίτος όροφος λειτουργούσαν ως αποθηκευτικοί χώροι, ενώ στον τέταρτο όροφο ήταν εγκατεστημένος ο απαραίτητος μηχανολογικός εξοπλισμός για επεξεργασία του καπνού. Οι χώροι διοίκησης με τα γραφεία αναπτυσσόταν εκατέρωθεν της κεντρικής εισόδου στο ισόγειο του κτιρίου.

Στην υφιστάμενη κατάσταση του κτιρίου, στο ισόγειο είναι εγκατεστημένοι γραφειακοί χώροι (εικ. 3), οι υπόλοιποι όροφοι είναι ενιαίοι αποθηκευτικοί χώροι ενώ στον τελευταίο όροφο είναι εγκατεστημένος μηχανολογικός εξοπλισμός. Ο εξωτερικοί τοίχοι του κτιρίου, είναι κατασκευασμένοι από τούβλα. Στο κτίριο λειτουργεί σύστημα με κλιματιστικά για τη θέρμανση και την ψύξη των χώρων γραφείων στο ισόγειο. Λόγω της αρχικής χρήσης του κτιρίου, σε όλους τους υπόλοιπους ορόφους οι οποίοι χρησιμοποιούνταν για την αποθήκευση δεμάτων καπνού, δεν υπάρχει σύστημα θέρμανσης και ψύξης. Ο αερισμός στο κτίριο πραγματοποιείται μέσω φυσικού και αθέμιτου αερισμού. Επίσης, λόγω της λειτουργίας του κτιρίου, οι απαιτήσεις σε φυσικό φωτισμό ήταν μικρές. Τα ανοίγματα του κτιρίου, τα οποία είναι μικρού ύψους, διατρέχουν περιμετρικά τα μήκη των πλευρών σαν οριζόντιες ταινίες, ενώ

κάτω από αυτά υπάρχουν σημειακά οπές με μεταλλικές περσίδες, οι οποίες εξυπηρετούσαν στη ρύθμιση του απαραίτητου φυσικού αερισμού. Διαφορετικού τύπου και μεγαλύτερα ανοίγματα υπάρχουν στους χώρους γραφείων, στο ισόγειο του κτιρίου και στο κλιμακοστάσιο. Στο κτίριο υπάρχει σε κεντρικό σημείο ο ανελκυστήρας μεταφοράς φορτίων.

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Για τη μελέτη του κτιρίου, πραγματοποιήθηκε συλλογή στοιχείων και διερεύνηση της σχέσης του κτιρίου με τη ευρύτερη περιοχή, διερεύνηση του ιστορικού υποβάθρου, της εξέλιξης του κτιρίου στο χρόνο και μελέτη των αρχιτεκτονικών στοιχείων του. Εκτιμήθηκε στον βαθμό που ήταν εφικτό, η συνολική κατάσταση του κτιρίου και των εγκαταστάσεών του.

Με την βοήθεια του προγράμματος Design Builder Version 6.1.0.006, δημιουργήθηκε το μοντέλο του κτιρίου. Μελετήθηκαν τα διαγράμματα ηλιασμού στις 21 Δεκεμβρίου και στις 21 Ιουνίου για τις ώρες 10.00π.μ και 15.00μ.μ. Για τους ίδιους μήνες μελετήθηκαν και τα διαγράμματα αερισμού και ο τρόπος κίνησης του αέρα γύρω από το κτίριο υπό μελέτη.

Πραγματοποιήθηκε παραμετρική ανάλυση της ενεργειακής συμπεριφοράς της υφιστάμενης κατάστασης του κτιρίου, χωρίς καμία παρέμβαση στο κέλυφός του. Διερευνάται η υποθετική περίπτωση της λειτουργίας του κτιρίου ως κτίριο γραφείων με την παραδοχή ότι υπάρχει εγκατεστημένο σύστημα ψύξης και θέρμανσης (HVAC) με fan coils σε όλους τους ορόφους και με εφαρμογή τεχνητού φωτισμού με λάμπες φθορισμού. Επιπλέον διερευνήθηκε η περίπτωση της υφιστάμενης κατάστασης με μοναδική παρέμβαση την εφαρμογή τεχνητού φωτισμού χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης τεχνολογίας led. Ως προς το ωράριο λειτουργίας, οι υπολογισμοί έγιναν για λειτουργία του κτιρίου τις καθημερινές και ώρες 08.00-19.00, με τον μέγιστο πληθυσμό μεταξύ 9.00-18.00. Η πυκνότητα κατοίκησης ορίστηκε στην τιμή 0,11/μ2.

Εξάχθηκαν αποτελέσματα σχετικά με την ενεργειακή κατανάλωση για ψύξη, θέρμανση και φωτισμό, τις εκπομπές CO2 και τις συνθήκες θερμικής άνεσης. Με το ειδικό εργαλείο Design Builder πραγματοποιήθηκε μελέτη φυσικού φωτισμού, υπό συνθήκες νεφοσκεπούς ουρανού για την υφιστάμενη κατάσταση και υπολογίστηκε ο παράγοντας φυσικού φωτισμού (DF), τα επίπεδα φυσικού φωτισμού (lux) και η κατανομή τους στον χώρο.

Καθορίστηκαν οι βασικοί στόχοι της πρότασης επανάχρησης οι οποίοι είναι: η επανένταξη του κτιρίου στη ζωή της πόλης, η σύνδεση της σύγχρονης εποχής και της πόλης με το βιομηχανικό παρελθόν της, ο εκσυγχρονισμός του κτιρίου με σεβασμό στα αρχιτεκτονικά, ιστορικά και μορφολογικά του χαρακτηριστικά, η διατήρηση των βασικών μορφολογικών χαρακτηριστικών, η πλήρης ικανοποίηση των νέων λειτουργικών αναγκών, η ενεργειακή αναβάθμιση η οποία θα εξασφαλίζει σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας και χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και η εξασφάλιση εσωτερικών συνθηκών περιβαλλοντικής άνεσης για τους χρήστες του κτιρίου.

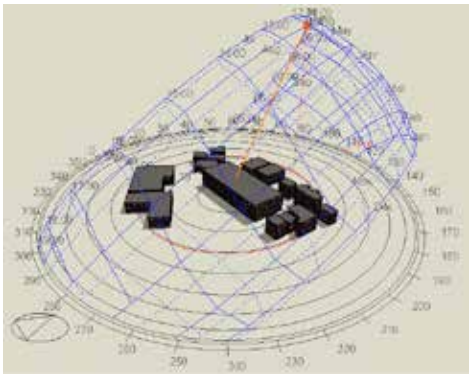
Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε πρόταση επανάχρησης του κτιρίου με σκοπό αυτό να παραλάβει τη χρήση του κτιρίου γραφείων. Ο επανασχεδιασμός του κτιρίου περιλαμβάνει νέα λειτουργική διαρρύθμιση, απαραίτητες επεμβάσεις στο κέλυφος και εφαρμογή μέτρων ενεργειακής αναβάθμισης, καθώς και ενεργητικών ηλιακών συστημάτων. Πραγματοποιήθηκε παραμετρική ανάλυση της ενεργειακής συμπεριφοράς της πρότασης λαμβάνοντας υπόψη όλες τις επεμβάσεις στο κέλυφος και στις μηχανολογικές εγκαταστάσεις. Εξετάστηκαν διαφορετικοί συνδυασμοί υλικών και πάχους θερμομόνωσης, καθώς και διαφορετικά είδη υαλοπινάκων Ως σύστημα θέρμανσης και ψύξης επιλέγεται η αντλία θερμότητας με ανάκτηση θερμότητας, εφαρμόζεται σύστημα μηχανικού αερισμού με ανάκτηση θερμότητας, τεχνητός φωτισμός τεχνολογίας led και αυτοματισμοί στη χρήση του τεχνητού φωτισμού. Εξάχθηκαν αποτελέσματα σχετικά με την ενεργειακή κατανάλωση για ψύξη, θέρμανση και φωτισμό, τις εκπομπές CO2 και τις συνθήκες θερμικής άνεσης. Πραγματοποιήθηκε μελέτη φυσικού φωτισμού για την πρόταση και υπολογίστηκε ο παράγοντας φυσικού φωτισμού (DF), τα επίπεδα φυσικού φωτισμού (lux) και η κατανομή τους στον χώρο.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

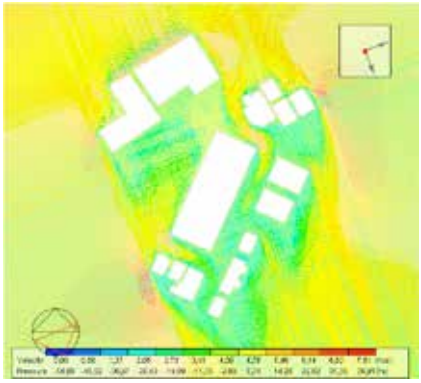
4.1. Αποτίμηση της ενεργειακής συμπεριφοράς του υφιστάμενου κτιρίου.

Σύμφωνα με τη μελέτη σκιασμού, η ΒΔ όψη του κτιρίου είναι πλήρως εκτεθειμένη στην ηλιακή ακτινοβολία, λόγω του παρακείμενου ανοιχτού χώρου. Η ΒΑ και τμήμα της ΝΑ όψης είναι αρκετά

εκτεθειμένες, καθώς τα παρακείμενα κτίρια έχουν χαμηλό ύψος. Η ΝΔ όψη σκιάζεται σε σημαντικό βαθμό από τα παρακείμενα κτίρια, αλλά κατά τη θερινή περίοδο τμήμα της δέχεται ηλιακή ακτινοβολία καθιστώντας απαραίτητη την εφαρμογή συστημάτων σκιασμού (εικ. 4).



Εικόνα 4: Σκιασμός στις 21 Ιουνίου, 10.00π.μ



Εικόνα 5: Μελέτη αερισμού μήνα Δεκεμβρίου

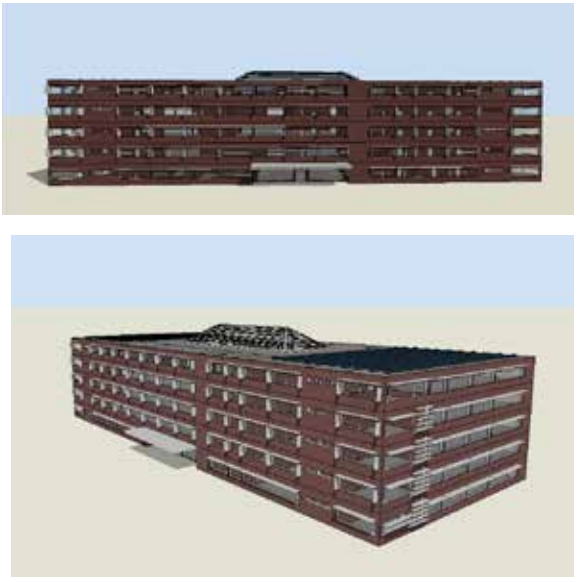
Η κίνηση του αέρα είναι σχετικά ελεύθερη στην περιοχή μπροστά από την είσοδο του κτιρίου λόγω του πάρκου, με ταχύτητες ανέμου να κυμαίνονται μεταξύ 2 και 5m/sec. Γενικότερα, υψηλότερες ταχύτητες καταγράφονται κατά τη θερινή περίοδο, ιδιαίτερα στους άξονες των δρόμων στις στενές πλευρές του κτιρίου, καθώς η διεύθυνση των ανέμων είναι παράλληλη με αυτούς (εικ. 5). Η ύπαρξη του πάρκου έμπροσθεν του κτιρίου και των φυτεύσεων συμβάλλουν θετικά στις τοπικές μικροκλιματικές συνθήκες.

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την ανέγερση της καπναποθήκης είναι μεγάλης θερμοχωρητικότητας γεγονός που λειτουργεί θετικά. Η απουσία θερμομόνωσης όμως, καθώς και τα παλαιού τύπου κουφώματα αυξάνουν σημαντικά τις θερμικές απώλειες. Υπολογίστηκε ότι ο συντελεστής θερμοπερατότητας των εξωτερικών τοιχοποιιών είναι της τάξης του 1,80W/m2K και της οροφής 2,60 W/m2K. Όπως προκύπτει από τη μελέτη φυσικού φωτισμού (εικ.12), οι συνθήκες φυσικού φωτισμού στον τυπικό όροφο του υφιστάμενου κτιρίου είναι εξαιρετικά ανεπαρκείς για τη νέα λειτουργία του, ως χώρος γραφείων. Το βάθος της περιμετρικής ζώνης στην οποία υπάρχει έστω και ανεπαρκής φυσικός φωτισμός είναι πολύ μικρό, με την μέγιστη τιμή να είναι της τάξης των 300lux, πολύ κοντά στα παράθυρα.

4.2. Περιγραφή της πρότασης επανάχρησης

Η επιλογή της νέας χρήσης του κτιρίου ως κτίριο γραφείων, η οποία αποτελεί καθοριστική απόφαση στη διαδικασία επανάχρησης, έχει ως αφετηρία την έλλειψη ενός μεγάλου χώρου γραφείων στην περιοχή. Επιπλέον, το γεγονός της προϋπάρχουσας λειτουργίας γραφειακών χώρων στο ισόγειο, οδηγεί στη διερεύνηση επέκτασης της λειτουργίας αυτής στο σύνολο του κτιρίου. Ακόμα, κρίνεται ότι η νέα αυτή λειτουργία θα λειτουργήσει ως έναυσμα για ανάπτυξη παρόμοιων δραστηριοτήτων στην ευρύτερη περιοχή και θα συμβάλλει στη συνολική αναβάθμισή της, με τρόπο παρόμοιο με αυτόν που έχει διαπιστωθεί ότι έχει συμβεί σε άλλα παραδείγματα επανάχρησης αδρανών κτιρίων σε υποβαθμισμένες περιοχές.

Ο νέος αρχιτεκτονικός και λειτουργικός σχεδιασμός των χώρων έλαβε υπόψη τις υφιστάμενες υποδομές και τα δίκτυα, όπως τη θέση του κλιμακοστασίου και του κεντρικού ανελκυστήρα, τη θέση των χώρων υγιεινής κλπ, τα οποία σε σημαντικό βαθμό διατηρήθηκαν ή καθόρισαν τη θέση των νέων αντίστοιχων υποδομών. Βασική πρόθεση ήταν η διατήρηση της χαρακτηριστικών όψεων με τους εμφανείς οπτόπλινθους, όπως και η διατήρηση των περιμετρικών σενάζ. Η λειτουργική διαρρύθμιση καθορίστηκε ασφαλώς από τον αυστηρό τετραγωνικό κάνναβο των υποστυλωμάτων. Το μεγάλο μέγεθος του κτιρίου, το μεγάλο βάθος κάτοψης και το μικρό μέγεθος ανοιγμάτων που συνεπάγεται περιορισμένο φυσικό φωτισμό κα αερισμό αποτέλεσαν σοβαρές προκλήσεις.



Εικόνα 6: Απόψεις της πρότασης επανάχρησης

Βασικές επεμβάσεις στο κέλυφος αποτέλεσαν η διάνοιξη μεγαλύτερων ανοιγμάτων καθ ύψος, ώστε να ενισχυθεί ο φυσικός φωτισμός, η οπτική επαφή με το περιβάλλον αλλά και οι ηλιακές πρόσοδοι κατά τη χειμερινή περίοδο. Εφαρμόζονται νέα κουφώματα αλουμινίου με τριπλούς υαλοπίνακες με επίστρωση χαμηλής θερμικής εκπομπής. Στην οροφή του κτιρίου δημιουργείται οπή η οποία στεγάζεται με γυάλινη οροφή με ανοιγόμενα τμήματα, ώστε να αξιοποιηθούν οι ηλιακές πρόσοδοι και να ενισχυθεί ο φυσικός φωτισμός και ο κατακόρυφος φυσικός αερισμός στο σύνολο του κτιρίου μέσω του αιθρίου που δημιουργείται. Εφαρμόζεται θερμομόνωση εσωτερικά των περιμετρικών τοίχων του κελύφους, γεγονός που απορρέει από την πρόθεση να διατηρηθεί η εξωτερική μορφολογία των όψεων. Θερμομόνωση εφαρμόζεται και στην οροφή του κτιρίου. Για τον περιορισμό των ψυκτικών φορτίων κατά τη θερινή περίοδο, εφαρμόζεται κατάλληλη εξωτερική σκίαση σε όλα τα ανοίγματα του κτιρίου, με οριζόντια μεταλλικά εξωτερικά σκίαστρα στη ΝΔ πλευρά και συνδυασμό οριζόντιων και κατακόρυφων σκιάστρων στις τρεις άλλες όψεις. Για τη διαρρύθμιση των χώρων επιλέχθηκε η διάταξη ανοιχτής κάτοψης, η οποία αποδίδει ευελιξία και ευνοεί την εκμετάλλευση του διαθέσιμου φυσικού φωτισμού και αερισμού (εικ. 7,8). Αποτέλεσε βασική πρόθεση η δημιουργία χώρων γραφείου οι οποίοι διέπονται από σύγχρονες αντιλήψεις για τη δημιουργία εργασιακού χώρου, με βασικές αρχές την ενίσχυση της συνεργασίας και επικοινωνίας μεταξύ των εργαζομένων, την ενοποίηση του χώρου και τη δημιουργία ευχάριστου χώρου εργασίας που προάγει τις δεξιότητες και τη δημιουργικότητα των εργαζομένων. Βασικά εργαλεία για την επίτευξη των παραπάνω ήταν η οργάνωση με τη δομή της ανοιχτής κάτοψης, και η εφαρμογή ελαφρών και χαμηλών διαχωριστικών που επιτρέπουν την οπτική επαφή και την αντιληπτική ενοποίηση του χώρου. Επιπλέον η πρόβλεψη πολλών χώρων συνεργασίας διαφορετικών τύπων και μεγεθών, χώρων χαλάρωσης και χώρων χωρίς σαφή λειτουργικό προσδιορισμό, που μπορούν να προσλάβουν εναλλακτικές χρήσεις. Στο κέντρο της κάτοψης χωροθετούνται οι νέοι ανελκυστήρες στη θέση του παλιού, ένα νέο κεντρικό κλιμακοστάσιο καθώς και μία οπή- αίθριο, η οποία διατρέχει το κτίριο παρέχοντας φυσικό φωτισμό και ενισχύοντας τον κατακόρυφο φυσικό αερισμό. Τα γραφεία χωροθετούνται κοντά στους εξωτερικούς τοίχους, κατά τρόπο ώστε να αξιοποιείται ο φυσικός φωτισμός.

Στις περιοχές που απομακρύνονται από την περιμετρική ζώνη χωροθετούνται χώροι συνεργασίας, ανοιχτοί ή με ελαφρά διαχωριστικά, όπως και χώροι καθιστικών ή χώροι που μπορούν να προσλάβουν πολλαπλές λειτουργίες. Στο κέντρο της κάτοψης χωροθετούνται χώροι συνεργασίας και συνεδριάσεων οι οποίοι παρέχουν ηχητική απομόνωση με γυάλινα διαχωριστικά και κάποιοι βοηθητικοί χώροι.

Εικόνα 7: Η πρόταση λειτουργικής διαρρύθμισης για τον τυπικό όροφο

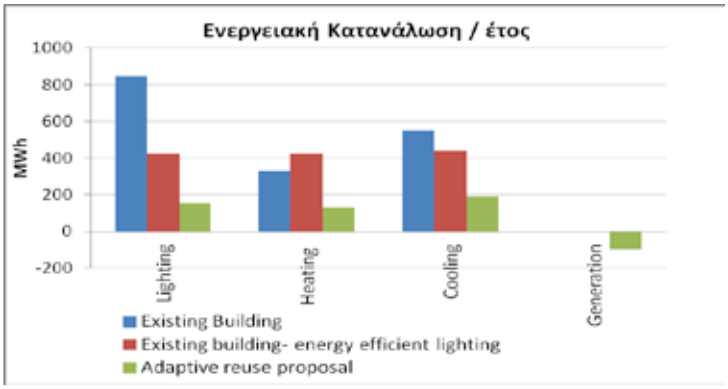
Εικόνα 8: Η πρόταση λειτουργικής διαρρύθμισης για τον 4ο όροφο

Κάποιοι κλειστοί χώροι γραφείων έχουν προβλεφθεί στην περίμετρο, ενώ η συνολική διαρρύθμιση χαρακτηρίζεται από ευελιξία ώστε να προσαρμόζεται στις εκάστοτε ανάγκες δημιουργίας ανοιχτών και κλειστών χώρων εργασίας. Οι χώροι υγιεινής χωροθετούνται σε θέσεις που υπάρχουν υφιστάμενες υποδομές. Στον τελευταίο (4^{ο}) όροφο, κεντρικά κάτω από τη γυάλινη οροφή χωροθετείται χώρος εστιατορίου. Τέλος, στην οροφή του κτιρίου, εγκαθίστανται είκοσι σειρές φωτοβολταϊκών πανέλων ώστε να αξιοποιηθεί η ηλιακή ενέργεια. Τα φωτοβολταϊκά πανέλα, συμβάλλουν επιπλέον στην θερμική προστασία, μόνωση και σκιασμό της οροφής του κτιρίου.

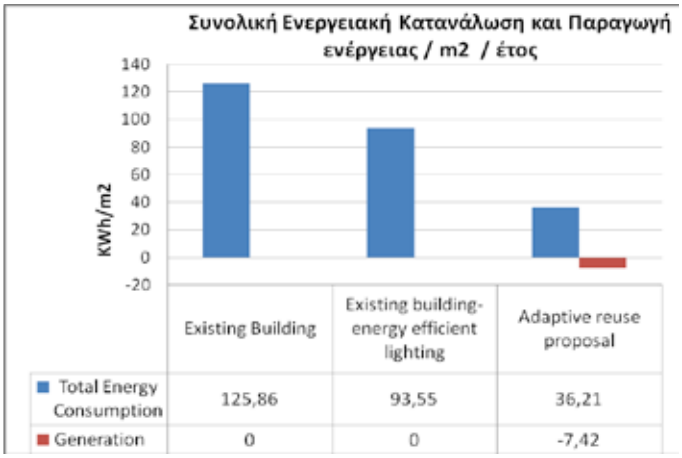
4.3. Ενεργειακή συμπεριφορά της πρότασης επανάχρησης

Για την προσομοίωση της πρότασης επανάχρησης της καπναποθήκης δημιουργήθηκε το μοντέλο του κτιρίου στο πρόγραμμα Design Builder και μέσω του Optimization Analysis του προγράμματος, εξετάστηκαν διαφορετικοί συνδυασμοί υλικών και πάχους θερμομόνωσης, καθώς και διαφορετικά είδη υαλοπινάκων. Επιλέχθηκε η εφαρμογή θερμομόνωσης πάχους 5 cm από πολυισοκυανικό αφρό στην εσωτερική πλευρά της εξωτερικής τοιχοποιίας και όσον αφορά στους υαλοπίνακες, η εφαρμογή τριπλής υάλωσης πάχους 3mm με επίστρωση χαμηλής θερμικής εκπομπής και με αέριο argon στα διάκενα πάχους 13mm. Στην οροφή του κτιρίου εφαρμόζεται θερμομόνωση με 10 εκ. διογκωμένη πολυστερίνη. Οι τιμές του συντελεστή θερμοπερατότητας που προκύπτουν για τα δομικά στοιχεία του κτιρίου είναι 0,43 W/m2K για τους εξωτερικούς τοίχους και 0,35 W/m2K για την οροφή, τιμές που ικανοποιούν τις ελάχιστες απαιτήσεις του ισχύοντος θεσμικού πλαισίου για τη ριζική ανακαίνιση κτιρίων.

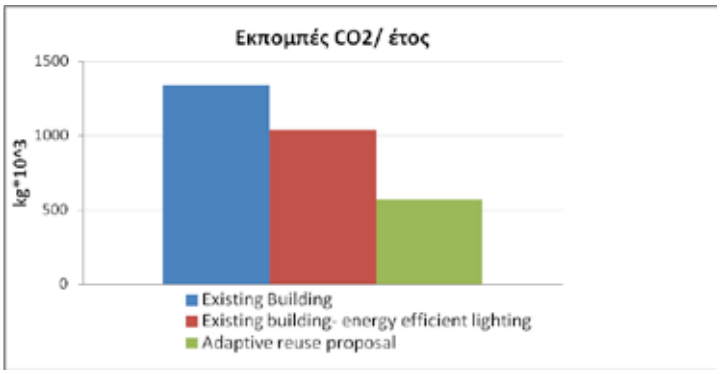
Η συνολική ενεργειακή κατανάλωση για φωτισμό υπολογίζεται σε 155MWh/ έτος, για θέρμανση 129,3MWh/ έτος και για ψύξη 191,7 MWh/ έτος. Οι τιμές αυτές αποτυπώνονται στο διάγραμμα στην εικ.9 συγκριτικά με την περίπτωση του υφιστάμενου κτιρίου. Διαπιστώνεται ότι η πρόταση παρουσιάζει μειωμένες καταναλώσεις κατά 63% για φωτισμό, κατά 70% για θέρμανση και κατά 56% για ψύξη συγκριτικά με την περίπτωση εφαρμογής μόνο φωτισμού led. Τα αντίστοιχα ποσοστά μειωμένων καταναλώσεων συγκριτικά με την αρχική κατάσταση χωρίς επεμβάσεις, είναι 81% για φωτισμό, κατά 60% για θέρμανση και κατά 65% για ψύξη. Η συνολική ενεργειακή κατανάλωση ανά τ.μ/ έτος αποτυπώνεται στο διάγραμμα της εικ.10. Διαπιστώνεται ότι η μεγαλύτερη μείωση σημειώνεται στη θέρμανση, γεγονός που οφείλεται στη μεγάλη συμβολή της θερμομόνωσης αλλά και στο ιδιαίτερα αποδοτικό σύστημα θέρμανσης που εφαρμόζεται. Σημαντική είναι επίσης η μείωση που επιφέρει ο τεχνητός φωτισμός χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης. Σημαντικό στοιχείο στο συνολικό ενεργειακό ισοζύγιο του κτιρίου είναι η προσθήκη της παραγωγής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά πανέλα, η οποία ανέρχεται στα 97,57MWh ανά έτος, που αντιστοιχεί στο 50% της κατανάλωσης για την ψύξη του κτιρίου. Η ποσότητα εκπομπών CO2 υπολογίστηκε σε 569.21 kg/ έτος και είναι κατά 45,2% μικρότερη σε σχέση με την υπόθεση λειτουργίας του κτιρίου με μόνη επέμβαση την εφαρμογή φωτιστικών χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης και κατά 57,5% μικρότερη σε σχέση με την υπόθεση λειτουργίας του κτιρίου χωρίς επεμβάσεις (εικ.11). Όσον αφορά στις συνθήκες θερμικής άνεσης, υπολογίστηκε ότι ο δείκτης PMV έχει τιμή -0.46 και ο δείκτης PPD 9,47%.



Εικόνα 9: Κατανομή ενεργειακής κατανάλωσης και παραγωγή ενέργειας



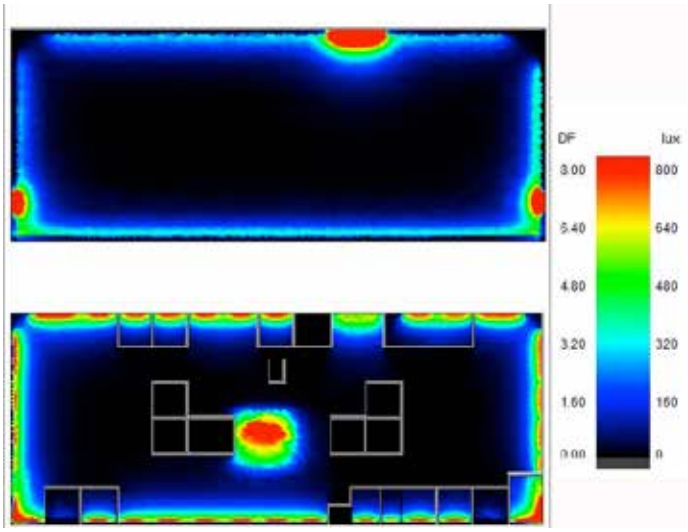
Εικόνα 10: Συνολική ενεργειακή κατανάλωση/μ2/ έτος



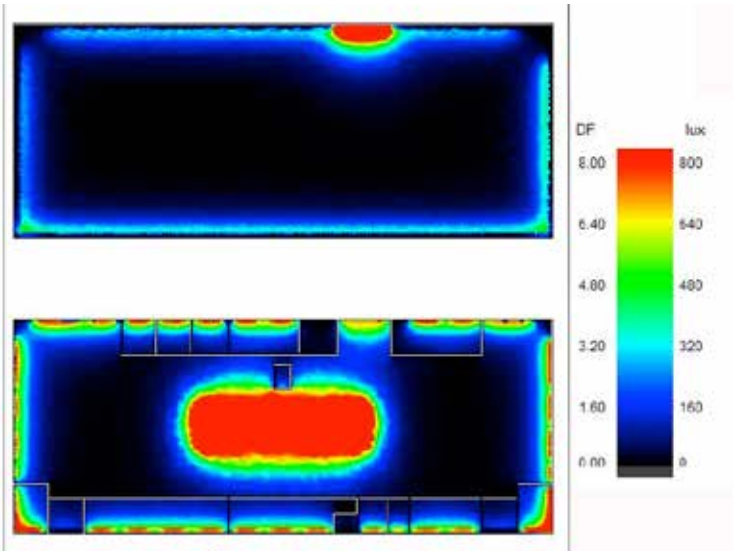
Εικόνα 11: Εκπομπές CO2 ανά έτος

4.4. Συνθήκες φυσικού φωτισμού

Όπως προκύπτει από τη μελέτη φυσικού φωτισμού, οι συνθήκες φυσικού φωτισμού στο υφιστάμενο κτίριο είναι εξαιρετικά ανεπαρκείς για τη νέα λειτουργία του. Η αύξηση του μεγέθους των ανοιγμάτων κρίθηκε συνεπώς απαραίτητη και όπως προκύπτει από τη μελέτη, ενισχύει σημαντικά τον φυσικό φωτισμό και εξασφαλίζεται το επιθυμητό επίπεδο των 500lux σε μία ικανοποιητική ζώνη περιμετρικά του κτιρίου. Προφανώς για τον υπόλοιπο χώρο απαιτείται η συμβολή του τεχνητού φωτισμού, θέμα το οποίο αποτελεί αντικείμενο χειρισμού μέσω της λειτουργικής διάταξης. Η λειτουργική χωροθέτηση που προτείνεται προβλέπει στις περιοχές που απομακρύνονται από τα παράθυρα και στην κεντρική περιοχή της κάτοψης τη χωροθέτηση λειτουργιών με μικρότερες απαιτήσεις σε φυσικό φωτισμό. Επιπλέον, η κεντρική οπή που λειτουργεί ως αίθριο εξασφαλίζει σε ένα βαθμό φυσικό φωτισμό σε αυτή τη κεντρική περιοχή (εικ. 12,13). Η εφαρμογή των εξωτερικών σκιάστρων δεν περιορίζει καθοριστικά την ποσότητα του φυσικού φωτισμού. Η εφαρμογή σκιάστρων στο μεγάλο άνοιγμα του υφιστάμενου κλιμακοστασίου περιορίζει σημαντικά το πρόβλημα της θάμβωσης. Η ενέργεια για τεχνητό φωτισμό είναι κατά 63% λιγότερη από αυτή που θεωρητικά θα απαιτούνταν χωρίς την αύξηση του μεγέθους των ανοιγμάτων. Επισημαίνεται ότι η σύγκριση των δύο κτιρίων έγινε με την υπόθεση ότι εφαρμόζεται ο ίδιος τύπος φωτιστικών χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης.



Εικόνα 12: Daylight Factor και επίπεδα φυσικού φωτισμού (lux) στον 3ο όροφο του υφιστάμενου κτιρίου (επάνω) και της πρότασης (κάτω)



Εικόνα 13: Daylight Factor και επίπεδα φυσικού φωτισμού (lux) στον 4^{ο} όροφο του υφιστάμενου κτιρίου (επάνω) και της πρότασης (κάτω)

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο πλαίσιο της αειφόρου ανάπτυξης, είναι αναμφισβήτητη η σημασία αξιοποίησης των υφιστάμενων κελυφών. Η αξιοποίηση κελυφών που έχουν και ιστορική σημασία, όπως τα ανενεργά κελύφη της βιομηχανικής κληρονομιάς, δίνει πρόσθετη αξία στο εγχείρημα, καθώς ενισχύει τη διατήρηση της ιστορικής μνήμης. Συνεπώς η σημασία της επανάχρησης είναι μεγάλη και αφορά σε πολλά επίπεδα: ιστορικό, κοινωνικό, πολεοδομικό, οικονομικό και ασφαλώς περιβαλλοντικό.

Στόχος της εργασίας είναι η διερεύνηση επανάχρησης ενός αντιπροσωπευτικού κτιρίου πρώην καπναποθήκης, του επανασχεδιασμού του με παράλληλη εφαρμογή μέτρων ενεργειακής αναβάθμισης για την μείωση του ενεργειακού του αποτυπώματος και επίτευξη βέλτιστου εσωκλίματος, το οποίο θα ικανοποιεί τις ανάγκες της νέας χρήσης. Προτείνονται κατάλληλες και απαραίτητες για τη νέα λειτουργία του κτιρίου επεμβάσεις στο κέλυφος του κτιρίου και εφαρμόζονται αποδοτικά συστήματα θέρμανσης- ψύξης, τεχνητού φωτισμού και μηχανικού αερισμού καθώς και φωτοβολταϊκά πανέλα. Η ενεργειακή κατανάλωση που προκύπτει με την εφαρμογή των προτάσεων, λαμβάνοντας υπόψη και την παραγωγή ενέργειας από τα ενεργητικά συστήματα, διαπιστώθηκε ότι μπορεί να είναι μειωμένη συγκριτικά με την περίπτωση της λειτουργίας του κτιρίου χωρίς επεμβάσεις κατά περίπου 78%. Η ποσότητα εκπομπών CO2 της πρότασης που εξετάστηκε διαπιστώθηκε ότι είναι κατά 57,5% μικρότερη. Διαπιστώθηκε ακόμα η σημασία της εφαρμογής τεχνητού φωτισμού χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης, η οποία μπορεί να επιφέρει μείωση στη συνολική ενεργειακή κατανάλωση της τάξης του 25%. Τα αποτελέσματα της μελέτης είναι σε συμφωνία με αντίστοιχες μελέτες, λαμβάνοντας βέβαια υπόψη την ιδιαιτερότητα κάθε περίπτωσης. Συμπεραίνεται επίσης ότι τα πρώην βιομηχανικά κτίρια και ειδικά οι καπναποθήκες, λόγω του μεγάλου μεγέθους και των ενιαίων χώρων, είναι κατάλληλα για την μετατροπή τους σε κτίρια γραφείων. Επισημαίνεται όμως ότι το μεγάλο βάθος των χώρων και το σχετικά μικρό μέγεθος ανοιγμάτων απαιτούν ιδιαίτερους χειρισμούς όσον αφορά στη λειτουργική διαρρύθμιση και οδηγούν στην επιλογή της διάταξης ανοιχτής κάτοψης.

Για την σύνταξη της νέας πρότασης ακολουθήθηκε συγκεκριμένη μεθοδολογία, με στόχο την ενσωμάτωση επεμβάσεων ενεργειακής αναβάθμισης στην πρόταση επανάχρησης υιοθετώντας την προσέγγιση της προσαρμογής της νέας χρήσης στο υφιστάμενο κέλυφος με διατήρηση στον μέγιστο δυνατό βαθμό της ιστορικότητας και των βασικών μορφολογικών του χαρακτηριστικών. Διαπιστώθηκε ότι οι δυνατότητες ενεργειακής αναβάθμισης ανενεργών βιομηχανικών κελυφών με τον παραπάνω τρόπο προσέγγισης είναι εξαιρετικά μεγάλες με σημαντικά ενεργειακά, οικονομικά, περιβαλλοντικά και κοινωνικά οφέλη. Αν και η κάθε περίπτωση χαρακτηρίζεται από ιδιαιτερότητες, συμπεραίνεται ότι η

προσέγγιση της διατήρησης του ιστορικού και αρχιτεκτονικού χαρακτήρα βιομηχανικών κελυφών μπορεί να συνυπάρξει με την εφαρμογή μέτρων ενεργειακής αναβάθμισης κατά τη διαδικασία της επανάχρησης. Η επιλογή της νέας χρήσης καθώς και ειδικοί χειρισμοί επιδρούν καθοριστικά σε αυτή τη διαδικασία.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Κατσίκης Ι., Τσαγκαράκης Κ., 2010. Η Βιομηχανία ως Αστική Πολιτιστική Κληρονομιά: Σε αναζήτηση της νέας χρήσης. Διεθνής Επιτροπή για τη Διατήρηση της Βιομηχανικής Κληρονομιάς TICCIH - Ελληνικό Τμήμα. Το τέλος των γιγάντων. Βιομηχανική κληρονομιά και μετασχηματισμοί των πόλεων, 16-18, Βόλος.

[2] Μπελαβίλας Ν., 2010. Βιομηχανική Αρχαιολογία Η Διεθνής και η Ελληνική Εμπειρία, Ημερίδα Ιστορική Μνήμη της Χαλκίδας, ΤΕΕ Ευβοίας.

[3] Γκουβούση Σ., Ταβλίκος Σπ., 2018, “Οι καπναποθήκες της Θεσσαλονίκης. Η αρχιτεκτονική κληρονομιά του καπνού στον 20ο αιώνα,” University City Press.

[4] Αθανασούλη- Ρογκάκου Α., Αραβαντινός Α., Βλαστός Θ., Κοσμάκη Π., Μπιρμπίλη Κ., Παπαγιάννης Θ., Πολύζος Ι., Σκίκος Γ., Στάμου Α., 1999. Σχεδιασμός Περιβαλλοντικές επιπτώσεις και μέθοδοι εκτίμησής τους. Τόμος. Α. Σχεδιασμός πόλεων και περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Πάτρα.

[5] Douglas J.,2006. Building adaptation, Butterworth-Heinemann.

[6] Yung, E. H. K., Chan, E. H. W., 2012. Implementation challenges to the adaptive reuse of heritage buildings: Towards the goals of sustainable, low carbon cities. Habitat International, vol. 36,p. 352-361

[7] Bullen P., Love P. ,2011. Factors influencing the adaptive reuse of buildings. Journal of Engineering, Design and Technology, vol. 9, no. 1, pp.32-46

[8] Bullen P. A. , 2007. Adaptive reuse and sustainability of commercial buildings. Facilities, vol. 25,p. 20-31

[9] Langston C., 2010. Green adaptive reuse: issues and strategies for the built environment. First international conference on sustainable construction and risk management Chong Qing Municipality, China.

[10] Νομικός Μ. 2004. Αποκατάσταση επανάχρηση ιστορικών κτιρίων και συνόλων. Μεθοδολογία-Εφαρμογές. Εκδ. Γιαχούδη, Θεσσαλονίκη.

[11] Klopotowski M., Zagroba M., 2017.Post-industrial Objects and Buildings in the Structure of the Contemporary City, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 95, 1-10.

[12] Rojic T., 2009.Converted industrial buildings, TUDelft.

[13] Stratton M., 2000. Industrial buildings, Conservation and regeneration, E&FN Spoon, 89

[14] Loures L., Panagopoulos T., 2007. Sustainable reclamation of industrial areas in urban landscapes Sustainable Development and Planning III, vol. 2, pp 791-800

[15] Pachta V., Papayanni I., 2016. The study of the historic Buildings of Electicism in Thessaloniki under the prism of sustainability. Sustainable Synergies from Buildings to the Urban Scale SBE16 Thessaloniki.

[16] Şahin D., Durmuş Arsan Z., Sarp Tunçoku S., Broström T., and Gökçen Akkurt G.,2015. A transdisciplinary approach on the energy efficient retrofitting of a historic building in the Aegean Region of Turkey, Energy and Buildings, 96, 128-139.

[17] Rasmussen T., Møller E. B., and Buch-Hansen T. C., 2015. Extensive Renovation of Heritage Buildings - Reduced Energy Consumption and CO2 Emissions, The Open Construction and Building Technology Journal, 9, 58-69.

[18] Galatioto A., Ricciu P., Salem T., Kinab E., 2019. Energy and economic analysis on retrofit actions for Italian public historic buildings, Energy, 176, 58-66.

KΛIMA

ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΑ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Γεώργιος Ευθυμίου*, Φώτιος Μπάρμπας, Νικόλαος Μουσσιόπουλος

Εργαστήριο Μετάδοσης Θερμότητας και Περιβαλλοντικής Μηχανικής, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα
e-mail: gefthimiou@meng.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο στόχος αυτής της εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός αλγορίθμου που είναι σε θέση να παρέχει προβλέψεις των Στατιστικών της Ταχύτητας του Ανέμου (Wind Speed Statistics, WSS) σε περιβάλλοντα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Το θέμα έχει ξεκάθαρα ενδιαφέρον, καθώς οι προβλέψεις των καταιγίδων και των ακραίων ανέμων είναι σημαντικές για τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων και των ομάδων αντιμετώπισης εκτάκτων αναγκών σε περιβάλλοντα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, π.χ. σε μέρη όπου θα μπορούσαν να βρίσκονται ανεμογεννήτριες, συμπεριλαμβανομένων των πόλεων. Ο στόχος της εργασίας επιτυγχάνεται μέσω δύο φάσεων: α) Κατά τη διάρκεια της φάσης προετοιμασίας, πραγματοποιείται η κατασκευή μιας μεγάλης βάσης δεδομένων WSS που βασίζεται στην Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (Computational Fluid Dynamics, CFD) η οποία περιλαμβάνει πεδία ροής διαφόρων κατευθύνσεων του ανέμου σε όλα τα αριθμητικά σημεία του πλέγματος, β) Στη δεύτερη φάση, ο αλγόριθμος χρησιμοποιείται για την εύρεση των εγγραφών στη βάση δεδομένων WSS με τις πλησιέστερες μετεωρολογικές συνθήκες στις μετεωρολογικές συνθήκες ενδιαφέροντος. Η αξιολόγηση του μοντέλου CFD (συμπεριλαμβανομένων των μεθοδολογιών τύρβης RANS και LES) πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας τα πειραματικά δεδομένα του πειράματος αεροσήραγγας MUST (Mock Urban Setting Test).

Λέξεις Κλειδιά: *Ταχύτητα ανέμου, Αλγόριθμος, Υπολογιστική Ρευστοδυναμική*

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η πρόβλεψη της ταχύτητας του ανέμου σε περιβάλλοντα Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) είναι ένα πολύ ενδιαφέρον πεδίο έρευνας. Κατά τη διάρκεια μιας μικρής περιόδου (π.χ. 15 λεπτά) και σε όλες τις θέσεις του ατμοσφαιρικού επιφανειακού στρώματος, είναι σημαντικό να γνωρίζουμε το εύρος των τιμών της ταχύτητας του ανέμου καθώς και την πιθανότητα η ταχύτητα του ανέμου να ξεπεράσει ένα όριο. Αυτά έχουν, για παράδειγμα, πρακτικές εφαρμογές στο σχεδιασμό και τη λειτουργία των ανεμογεννητριών (π.χ. [1]). Η αξιόπιστη εκτίμηση των ακραίων ταχυτήτων ανέμου είναι σημαντική για εφαρμογές αιολικής ενέργειας καθώς όταν η ταχύτητα ανέμου ξεπερνά ένα όριο τότε είναι ανεπιθύμητη, επειδή τα αιολικά πάρκα παρέχουν αμελητέα ισχύ για τιμές ανέμου μεγαλύτερες από τα όρια αποκοπής τους. Οι ακραίες τιμές της ταχύτητας του ανέμου μπορούν επίσης να θέσουν σε κίνδυνο τη μηχανική ασφάλεια μιας εγκατάστασης ([2]).

Η πρόβλεψη της ταχύτητας του ανέμου στην ατμόσφαιρα μπορεί να πραγματοποιηθεί με τα υπολογιστικά μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί στην επιστήμη για να βοηθήσουν τους ερευνητές να πραγματοποιούν χρήσιμες προβλέψεις. Η Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (Computational Fluid Dynamics, CFD) μπορεί να θεωρηθεί ως ένα από τα καλύτερα αριθμητικά εργαλεία για την πρόβλεψη της τυρβώδους ροής ([3]). Όταν η τύρβη μοντελοποιείται με την Άμεση Αριθμητική Προσομοίωση (Direct Numerical Simulation, DNS) ή την Προσομοίωση Μεγάλων Δινών (Large Eddy Simulation, LES), η πρόβλεψη της ταχύτητας του ανέμου είναι εφικτή μέσω των προβλεπόμενων χρονοσειρών. Προϋπόθεση για τη χρήση του DNS ή του LES είναι η χρήση ενός αποδοτικού κώδικα και πολλών υπολογιστικών κόμβων/πυρήνων. Αυτές οι μέθοδοι έχουν υψηλό υπολογιστικό κόστος όσον αφορά την υπολογιστική ισχύ και το χρόνο. Επιπλέον, για το DNS, οι υπολογιστικές απαιτήσεις είναι τόσο υψηλές ώστε οι προσομοιώσεις πέρα από ένα συγκεκριμένο αριθμό Reynolds να μην είναι εφικτές (π.χ. αριθμός Reynolds = 4,750–7,000 [4]). Από άποψη της έκτακτης ανάγκης, όπου αξιόπιστα συμπεράσματα είναι αναγκαία (π.χ. [5]) σε σύντομους χρόνους (π.χ. λιγότερο από 5 min), η επιλογή της μοντελοποίησης RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes) και LES μπορεί να θεωρηθεί ελκυστική.

Μία μεμονωμένη προσομοίωση RANS μπορεί να διαρκέσει από κάποιες ώρες μέχρι κάποιες ημέρες με βάση την επιθυμητή ακρίβεια. Η υψηλότερη ακρίβεια των αποτελεσμάτων συνήθως επιτυγχάνεται με ένα πολύ πυκνό πλέγμα (π.χ. 20 εκατομμύρια υπολογιστικά κελιά), προχωρημένα μοντέλα τύρβης και παραμετροποιήσεις και υψηλής τάξης αριθμητικά σχήματα. Από την άλλη πλευρά, μία κατάσταση έκτακτης ανάγκης απαιτεί απαντήσεις σε ελάχιστα λεπτά. Για αυτό τον λόγο, στην παρούσα εργασία, ένας αλγόριθμος αναπτύσσεται για να εξάγει την πληροφορία από μία βάση δεδομένων RANS και για να παρέχει μία αξιόπιστη και γρήγορη πρόβλεψη της ταχύτητας του ανέμου.

Ο αλγόριθμος περιγράφεται στην Ενότητα 2. Στη συνέχεια, η Ενότητα 3 παρουσιάζει την δοκιμαστική περίπτωση όπου εφαρμόστηκε ο αλγόριθμος, και η Ενότητα 4 παρουσιάζει τη βάση δεδομένων, για τη συγκεκριμένη περίπτωση, από την οποία ο αλγόριθμος εξάγει την κατάλληλη πληροφορία. Η αξιολόγηση του αλγορίθμου πραγματοποιείται στην Ενότητα 5. Αξιολόγηση του μοντέλου CFD και περιγραφή των προσομοιώσεων πραγματοποιούνται στις Ενότητες 6 και 7. Τέλος η Ενότητα 8 παρουσιάζει τα συμπεράσματα.

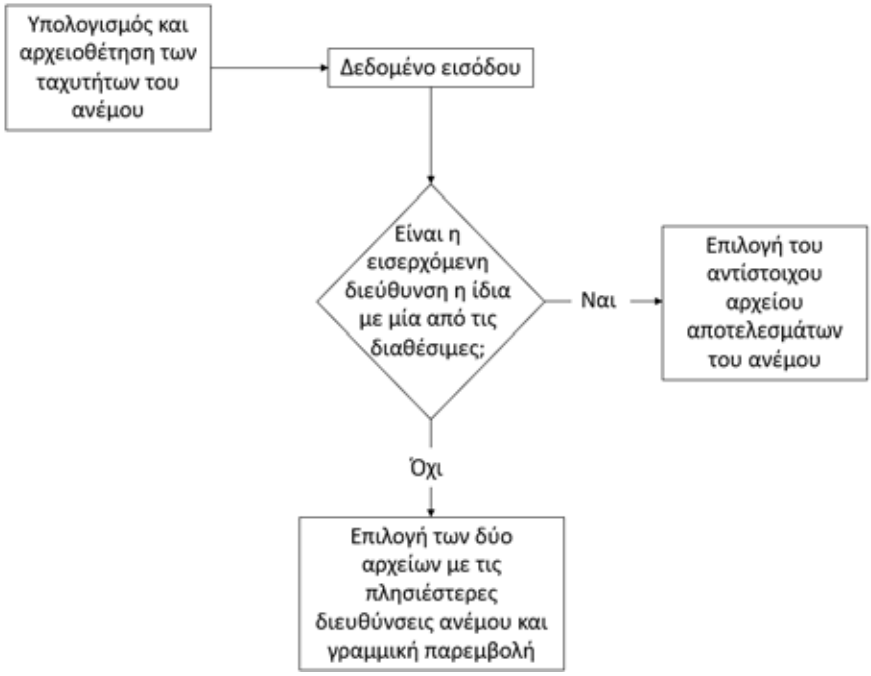
2. Ο ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ

Ο αλγόριθμος που έχει αναπτυχθεί είναι ένα υπολογιστικό σύστημα λογισμικού και παρουσιάζεται σχηματικά στην Εικόνα 1. Οι ταχύτητες του ανέμου προϋπολογίζονται στον αλγόριθμο σε όλο το υπολογιστικό πεδίο και για ένα εύρος πιθανών διευθύνσεων ανέμου. Αυτοί οι υπολογισμοί μπορεί να είναι πολύ γρήγοροι επειδή είναι ανεξάρτητοι μεταξύ τους και συνεπώς μπορούν να πραγματοποιηθούν παράλληλα, με την κατάλληλη, διαθέσιμη υποδομή υλικού.

Ο αλγόριθμος αποτελείται από τα ακόλουθα βήματα:

1. Οι ταχύτητες του ανέμου υπολογίζονται και αρχειοθετούνται για ένα συγκεκριμένο υπολογιστικό πεδίο, για έναν αριθμό διακριτών εισερχόμενων διευθύνσεων ανέμου (στην παρούσα δοκιμή, 8 εισερχόμενες διευθύνσεις ανέμου έχουν θεωρηθεί για να καλύψουν ολόκληρο το εύρος των 360ο).
2. Ο χρήστης παρέχει σαν δεδομένο εισόδου την πραγματική εισερχόμενη διεύθυνση του ανέμου.
3. Εάν η εισερχόμενη διεύθυνση του ανέμου συμπίπτει με μία από τις διευθύνσεις για τις οποίες έχουν υπολογιστεί οι ταχύτητες του ανέμου, ο αλγόριθμος επιλέγει το αντίστοιχο αρχείο αποτελεσμάτων του ανέμου από τη βάση δεδομένων. Εάν όχι, τότε τα δύο αρχεία

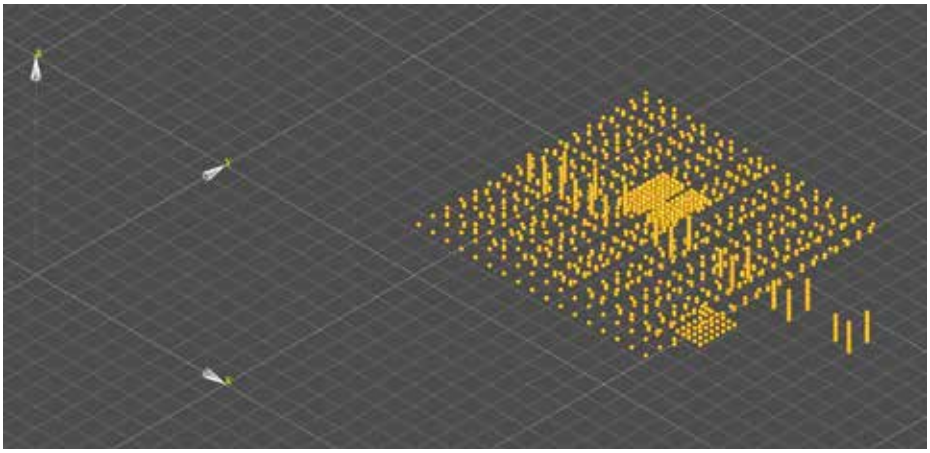
αποτελεσμάτων για τις διευθύνσεις του ανέμου και στις δύο πλευρές της πραγματικής διεύθυνσης ανακτώνται και γραμμική παρεμβολή εφαρμόζεται για να υπολογιστεί το κατάλληλο αρχείο αποτελεσμάτων του ανέμου. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η γραμμική παρεμβολή είναι ο απλούστερος δυνατός τρόπος για να κατασκευαστεί το ενδιάμεσο πεδίο ανέμου ανάμεσα στις δύο διαδοχικές διευθύνσεις ανέμου. Ιδιαίτερα, η γραμμική παρεμβολή θα πρέπει να δουλέψει ιδανικά όταν η απόσταση ανάμεσα σε δύο διαδοχικές διευθύνσεις ανέμου είναι πολύ μικρή. Πιο προχωρημένες μέθοδοι που βασίζονται π.χ. σε επιστήμη μεγάλων δεδομένων και σε μηχανική μάθηση θα αυξήσουν την αποδοτικότητα της παρούσας ιδέας. Αυτές είναι έννοιες που θα εξεταστούν από τους συγγραφείς στο μέλλον.



Εικόνα 1: Σχηματική αναπαράσταση του αλγορίθμου για την πρόβλεψη των ταχυτήτων του ανέμου.

3. Η ΠΙΛΟΤΙΚΗ ΔΟΚΙΜΗ

Προκειμένου να αξιολογηθεί ο αλγόριθμος, ένα υπολογιστικό πεδίο που περιλαμβάνει μέρος του ατμοσφαιρικού επιφανειακού στρώματος επιλέχθηκε. Η Εικόνα 2 παρουσιάζει το επιλεγμένο πεδίο. Οι 3,568 αισθητήρες του πειράματος MUST τοποθετήθηκαν για αυτή την άσκηση για να καλύψει όσο το δυνατόν την περιοχή (κίτρινοι κύκλοι). Το ύψος των αισθητήρων κυμαινόταν από 0.45 m έως 13.5 m.



Εικόνα 2: Το υπολογιστικό πεδίο που περιλαμβάνει μέρος του ατμοσφαιρικού επιφανειακού στρώματος. Παρουσιάζονται οι 3,568 αισθητήρες (κίτρινοι κύκλοι).

4. Η ΒΑΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Όλοι οι υπολογισμοί του πεδίου του ανέμου πραγματοποιήθηκαν με το CFD μοντέλο ADREA-HF ([6]). Το μοντέλο ADREA-HF είναι ένα Ευουλεριανό μοντέλο για την επίλυση των εξισώσεων RANS και LES.

Η βάση δεδομένων για την περίπτωση που εξετάζεται περιλαμβάνει τα υπολογισμένα πεδία ροής από τον κώδικα ADREA-HF για 8 εισερχόμενες διευθύνσεις ανέμου (0ο, 45ο, 90ο, 135ο, 180ο, 225ο, 270ο, 315°) και ένα αρχείο με πληροφορίες για το υπολογιστικό πλέγμα. Το μέγεθος της βάσης δεδομένων για όλες τις διευθύνσεις ανέμου είναι περίπου 2GB. Η ταχύτητα αναφοράς του ανέμου για όλες τις διευθύνσεις ανέμου είναι ίση με 8.3 m/s σε ύψος 10m. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στην παρούσα εργασία ο αλγόριθμος και η βάση δεδομένων δεν έχουν σχεδιαστεί για να λαμβάνουν υπόψη διαφορετικές ταχύτητες αναφοράς, υπάρχουν όμως σκέψεις μελλοντικά να χρησιμοποιηθεί κάποιου είδους ομοιότητα στις κατανομές ταχύτητας. Τέλος, εφαρμόστηκαν ουδέτερες ατμοσφαιρικές συνθήκες και δεν υπάρχει κάποια επίδραση στα αποτελέσματα. Μελλοντικά θα εξεταστούν και οι ευσταθείς και ασταθείς ατμοσφαιρικές συνθήκες.

Ο Πίνακας 1 παρουσιάζει λεπτομερώς τη διακριτοποίηση του υπολογιστικού πεδίου όπου σχεδόν 22.5 εκατομμύρια κελιά έχουν χρησιμοποιηθεί. Η επιλογή του πλέγματος πραγματοποιήθηκε έτσι ώστε από τη μία μεριά να είναι υπολογιστικά διαχειρήσιμο και από την άλλη μεριά να είναι κοντά στο πλέγμα του πειράματος MUST που παρουσιάστηκε στην εργασία [7]. Υπενθυμίζεται ότι στο πείραμα MUST οι οριζόντιες διαστάσεις του πεδίου ήταν περίπου όπως στην παρούσα περίπτωση (≈ 270 m) με ένα ελάχιστο μέγεθος κελιού ίσο με 0.25 m στην οριζόντια και κάθετη διεύθυνση. Επίσης, όσον αφορά τις οριακές συνθήκες εδάφους, τα πλευρικά επίπεδα (είσοδος-έξοδος) για κάθε μία από τις 8 διευθύνσεις ανέμου και τις αριθμητικές μεθόδους, παρόμοια στρατηγική έχει υιοθετηθεί όπως στην εργασία [7].

Πίνακας 1: Μέγεθος του επιλεγμένου υπολογιστικού πεδίου και αριθμητικό πλέγμα.

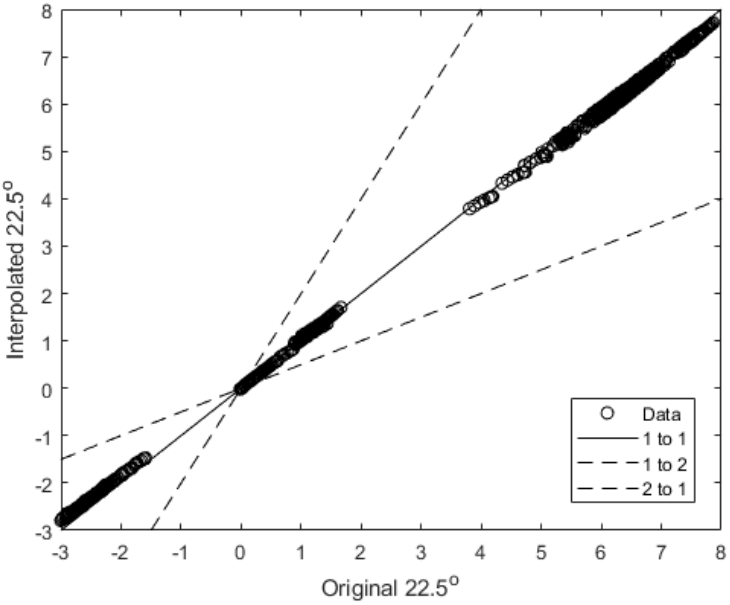
Διαστάσεις του πεδίου *x*/*y*/*z* (m)	Συνολικός αριθμός κελιών	Αριθμός κελιών σε κάθε άξονα			Ελάχιστα/μέγιστα μεγέθη κελιών (m)		
		x	*y*	*z*	*x*	*y*	*z*
277.85/303.43/21.06	22,365,000	750	852	35	0.25/5.14	0.25/5.14	0.25/1.84

5. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ

Ο αλγόριθμος αξιολογήθηκε για την παρούσα περίπτωση για εισερχόμενη διεύθυνση ανέμου ίση με 22.5ο (μη-υπάρχουσα στη βάση δεδομένων). Ο αλγόριθμος κατασκεύασε το πεδίο ροής χρησιμοποιώντας γραμμική παρεμβολή με βάση τα πεδία ροής των 0ο και 45ο. Καθώς μεταχειριζόμαστε

υποθετικά σενάρια και δεν υπάρχουν πραγματικές μετρήσεις, μία επιπλέον προσομοίωση για τις 22.5° πραγματοποιήθηκε για να δημιουργηθούν συνθετικά δεδομένα ροής.

Η απόδοση του αλγορίθμου για τις 22.5° παρουσιάζεται στην Εικόνα 3 όπου στον οριζόντιο άξονα έχουν τοποθετηθεί οι μετρήσεις της συνθετικής προσομοίωσης και στον κάθετο άξονα οι τιμές της παρεμβολής στις ίδιες θέσεις μέτρησης του πεδίου ροής (παρουσιάζονται οι συνιστώσες της ταχύτητας u,v,w). Όλα τα δεδομένα ακολουθούν την ιδανική γραμμή 1 προς 1 γεγονός που ενισχύει την καλή απόδοση του αλγορίθμου.



Εικόνα 3: Αξιολόγηση του αλγορίθμου.

Η χρονική διάρκεια εκτέλεσης του αλγορίθμου για την περίπτωση των 22.5° (περιλαμβάνει τη χρονική διάρκεια διαβάσματος δύο αρχείων από τη βάση δεδομένων και χρονική διάρκεια παρεμβολής στις επιθυμητές μοίρες) υπολογίστηκε ίση με 3.06 min.

Δεδομένου ότι η χρονική διάρκεια της προσομοίωσης των 22.5° είναι περίπου ίση με 15 ώρες σε 160 υπολογιστικούς πυρήνες είναι εμφανές ότι η παρούσα μεθοδολογία μπορεί να εφαρμοστεί αποδοτικά για περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης.

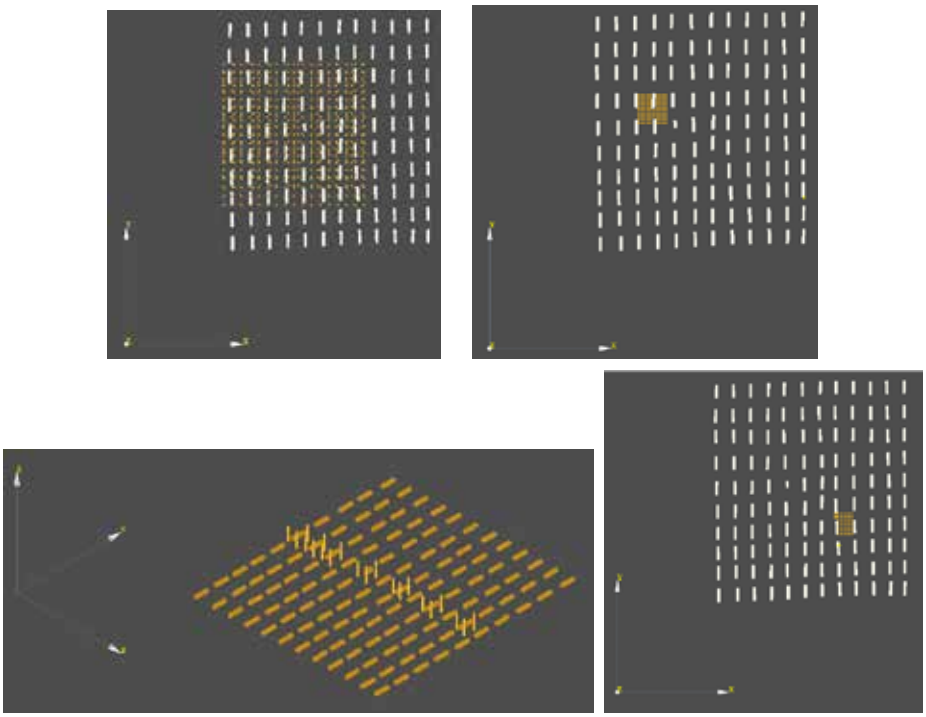
6. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΚΩΔΙΚΑ

6.1. Το πείραμα αεροσήραγγας MUST

Η σωστή λειτουργία του αλγορίθμου προϋποθέτει ότι ο κώδικας Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής προβλέπει με ακρίβεια την πραγματικότητα. Για αυτό το λόγο ο κώδικας αξιολογήθηκε με τα δεδομένα του πειράματος αεροσήραγγας MUST [8] που δίνονται σε κλίμακα του αντίστοιχου πειράματος πεδίου [9].

Στο πείραμα MUST τα εμπόδια ήταν τοποθετημένα σε 12 σειρές, όπου κάθε μία αποτελούνταν από 10 εμπόδια. Τα εμπόδια ήταν σχεδόν παρόμοια και είχαν μήκος, πλάτος και ύψος 12.2 m, 2.42 m και 2.54 m αντίστοιχα. Οι ταχύτητες του ανέμου είχαν μετρηθεί από τους 3,568 αισθητήρες που παρουσιάστηκαν στην Ενότητα 3. Σημειώνεται ότι μόνο τα δεδομένα μέτρησης που ήταν διαθέσιμα στους συγγραφείς (μέσω της βάσης δεδομένων του COST Action 732) λαμβάνονται υπόψη. Η ιστοσελίδα για τη βάση δεδομένων του COST Action 732 είναι: https://mi-pub.cen.uni-hamburg.de/index.php?id=484.

Οι μετρήσεις της αεροσήραγγας των ταχυτήτων u, v και w χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση των αριθμητικών αποτελεσμάτων του υδροδυναμικού προβλήματος. Τέσσερις ομάδες αισθητήρων χρησιμοποιήθηκαν που αντιστοιχούν σε μετρήσεις σε ένα αραιό δίκτυο, πυκνό δίκτυο, κάθετα προφίλ και επίπεδα uw (Εικόνα 4).

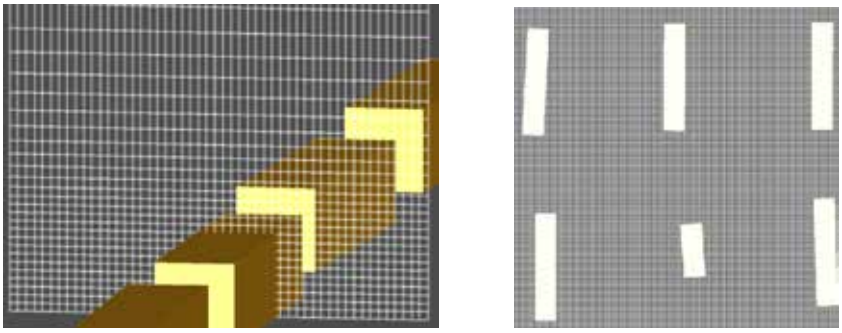


Εικόνα 4: Οι αισθητήρες της ταχύτητας (κίτρινοι κύκλοι) του πειράματος αεροσήραγγας MUST (πάνω αριστερά: αραιό δίκτυο, πάνω δεξιά: πυκνό δίκτυο, κάτω αριστερά: κάθετα προφίλ, κάτω δεξιά: επίπεδα uw). Διακρίνονται επίσης και τα 120 εμπόδια.

6.2. Οι αριθμητικές προσομοιώσεις

Το μέγεθος του υπολογιστικού πεδίου είναι ίσο με 242.75 m X 233.23 m X 21.06 m στον άξονα x, y και z αντίστοιχα. Η απόσταση του δυτικού ορίου (αριστερή πλευρά του πεδίου) από το πρώτο εμπόδιο και των πλευρικών ορίων από τα εμπόδια είναι ίση με 17.55 m (δηλαδή $5H_{max}$ όπου H_{max}=3.51m είναι το ύψος του υψηλότερου κτιρίου) και η απόσταση του ανατολικού ορίου από το τελευταίο εμπόδιο είναι ίσο με 52.65 m ($15H_{max}$). Το ύψος του πεδίου αντιστοιχεί σε 6 φορές το μέγιστο ύψος των κτιρίων. Αυτές οι διαστάσεις συμφωνούν με προτάσεις του COST Action 732 [10].

Το ίδιο πλέγμα που παρουσιάστηκε στον Πίνακα 1 χρησιμοποιήθηκε για τη διακριτοποίηση του πεδίου. Το ύψος των κελιών κοντά στο έδαφος ικανοποιεί την ελάχιστη ανάλυση πλέγματος που προτάθηκε στην εργασία [11], δηλαδή 1/10 του ύψους του κτιρίου των 2.54 m (Εικόνα 5). Συνεπώς το πεδίο ανάμεσα στα κτίρια έχει κυβικά κελιά και στη συνέχεια διαρκώς επεκτείνεται με ένα συντελεστή 1.1. Στις οριζόντιες διευθύνσεις τα dx και dy διατηρούνται σταθερά (Εικόνα 5) στο πεδίο των εμποδίων καλύπτοντας μία περιοχή 172.55 m X 198.13 m. Έξω από την περιοχή των εμποδίων το dx και dy επεκτείνονται με ένα συντελεστή 1.1.



Εικόνα 5: Λεπτομέρειες του πλέγματος κοντά στα τοιχώματα και ανάμεσα στα κτίρια.

Για τις προσομοιώσεις LES στην έξοδο της ροής μία μη-ανακλαστικού τύπου οριακή συνθήκη για τη συνιστώσα της κάθετης ταχύτητας χρησιμοποιήθηκε καθώς και μία μηδενικής-κλίσης οριακή συνθήκη για τις υπόλοιπες συνιστώσες της ταχύτητας. Συναρτήσεις τοιχώματος για τραχύ τοίχωμα χρησιμοποιήθηκαν στις επιφάνειες των κτιρίων και το έδαφος με ένα μήκος τραχύτητας z_0 ίσο με 1.E-5 m. Στην είσοδο και στο πάνω όριο, μία μηδενική τιμή χρησιμοποιήθηκε ως οριακή συνθήκη για τις συνιστώσες της ταχύτητας v και w ενώ η οριακή συνθήκη τύπου Langevin χρησιμοποιήθηκε για τη συνιστώσα της ταχύτητας u. Τελικώς, ως αρχικές συνθήκες, το κάθετο προφίλ της ταχύτητας της μέσης ροής που επιβλήθηκε στην είσοδο χρησιμοποιήθηκε σε ολόκληρο το πεδίο. Για τις προσομοιώσεις RANS, ίδιες οριακές συνθήκες χρησιμοποιήθηκαν όπως στην εργασία [7].

7. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Οι Δείκτες Αξιολόγησης (ΔΑ) παρέχουν ένα ποσοτικό τρόπο σύγκρισης ανάμεσα στις προβλέψεις του μοντέλου και τις μετρήσεις. Οι ΔΑ είναι πολύ χρήσιμες για την αξιολόγηση ενός μοντέλου ιδιαίτερα στην περίπτωση ενός μεγάλου αριθμού δεδομένων. Διάφοροι ΔΑ είναι διαθέσιμοι και κάθε ένας από αυτούς έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του [10].

Στην παρούσα μελέτη, το Hit Rate (HR) χρησιμοποιήθηκε. Η χρήση του HR για την αξιολόγηση μικροκλιματικών μοντέλων προτάθηκε από το COST Action 732 [10]. Το HR καθορίζει το κλάσμα των προβλέψεων που διαφέρουν από τις παρατηρήσεις εντός ενός επιτρεπόμενου εύρους που δίνεται από το σχετικό σφάλμα D. Η πειραματική αβεβαιότητα λαμβάνεται υπόψη με την παράμετρο W, η οποία εκφράζει ένα όριο “χαμηλής τιμής”. Το HR υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$q = \frac{N}{n} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} N_i \qquad \text{με} \qquad N_i = \begin{cases} 1 \; \gamma\iota\alpha \; \left|\frac{P_i - O_i}{O_i}\right| \le D \; \text{ή} \; |P_i - O_i| \le W \\ 0 \; \delta\iota\alpha\phi o\rho\varepsilon\tau\iota\kappa\acute{\alpha} \end{cases} \qquad (1)$$

όπου n είναι ο συνολικός αριθμός των δεδομένων, P είναι οι προβλέψεις του μοντέλου και O είναι οι αντίστοιχες πειραματικές παρατηρήσεις. Η ελάχιστη τιμή του HR είναι 0 και η μέγιστη ίση με 1, που αντιστοιχεί σε μία τέλεια συμφωνία με το πείραμα. Η παράμετρος W είναι ίση με 0.064 για τη συνιστώσα της ταχύτητας u και 0.056 για τις συνιστώσες της ταχύτητας v και w.

Ο Πίνακας 2 παρουσιάζει το HR για τις ομάδες αισθητήρων που παρουσιάστηκαν στην Εικόνα 4. Μέσα στην παρένθεση εμφανίζεται ο αριθμός των αισθητήρων για κάθε ομάδα. Παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα του RANS είναι παρόμοια με αυτά του LES και εκτός της συνιστώσας w τα αποτελέσματα του LES είναι ελαφρώς καλύτερα. Επίσης τα αποτελέσματα της συνιστώσας u που είναι και η κύρια συνιστώσα του ανέμου είναι καλύτερα σε σχέση με τις συνιστώσες v και w. Ακολουθεί η συνιστώσα v και τέλος η συνιστώσα w. Σύμφωνα με το COST Action 732 το κριτήριο αποδοχής του HR είναι HR ≥ 0.66. Παρατηρείται ότι το κριτήριο αυτό ικανοποιείται για τις οριζόντιες συνιστώσες u και v και για τις δύο μεθοδολογίες (RANS και LES) και δεν ικανοποιείται για τη κάθετη συνιστώσα w.

Πίνακας 2: Αποτελέσματα του HR για τις ομάδες αισθητήρων της Εικόνας 4 για τις συνιστώσες της ταχύτητας u, v, w.

	RANS	LES
U-αραιό πλέγμα (900)	0.91	0.95

U-πυκνό πλέγμα (279)	0.82	0.88
U-προφίλ (566)	0.94	0.97
U-επίπεδα uw (39)	1	1
V-αραιό πλέγμα (900)	0.8	0.83
V-πυκνό πλέγμα (279)	0.86	0.85
W-προφίλ (566)	0.59	0.41
W-επίπεδα uw (39)	0.64	0.54

Στη βιβλιογραφία διάφορα μοντέλα έχουν συγκριθεί μεταξύ τους χρησιμοποιώντας το πείραμα αεροσήραγγας MUST. Για παράδειγμα, στην εργασία [12] τα HR 8 μοντέλων, για 498 σημεία (επίπεδο xz), για τη συνιστώσα της ταχύτητας u κυμαίνονταν από 0.63 έως 0.91 ενώ για τη συνιστώσα της ταχύτητας w κυμαίνονταν από 0.12 έως 0.26. Το HR των ίδιων συνιστωσών της ταχύτητας των προσομοιώσεων της παρούσας εργασίας είναι μέσα ή και καλύτερα από αυτά τα εύρη υποδηλώνοντας τη συνέπεια με τα αποτελέσματα που αποκτήθηκαν από την εργασία [12] και από την ομάδα του COST 732 [10].

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτή την εργασία ένας αλγόριθμος αναπτύχθηκε για την πρόβλεψη της ταχύτητας του ανέμου σε περιβάλλοντα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Ο αλγόριθμος βασίζεται σε αποτελέσματα μοντέλου CFD ενώ ταυτόχρονα είναι αρκετά γρήγορος ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης. Μία βάση δεδομένων ταχυτήτων ανέμου υπολογίζεται και αποθηκεύεται στη φάση προετοιμασίας χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο CFD για το επιθυμητό υπολογιστικό πεδίο και για έναν αριθμό εισερχομένων διευθύνσεων ανέμου. Σε ένα πραγματικό γεγονός, ο αλγόριθμος είτε επιλέγει από τη βάση δεδομένων τα κατάλληλα πεδία ανέμου, εάν η εισερχόμενη διεύθυνση ανέμου συμπίπτει με μία από τις υπάρχουσες στη βάση δεδομένων, είτε υπολογίζει το πεδίο ανέμου με παρεμβολή από τις κοντινότερες διευθύνσεις ανέμου στη βάση δεδομένων. Η παραπάνω διαδικασία που εκτελείται στην περίπτωση ενός γεγονότος (δηλαδή απόκτηση του πεδίου ανέμου από τη βάση δεδομένων, ενδεχόμενη παρεμβολή) είναι πολύ γρήγορη και κατάλληλη για εφαρμογή σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης.

Η δοκιμή που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή την εργασία για την αξιολόγηση του αλγορίθμου είναι ένα υπολογιστικό πεδίο που περικλείει μέρος του ατμοσφαιρικού επιφανειακού στρώματος. Τα πεδία του ανέμου υπολογίστηκαν για 8 εισερχόμενες διευθύνσεις ανέμου που καλύπτουν όλο το εύρος των 360ο. Ο κώδικας CFD ADREA-HF χρησιμοποιήθηκε σε αυτή τη μελέτη για τον υπολογισμό των πεδίων ροής και του συνθετικού πεδίου ροής των 22.5ο (δεν συμπεριλαμβάνεται στην προϋπολογισμένη βάση δεδομένων) καθώς μεταχειριζόμαστε υποθετικά σενάρια. Ο αλγόριθμος έδειξε ικανοποιητική λειτουργία. Η επίλυση αποκτήθηκε σε μικρό χρόνο εκτέλεσης (λιγότερο από 5 min) γεγονός που υποδηλώνει την καταλληλότητα του αλγορίθμου για κρίσιμη απόκριση.

Τέλος η καταλληλότητα του κώδικα CFD αξιολογήθηκε με επιπλέον προσομοιώσεις του πειράματος αεροσήραγγας MUST. Τα αριθμητικά αποτελέσματα δύο μεθοδολογιών τύρβης (RANS και LES) συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις των συνιστωσών της ταχύτητας u, v και w. Ο δείκτης αξιολόγησης HR είναι καλός και ικανοποιείται στην περίπτωση των συνιστωσών u και v. Για την ταχύτητα w ο δείκτης HR είναι καλύτερος σε σχέση με αποτελέσματα της βιβλιογραφίας.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι προσομοιώσεις υποστηρίχθηκαν από υπολογιστικό χρόνο που χορηγήθηκε από το Εθνικό Δίκτυο Υποδομών Τεχνολογίας και Έρευνας (ΕΔΥΤΕ) στην Εθνική εγκατάσταση υπολογιστών υψηλής απόδοσης ARIS (http://hpc.grnet.gr) υπό το έργο CFD-RI (pr008008).

Οι συγγραφείς θέλουν να ευχαριστήσουν τον Δρ Τόλια Ηλία από το ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος για την άδεια να χρησιμοποιήσουν την έκδοση MPI του κώδικα ADREA-HF.

Οι συγγραφείς θέλουν να ευχαριστήσουν όλα τα μέλη του COST Action 732 (https://mi-pub.cen.uni-hamburg.de/index.php?id=484).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Seshaiah, C.V., and Sukkiramathi, K., 2016, “A Mathematical model to estimate the wind power using three parameter Weibull distribution,” Wind and Structures, 22(4), pp. 393-408.

[2] Chiodo, E., and De Falco, P., 2016, “Inverse Burr distribution for extreme wind speed prediction: Genesis, identification and estimation,” Electric Power Systems Research, 141, pp. 549-561.

[3] Tolias, I.C., Koutsourakis, N., Hertwig, D., Efthimiou, G.C., Venetsanos, A.G., and Bartzis, J.G., 2018, “Large Eddy Simulation study on structure of turbulent flow in a complex city,” J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 177, pp. 101–116.

[4] Coceal, O., Goulart, E.V., Branford, S., Thomas, T.G., and Belcher, S.E., 2014, “Flow structure and near-field dispersion in arrays of building-like obstacles,” J Wind Eng. Ind. Aerodyn., 125, pp. 52–68.

[5] Koutsourakis, N., Bartzis, J.G., and Markatos, N.C., 2012, “Evaluation of Reynolds stress, k-ε and RNG k-ε turbulence models in street canyon flows using various experimental datasets,” Environ. Fluid Mech., 12, pp. 379–403.

[6] Bartzis, J.G., 1991, “ADREA-HF: a three dimensional finite volume code for vapour cloud dispersion in complex terrain,” CEC JRC Ispra Report EUR 13580 EN, Ispra: EC Joint Research Centre.

[7] Efthimiou, G.C., 2019, “Prediction of four concentration moments of an airborne material released from a point source in an urban environment,” J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 184, pp. 247-255.

[8] Bezpalcova, K., and Harms, F., 2005, “EWTL Data Report/Part I: Summarized Test Description Mock Urban Setting Test,” Technical Report, Environmental Wind Tunnel Lab. Center for Marine and Atmospheric Research, University of Hamburg.

[9] Yee, E., and Biltoft, C., 2004, “Concentration fluctuation measurements in a plume dispersing through a regular array of obstacles,” Bound.-Layer Meteorol., 111, pp. 363–415.

[10] Schatzmann, M., Olesen, H., and Franke, J., 2010, “Model Evaluation Case Studies: Approaches and Results,” COST Action 732 Quality Assurance and Improvement of Microscale Meteorological Models, University of Hamburg, ISBN 3-00-018312-4.

[11] Tominaga, Y., Mochida, A., Yoshie, R., Kataoka, H., Nozu, T., Yoshikawa, M., and Shirasawa, T., 2008, “AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings,” J. Wind Eng. Ind. Aerod., 96, pp. 1749–1761.

[12] Tominaga, Y., et al., 2013, “Cross comparisons of CFD results of wind and dispersion fields for MUST experiment: evaluation exercises by AIJ,” J. Asian Architect. Build Eng., 12(1), pp. 117–124.

ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ALL SKY ΚΑΜΕΡΩΝ

Σταύρος-Ανδρέας Λογοθέτης[1], Βασίλειος Σαλαμαλίκης[1], Stefan Wilbert[2], Jan Remund[3], Luis Zarzalejo[4], Yu Xie[5], Bijan Nouri[2], Ευάγγελος Νταβέλης[6], Julien Nou[7], Lennard Visser[8], Manajit Sengupta[5], Mário Pó[9], Remi Chauvin[10], Stephane Grieu[11], Wilfried van Sark[8], Ανδρέας Καζαντζίδης[1*]

[1*] Τμήμα Φυσικής, Εργαστήριο Φυσικής της Ατμόσφαιρας, Πανεπιστήμιο Πατρών
[2] German Aerospace Center (DLR), Institute of Solar Research, Paseo de Almería 73, 04001 Almería, Spain
[3] Meteotest, 3012 Bern, Schweiz
[4] CIEMAT Energy Department–Renewable Energy Division, Av. Complutense 40, 28040 Madrid, Spain
[5] National Renewable Energy Laboratory, 1617 Cole Blvd, Golden, CO 80401, USA
[6] CSEM Center Alpnach, 6055 Alpnach Dorf, Schweiz
[7] PROMES-CNRS, Rambla de la thermodynamique, 66100 Perpignan, France
[8] Copernicus Institute of Sustainable Development, Utrecht University, Netherlands
[9] EKO INSTRUMENTS Europe B.V., 2521 AL Den Haag, Netherlands
[10] PROMECA Ingénierie, 1 rue des Iles, 38420 Domène, France
[11] Université de Perpignan/PROMES Laboratory of Processes, Materials and Solar Energy, Rambla de la Thermodynamique, 66100 Perpignan, France
e-mail: akaza@upatras.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια, έχουν αναπτυχθεί ποικίλες πειραματικές και επιχειρησιακές μέθοδοι με σκοπό την πρόγνωση της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας σε βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα (μικρότερη των 20 λεπτών) και οι οποίες βασίζονται στην παρατήρηση των ατμοσφαιρικών συνθηκών με την χρήση all-sky καμερών. Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα από μια εκστρατεία μετρήσεων, η οποία έλαβε μέρος στα πλαίσια του IEA PVPS Task 16 και έχει ως στόχο την αξιολόγηση των προγνώσεων της ηλιακή ακτινοβολίας με την χρήση διαφόρων all-sky καμερών. Η συγκεκριμένη εκστρατεία περιλαμβάνει τρείς μήνες παρατηρήσεων (από τον Αύγουστο έως τον Δεκέμβριο του 2019) στην Plataforma Solar de Almería, στην Ανδαλουσία της Ισπανίας. Για τους σκοπούς της συγκεκριμένη εκστρατείας έγιναν μετρήσεις από διάφορους τύπους all-sky καμερών σε συνδυασμό με ένα δίκτυο μετρήσεων υψηλής ποιότητας δεδομένων ηλιακής ακτινοβολίας και διαφόρων ατμοσφαιρικών παραμέτρων. Τα δεδομένα των χρονοσειρών ηλιακής ακτινοβολίας από κάθε τύπο all-sky κάμερας συγκρίθηκαν με τις χρονοσειρές επίγειων μετρήσεων αλλά και με δυο τυπικά μοντέλα πρόγνωσης ηλιακής ακτινοβολίας, ώστε να εντοπιστεί που υπερέχει ή μειονεκτεί κάθε διαφορετική προσέγγιση πρόγνωσης καθώς και να παρατηρηθεί που εμφανίζονται οι χαμηλότερες αβεβαιότητες. Ο απώτερος σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση και αξιολόγηση των δυνατοτήτων των διαφορετικών αλγορίθμων πρόγνωσης της ηλιακής ακτινοβολίας, χρησιμοποιώντας μετρήσεις από all-sky κάμερες ενώ παράλληλα επιδιώκεται η ανάδειξη των πλεονεκτημάτων και των εφαρμογών των all-sky καμερών για την ακριβή πρόγνωση της ηλιακής ακτινοβολίας.

Λέξεις Κλειδιά: ηλιακή ακτινοβολία, all-sky κάμερα, πρόγνωση ηλιακής ακτινοβολίας,

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια λαμβάνει χώρα η γρήγορη ανάπτυξη τεχνολογιών που στοχεύουν στην εκμετάλλευση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Συνεπώς, κρίνεται αναγκαία η ανάπτυξη τεχνικών που θα προβλέπουν και θα εντοπίζουν τυχόν αλλαγές κάθε μορφής ανανεώσιμης πηγής (π.χ. ηλιακή ακτινοβολία, άνεμος κλπ.) ώστε να εκτιμηθεί η διαθεσιμότητα και οι τυχόν απότομες διακυμάνσεις της ηλεκτρικής ενέργειας που παρέχεται στο εξωτερικό ηλεκτρικό δίκτυο. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από συστήματα ηλιακής ενέργειας, όπως για παράδειγμα τα φωτοβολταϊκά συστήματα, εμφανίζει σημαντική μεταβλητότητα και συχνά αδυνατεί να καλύψει τις απαιτούμενες ενεργειακές ανάγκες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οικονομικό κόστος, το οποίο είναι σύνηθες σε περιοχές με ελλιπή εκτίμηση της μέσης εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας που μπορεί να τεθεί υπό εκμετάλλευση από τα ηλιακά σύστημα. Συνεπώς, η εκτίμηση και η πρόβλεψη της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στο έδαφος σε βραχυπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα, καθίσταται απαραίτητη.

Η εφαρμογή μετρήσεων παρατήρησης του ουράνιου θόλου από κάμερες ψηφιακής απεικόνισης που στοχεύουν στην πρόγνωση της ηλιακής ακτινοβολίας, έχει αναπτυχθεί αισθητά κατά τις δυο τελευταίες δεκαετίες. Συγκεκριμένα, έχουν πραγματοποιηθεί εργασίες που εστιάζουν σε διαφορετικές κατηγορίες καμερών και αλγορίθμων πρόγνωσης. Οι επίγειες μετρήσεις της ηλιακής ακτινοβολίας σε συνδυασμό με το ποσοστό νεφοκάλυψης, τον τύπο, το ύψος και την ταχύτητα των νεφών από τις κάμερες [1] οδηγούν στην πρόβλεψη της βραχυπρόθεσμης ολικής [2,3,4] και άμεσης [4,5] ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια του εδάφους. Τα αποτελέσματα αυτών των προγνώσεων, έχουν συχνά καλύτερα αποτελέσματα από τα αντίστοιχα τυπικά μοντέλα πρόγνωσης της ηλιακής ακτινοβολίας [3]. Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η σύγκριση των αποτελεσμάτων των προγνώσεων της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας από πέντε διαφορετικούς αλγορίθμους που βασίζονται σε μετρήσεις καμερών με ευρύ οπτικό πεδίο (all-sky) και σε δυο μοντέλα αναφοράς, τα persistence και PSPI [6]. Επίσης, η συγκεκριμένη εργασία, έχει την πρόθεση να μελετήσει και να παρουσιάσει τα δυνητικά πλεονέκτημα και μειονεκτήματα με βάση τις αβεβαιότητες που παρουσιάζονται μεταξύ των αλγορίθμων σε συγκεκριμένες ατμοσφαιρικές συνθήκες (π.χ. ανέφελες, με διάσπαρτη νέφωση κλπ.).

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1. Μέθοδοι πρόγνωσης ηλιακής ακτινοβολίας

Όλοι οι διαφορετικοί τύποι all-sky καμερών τοποθετήθηκαν στην Plataforma Solar de Almería και συγκεκριμένα στον μετεωρολογικό σταθμό METAS (37.09 ºN, 2.36 ºE) (Εικόνα 1), ο οποίος περιλαμβάνει όργανα μέτρησης της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας υψηλής ακρίβειας (πυρανόμετρο), τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση των προγνώσεων.

Εικόνα 1: Μετεωρολογικός σταθμός METAS στην Plataforma Solar de Almería. Πηγή: https://www.dlr.de/sf/en/desktopdefault.aspx/tabid-10224/17488_read-44933/

Συνολικά, εφαρμόσθηκαν πέντε διαφορετικοί αλγόριθμοι πρόγνωσης της ολική ηλιακής ακτινοβολίας. Για κάθε ομάδα που έλαβε μέρος στην εκστρατεία, διατηρήθηκε η ανωνυμία της, καθώς η παρούσα εργασία δεν έχει ως στόχο της, τη διαφήμιση κάποιας συγκεκριμένης μεθοδολογίας ή κάποιου τύπου κάμερας. Από εδώ και στο εξής, ονομάζουμε τις πέντε μεθοδολογίες με την ονομασία All Sky Imagers (ASI) από το 1 έως 5, όπου κάθε αριθμός αντιστοιχεί στον εκάστοτε διαφορετικό αλγόριθμο.

Ειδικότερα, κάθε αλγόριθμος ASI διαφέρει στην μέθοδο παρακολούθησης των νεφών, στον τρόπο υπολογισμού του ύψους των νεφών καθώς και στον τρόπο σύμφωνα με τον οποίο το νέφος επηρεάζει την ολική ηλιακή ακτινοβολία. Εκτός από τους ASI αλγόριθμους, χρησιμοποιήθηκαν ακόμη δυο μοντέλα πρόγνωσης της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας. Το πρώτο μοντέλο, ονομάζεται persistence και εκτιμά την ολική ηλιακή ακτινοβολία με βάση την παρακάτω εξίσωση:

$$GHI_{persistence}(t + \Delta t) = k_t(t) * GHI_{TOA}(t + \Delta t) \quad (1)$$

Η τιμή πρόγνωσης της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας ($GHI_{persistence}$) σε μελλοντικά χρονικά βήματα υπολογίζεται με τον πολλαπλασιασμό του δείκτη αιθριότητας (k_t) και της μελλοντικής τιμής της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στο όριο της ατμόσφαιρας (GHI_{TOA}). Ο k_t υπολογίζεται με την παρακάτω εξίσωση:

$$k_t(t) = \frac{GHI_{measured}(t)}{GHI_{TOA}(t)} \quad (2)$$

Όπου $GHI_{measured}$ είναι η μέτρηση της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας την αρχική χρονική στιγμή που πραγματοποιείται η πρόγνωση και GHI_{TOA} η αντίστοιχη τιμή στο όριο της ατμόσφαιρας. Η τιμή του GHI_{TOA} χρησιμοποιήθηκε λαμβάνοντας υπόψιν το μοντέλο McClear [7].

Το δεύτερο μοντέλο ονομάζεται “Physics-based Smart Persistence model for Intra-hour forecasting of solar radiation (PSPI)” [6] και ουσιαστικά αποτελεί μια βελτιωμένη εκδοχή του μοντέλου persistence καθώς λαμβάνει υπόψιν τις αλλαγές της ανακλαστικότητας των νεφών αλλά και της οριζόντιας μεταφοράς τους σε κάθε μελλοντικό χρονικό βήμα.

Οι προγνώσεις κάθε μεθοδολογίας έχουν χρονικό βήμα ενός λεπτού και χρονικό παράθυρο 20 λεπτών. Επιπρόσθετα, για τους αλγόριθμους ASI1, ASI2, persistence και PSPI το σημείο εκκίνησης της κάθε πρόγνωσης συμπεριλαμβάνει και το λεπτό στο οποίο ξεκινάει η πρόγνωση, ενώ οι υπόλοιποι ASI αλγόριθμοι ξεκινούν την πρόγνωση από το πρώτο λεπτό του κάθε εικοσάλεπτου παραθύρου. Ολοκληρώνοντας, συμπεριλήφθηκαν μόνο οι παρατηρήσεις με ζενίθια γωνία του ήλιου μικρότερη των 70º.

2.2. Κατηγοριοποίηση ατμοσφαιρικών συνθηκών

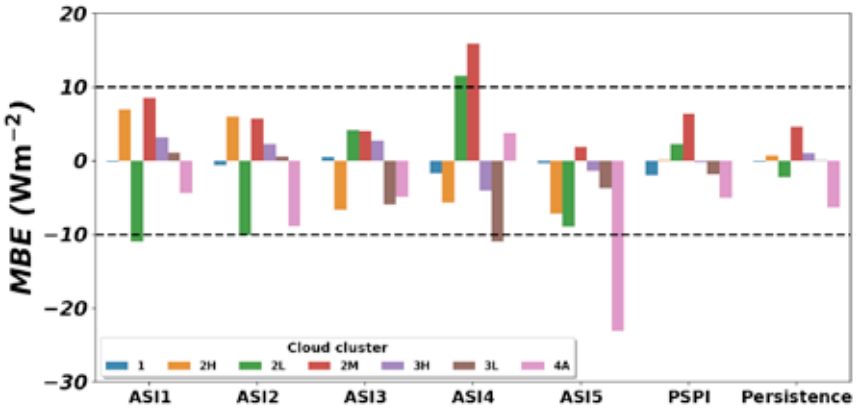
Με σκοπό την μελέτη της διαφορετικής επίδρασης του τύπου νεφοκάλυψης του ουρανού στην πρόγνωση της ηλιακής ακτινοβολίας, έγινε κατηγοριοποίηση του τύπου νεφοκαλύψης με βάση την παρατήρηση των εικόνων του ουράνιου θόλου από τις all-sky κάμερες. Συγκεκριμένα, από την τρίμηνη εκστρατεία, κατηγοριοποιήθηκε το σύνολο των ημερών. Από αυτές επιλέχθηκαν 28 τυπικές ημέρες για τους σκοπούς της στατιστικής ανάλυσης. Οι 7 κατηγορίες νεφοκάλυψης του ουρανού καταγράφονται στον Πίνακα 1. Στην κατηγορία 1 (ανέφελος ουρανός) εντάχθηκαν 7 ημέρες με βάση των διαφορετικές συνθήκες των αιωρούμενων σωματιδίων. Ο αριθμός των ημερών στις υπόλοιπες κατηγορίες διαμορφώθηκε έτσι ώστε να περιλαμβάνουν το 50% των ημερών της κάθε κατηγορίας. Το υπόλοιπο 50% χρησιμοποιήθηκε για την εκπαίδευση των αλγορίθμων πρόγνωσης.

Πίνακας 1: Κατηγοριοποίηση του τύπου νεφοκάλυψης του ουρανού για τις 28 ημέρες της σύγκρισης.

Ακρώνυμο	Συνθήκες νέφωσης ουρανού
1	Ανέφελος ουρανός
2L	Χαμηλά διάσπαρτα νέφη
2M	Υψηλά και χαμηλά διάσπαρτα νέφη
2H	Υψηλά/μεσαία διάσπαρτα νέφη
3L	Χαμηλά διάσπαρτα νέφη την μισή ημέρα και ανέφελες συνθήκες την υπόλοιπη μισή ημέρα
3H	Υψηλά/μεσαία διάσπαρτα νέφη την μισή ημέρα και ανέφελες συνθήκες την υπόλοιπη μισή ημέρα
4A	Νεφελώδης ουρανός την μισή ημέρα και διάσπαρτα νέφη την υπόλοιπη μισή ημέρα

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στην εικόνα 1 παρουσιάζονται οι τιμές του μέσου συστηματικού σφάλματος (Mean Bias Error, MBE) για κάθε αλγόριθμο, συμπεριλαμβανομένων όλων των μονόλεπτες προγνώσεων κάθε ημέρας με τον ίδιο τύπο νεφοκάλυψης. Συγκεκριμένα, η συγκεκριμένη γραφική αναδεικνύει την συνολική εικόνα των σφαλμάτων μεταξύ των αλγόριθμών αλλά και την επίδραση του τύπου νεφοκάλυψης.

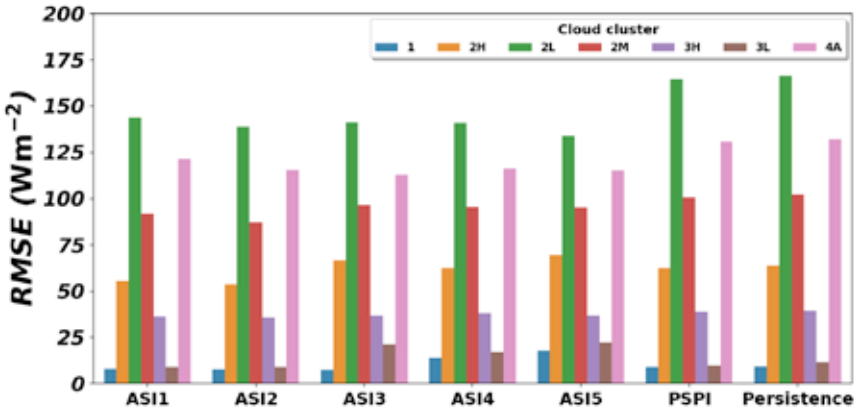


Εικόνα 1: Ραβδογράμματα με τις τιμές του μέσου συστηματικού σφάλματος (Mean Bias Error, MBE) για κάθε αλγόριθμο συναρτήσει του τύπου νεφοκάλυψης. Οι διακεκομμένες παράλληλες γραμμές υποδεικνύουν τα μέσα τυπικά σφάλματα από ένα πρότυπο όργανο μέτρησης της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας (Secondary Standard πυρανόμετρο: ±10 Wm^{-2})

Όπως ήταν αναμενόμενο, σε ανέφελες συνθήκες ουρανού (1, μπλε χρώμα) παρουσιάζονται οι μικρότερες τιμές MBE μεταξύ των αλγορίθμων. Συγκεκριμένα, οι τιμές του MBE κυμαίνονται μεταξύ του εύρους −1.92 έως 0.47 Wm^{-2}. Η μικρότερη τιμή του MBE εμφανίζεται στους αλγόριθμους persistence (−0.07 Wm^{-2}) και ASI1 (−0.10 Wm^{-2}). Σε κάθε τύπο νεφοκάλυψης, ο αλγόριθμός persistence παρουσιάζει μικρότερη τιμή MBE από τους περισσότερους ASI αλγόριθμους. Ειδικότερα, στους τύπους νεφοκάλυψης 2L και 3L ο persistence αλγόριθμος παρουσιάζει τις μικρότερες MBE τιμές από κάθε άλλο αλγόριθμο. Εξαίρεση αποτελεί ο τύπος νεφοκάλυψης 4A, όπου 4/6 των αλγορίθμων (ASI1, ASI3, ASI4 και PSPI), παρουσιάζουν μικρότερες τιμές MBE από τον αλγόριθμο του persistence. Παρόλα αυτά, τουλάχιστον ένας αλγόριθμος παρουσιάζει μικρότερη τιμή MBE από τον αλγόριθμο του persistence στους τύπους νεφοκάλυψης 2M (ASI5), 2H (PSPI) και 3H (PSPI). Ακόμη, είναι αξιοσημείωτο ότι στην πλειοψηφία των αποτελεσμάτων μας, οι τιμές του MBE είναι

μικρότερες από τα μέσα τυπικά σφάλματα ενός πρότυπου οργάνου μέτρησης της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας.

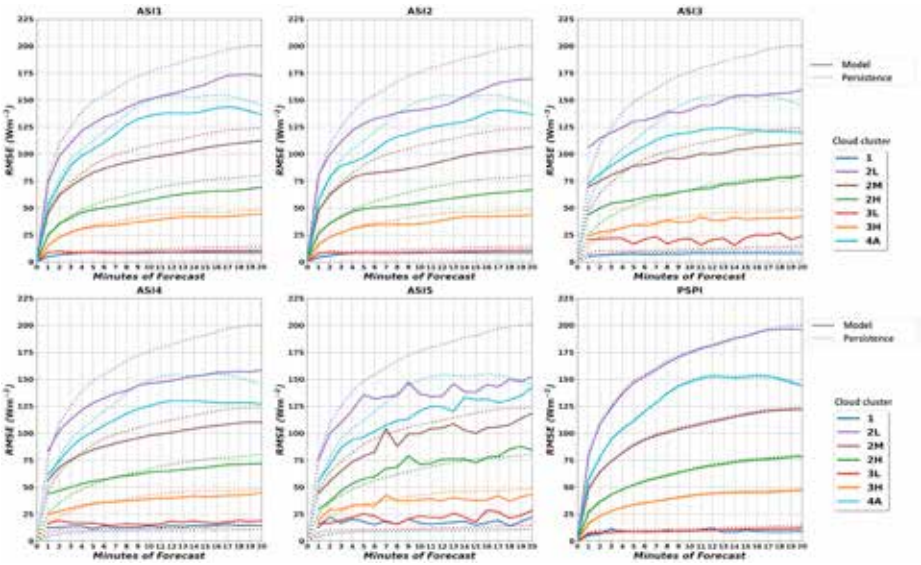
Στην εικόνα 2 παρουσιάζονται οι ίδιοι υπολογισμοί της εικόνας 1 αλλά για την τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (Root Mean Square Error, RMSE). Παρατηρούμε, ότι οι αλγόριθμοι ASI παρουσιάζουν μικρότερες μετρήσεις στην μεγαλύτερη πλειοψηφία τους από ότι τον persistence αλγόριθμο. Σε ανέφελες συνθήκες ουρανού, οι τιμές του RMSE κυμαίνονται μεταξύ του εύρους 7.51 και 17.79 Wm^{-2}. Οι μικρότερες τιμές παρατηρούνται στους αλγόριθμους ASI3 (7.51 Wm^{-2}) και ASI2 (7.84 Wm^{-2}).



Εικόνα 2: Ραβδογράμματα με τις τιμές της τετραγωνικής ρίζας του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (Root Mean Square Error, RMSE) για κάθε αλγόριθμο συναρτήσει του τύπου νεφοκάλυψης.

Στους τύπους νεφοκάλυψης 2L, 2M, 3H και 4A όλοι οι αλγόριθμοι ASI παρουσιάζουν μικρότερες τιμές RMSE έναντι του persistence αλγόριθμου. Το εύρος για κάθε τύπο νεφοκάλυψης καταγράφεται από 134.00 έως 166.36 Wm^{-2} (2L), 87.30 έως 102.15 Wm^{-2} (2M), 36.28 έως 39.65 Wm^{-2} (3H) και 115.20 έως 132.02 Wm^{-2} (4A). Παρατηρούμε λοιπόν ότι ο διαφορετικός τύπος νεφοκάλυψης έχει καθοριστικό ρόλο στην ακρίβεια του κάθε αλγόριθμου και αυτό φαίνεται στην διαφορά των Wm^{-2} στις τιμές του RMSE μεταξύ των τύπων νεφοκάλυψης. Παραδείγματος χάριν, οι μεγαλύτερες τιμές του RMSE παρατηρούνται στον τύπο νεφοκάλυψης 2L (~140.00 Wm^{-2}) και παρουσιάζουν διαφορά ~110 Wm^{-2} σε σχέση με τον τύπο 3L.

Εκτός από την συνολική εικόνα των προγνώσεων ολικής ηλιακής ακτινοβολίας, όπως παρατηρούνται στις εικόνες 1 και 2, είναι άκρως ενδιαφέρουσα η μελέτη της μεταβολής του στατιστικού RMSE, συναρτήσει της αύξησης του χρονικού βήματος (ανά λεπτό). Για τον λόγο αυτό, στην εικόνα 3 παρουσιάζεται η ανά λεπτό μεταβολή του RMSE για κάθε αλγόριθμο σε σύγκριση με τον persistence αλγόριθμο. Όπως περιμέναμε, κατά την αύξηση του χρονικού βήματος, παρατηρείται και αύξηση των τιμών του RMSE για όλους του αλγόριθμους. Οι αλγόριθμοι ASI1 και ASI2 εμφανίζουν μικρότερες τιμές RMSE σε κάθε χρονικό βήμα και τύπο νεφοκάλυψης από τον persistence αλγόριθμο. Συγκεκριμένα, ακόμα και στις κατά κύριο λόγο ανέφελες συνθήκες ουρανού (1 και 3L), οι δυο αλγόριθμοι παρουσιάζουν χαμηλότερες τιμές από τον persistence. Ο αλγόριθμος ASI3, εκτός του τύπου νεφοκάλυψης 3L, παρουσιάζει χαμηλότερες τιμές RMSE από τον persistence αλγόριθμο σε κάθε χρονικό βήμα, ακόμα και στις ανέφελες συνθήκες ουρανού. Ομοίως, εκτός από τον τύπο νεφοκάλυψης 2H, ο αλγόριθμος ASI5 φανερώνει χαμηλότερες τιμές RMSE σε κάθε χρονικό βήμα. Ο αλγόριθμος ASI4 παρουσιάζει χαμηλότερες τιμές RMSE για τους τύπους νεφοκάλυψης 2L και τα 4A, ενώ εμφανίζει υψηλότερες τιμές για τους ανέφελους, κατά κύριο λόγο, τύπους (1 και 3L). Επίσης, στον αλγόριθμος ASI4, στους τύπους νεφοκάλυψης 2M, 2H και 3H, παρατηρούνται χαμηλότερες τιμές RMSE έναντι του persistence αλγόριθμου σε μεγαλύτερα χρονικά βήματα πρόγνωσης.



Εικόνα 3: Σύγκριση της μεταβολής του Root Mean Square Error (RMSE) μεταξύ κάθε αλγόριθμου (συμπαγής γραμμή) και του τυπικού μοντέλου persistence (διακεκομμένες γραμμές), για κάθε χρονικό βήμα του εικοσάλεπτου παραθύρου. Κάθε τύπος νεφοκάλυψης αντιστοιχεί σε διαφορετικό χρώμα.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα τελευταία χρόνια η επιστημονική κοινότητα ασχολείται όλο και περισσότερο με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργεια μέσω της χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Υπάρχουν διάφορα είδη συστημάτων που αξιοποιούν την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία (ηλιοθερμικά, φωτοβολταϊκα) με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αναμφισβήτητα λοιπόν, η πληροφορία που αφορά το ηλιακό δυναμικό που φτάνει σε ένα σύστημα εκμετάλλευσής της είναι αναγκαία. Μια δυνητική λύση για την πρόγνωση της τιμής της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας σε νεφελώδεις και μη συνθήκες ουρανού, αποτελούν αλγόριθμοι που χρησιμοποιούν μετρήσεις από κάμερες ψηφιακής απεικόνισης του ουράνιου θόλου.

Στην παρούσα εργασία λοιπόν, παρουσιάζονται οι βραχυπρόθεσμες (έως 20 λεπτά) προγνώσεις της εισερχόμενης ολικής ηλιακής ακτινοβολίας, οι οποίες συγκρίνονται με πραγματικές τιμές της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας από όργανα αναφοράς. Επιπρόσθετα, πραγματοποιήθηκε σύγκριση των αλγόριθμων ASI με τυπικά μοντέλα πρόγνωσης (persistence και PSPI) της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας. Γενικά, οι αλγόριθμοι ASI παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές MBE συγκριτικά με τον αλγόριθμο persistence. Παρ' όλα αυτά, τουλάχιστον ένας αλγόριθμος παρουσιάζει χαμηλότερη τιμή MBE σε νεφελώδεις συνθήκες ουρανού. Επιπλέον, η μεγαλύτερη πλειοψηφία των αλγόριθμων ASI εμφανίζει χαμηλότερες τιμές RMSE για κάθε χρονικό βήμα του εικοσαλέπτου παραθύρου. Συνεπώς, τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης εργασίας κάνουν νύξη στην επιστημονική κοινότητα ότι η χρήση καμερών, μπορεί να αποτελέσει πολύτιμη πληροφορία και κατ' επέκταση να οδηγήσει σε αξιόπιστες προγνώσεις της εισερχόμενης ολικής ηλιακής ακτινοβολίας.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς ευχαριστούν τις ερευνητικές ομάδες που έλαβαν μέρος στην πειραματική εκστρατεία, καθώς και για την παροχή των δεδομένων των αλγορίθμων.

Η εργασία αυτή υλοποιήθηκε στο πλαίσιο της Πράξης «ΠΑΝελλΑδιΚή υποδομή για τη μΕλέτη της ατμοσφαιρικής σύστασης και κλΙματικής Αλλαγής (ΠΑΝΑΚΕΙΑ)» (MIS 5021516) που εντάσσεται στη Δράση «Ενίσχυση Υποδομών Έρευνας και Καινοτομίας» και χρηματοδοτείται από το Επιχειρησιακό Πρόγραμμα «Ανταγωνιστικότητα, Επιχειρηματικότητα και Καινοτομία» στο πλαίσιο του ΕΣΠΑ 2014-2020, με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Ευρωπαϊκό Ταμείο Περιφερειακής Ανάπτυξης).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Kazantzidis, A., Tzoumanikas, P., Blanc, P., Massip, P., Wilbert, S., Ramirez-Santigosa, L., 2017, “Short-term forecasting based on all-sky cameras” Renewable Energy Forecasting., pp. 153–178.

[2] Chow, C. W., Urquhart, B., Lave, M., Dominguez, A., Kleissl, J., Shields, J., Washom, B., 2011, “Intra-hour forecasting with a total sky imager at the UC San Diego solar energy testbed” Solar Energy., 85(11).

[3] Jiang, J., Lv, Q., Gao, X., 2020, “The Ultra-Short-Term Forecasting of Global Horizonal Irradiance Based on Total Sky Images” Remote Sens., 12, 3671.

[4] Kuhn, P., Nouri, B., Wilbert, S., Prahl, C., Kozonek, N., Schmidt, T., Yasser, Z., Ramirez, L., Zarzalejo, L., Meyer, A., Vuilleumier, L., Heinemann, D., Blanc, P., Pitz-Paal, R., 2017 “Validation of an all-skyi mager based nowcasting system for industrial PV plants” Prog. Photovoltaics Res. Appl, 26, pp. 608–621.

[5] Chu, Y., Li, M., Pedro, H. T., Coimbra, C. F., 2015, “Real-time prediction intervals for intra-hour DNI forecasts” Renewable Energy., 83, pp. 234–244.

[6] Kumler, A., Xie, Y., Zhang, Y., 2019, “A Physics-based Smart Persistence model for Intrahour forecasting of solar radiation (PSPI) using GHI measurements and a cloud retrieval technique” Solar Energy., 177, 494–500.

[7] Lefèvre, M., Oumbe, A., Blanc, P., Espinar, B., Gschwind, B., Qu, Z., Wald, L., Schroedter-Homscheidt, M., Hoyer-Klick, C., Arola, A., Benedetti, A., Kaiser, J. W., and Morcrette, J.-J. 2013, “McClear: a new model estimating downwelling solar radiation at ground level in clear-sky conditions” Atmos. Meas. Tech., 6, pp. 2403–2418.

ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΓΙΑ ΣΤΑΘΜΟΥΣ ΑΠΕ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΡΟΗΓΜΕΝΩΝ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Κ. Γκαράκης[1*], Δ. Ανδρωνάς[2]

[1*] Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Αγ. Σπυρίδωνος 17, 12210 Αιγάλεω, e-mail: ape@uniwa.gr
[2] Αφοί Ανδρωνά – ConWx ApS

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Για τον χώρο των ΑΠΕ, η έναρξη λειτουργίας του Target Model σηματοδοτεί την περίοδο μετάβασης από την «παθητική» συμμετοχή στην αγορά, στην «ενεργητική» συμμετοχή, από την “ανωριμότητα” της σταθερής τιμής πώλησης στην “ωριμότητα” της μεταβλητής τιμολόγησης και της συνεχούς πρόβλεψης της ενεργειακής παραγωγής. Οι ΑΠΕ με το Target Model, αποκτούν «υποχρεώσεις εξισορρόπησης», δηλαδή υποχρεούνται να δηλώνουν το ωριαίο πρόγραμμα παραγωγής τους στην Αγορά Επόμενης Ημέρας (Day Ahead Market - DAM), να υπολογίζουν τις αποκλίσεις από την πραγματική τους παραγωγή και να βελτιώνουν τις δηλώσεις τους στην Ενδοημερήσια αγορά (Intraday Market - IDM). Οι εναπομείνασες αποκλίσεις εντέλει συμμετέχουν στη τελική αγορά εξισορρόπησης.

Η συμμετοχή έργων ΑΠΕ στην αγορά ενέργειας μπορεί να γίνει είτε απευθείας, είτε μέσω των Φορέων Σωρευτικής Εκπροσώπησης ΑΠΕ (ΦοΣΕ) που έχουν ιδρυθεί για το σκοπό αυτό, εκμεταλλευόμενοι τη δυνατότητα συνολικής δήλωσης παραγωγής ενός χαρτοφυλακίου έργων ΑΠΕ διαφορετικής τεχνολογίας και ευρύτερης γεωγραφικής διασποράς προσφέροντας μεγαλύτερη ακρίβεια στη συνολική ωριαία πρόβλεψη παραγωγής των έργων εντός του χαρτοφυλακίου τους και μειώνοντας έτσι τον κίνδυνο αποκλίσεων (κατά συνέπεια και των αντίστοιχων χρεώσεων).

Η πρόβλεψη παραγωγής ενέργειας βασίζεται σε αριθμητική είσοδο πολλαπλών καιρικών μοντέλων. Η εκτεταμένη εμπειρία ανάπτυξης και λειτουργίας αριθμητικών καιρικών μοντέλων σε συνδυασμό με την πρόσβαση σε υψηλής ανάλυσης δεδομένων καιρού αποτελούν το βασικό κλειδί για την παραγωγή προγνώσεων ακριβείας. Για την ελαχιστοποίηση του συνολικού σφάλματος πρόγνωσης, την διασφάλιση της διαθεσιμότητας των προγνώσεων και την ακριβή περιγραφή πιθανών εναλλακτικών καιρικών εξελίξεων, συνίσταται η χρήση τουλάχιστον τριών (3) μετεωρολογικών μοντέλων.

Η εργασία αφορά συγκριτική αξιολόγηση προβλέψεων και πραγματικών παραγωγών για πληθώρα φωτοβολταϊκών και αιολικών έργων σε όλη την επικράτεια στα πλαίσια παροχής προγνώσεων σε ιδιώτες παραγωγούς ΑΠΕ καθώς και Φορέων Σωρευτικής Εκπροσώπησης (ΦοΣΕ) για χρονικό διάστημα μεγαλύτερο του ενός πλήρους έτους.

Εξάγονται οι συντελεστές αξιολόγησης NMAE, MAPE, NRMSE, NBIAS για έξι (6) αιολικά πάρκα και τέσσερα (4) φωτοβολταϊκά πάρκα ανά την Ελλάδα για διάρκεια ενός έτους.

Η μελετητική ομάδα αξιολογεί τα αποτελέσματα, ερευνά περιορισμούς και αιτίες διαφοροποίησης και παρέχει χρήσιμα συμπεράσματα για τη βελτίωση των παρεχομένων προγνώσεων ενεργειακής παραγωγής.

Λέξεις Κλειδιά: καιρικές συνθήκες, target model, μοντελοποίηση, πρόγνωση.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) έχουν διεισδύσει σε μεγάλο βαθμό στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Η μεταβλητότητα και η τυχαιότητα, όμως, που τις χαρακτηρίζουν αποτελούν τροχοπέδη για την εξέλιξη και την πλήρη ενσωμάτωσή τους στο σύστημα ενέργειας. Για την αντιστάθμιση αυτής της μεταβλητότητας απαιτούνται εργαλεία πρόβλεψης της ισχύος τους (κυριότερα αιολικά και φωτοβολταϊκά συστήματα) για τις επόμενες ώρες, έτσι ώστε να καθίσταται δυνατή η διαχείριση και το εμπόριο της ενέργειας. Αυτά τα λειτουργικά εργαλεία πρόβλεψης, θα πρέπει να ανταποκρίνονται στις ανάγκες των τελικών χρηστών, όπως είναι οι ανεξάρτητοι παραγωγοί ενέργειας, οι αγοραστές της και οι διαχειριστές του συστήματος μεταφοράς (TSO).

Ο διαχειριστής του συστήματος μεταφοράς (TSO) είναι υπεύθυνος για την ασφαλή λειτουργία του δικτύου: κάθε στιγμή η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια θα πρέπει να ισούται με την ενέργεια που καταναλώνεται. Ο διαχειριστής παρέχει υπηρεσίες, όπως ο εν λειτουργία (online) σχεδιασμός και η ρύθμιση του συστήματος. Παρέχει πρόβλεψη της ζήτησης του φορτίου για μια περιοχή του συστήματος σε σχέση με το σύνολο της ενέργειας που αναμένεται να παραχθεί, ενώ επίσης υπολογίζει και τις αναμενόμενες απώλειες. Λαμβάνει αποφάσεις που αφορούν την ποσότητα και την σειρά με την οποία θα εισέλθει η ανανεώσιμη ενέργεια στο Σύστημα την επόμενη μέρα. Για αυτό το λόγο, τα μέσα παραγωγής της ενέργειας ορίζονται εκ των προτέρων, ώστε να ανταποκρίνονται στο προφίλ της προβλεπόμενης καταναλισκόμενης ενέργειας [1].

Οι προβλέψεις της ζήτησης φορτίου είναι συνήθως σχετικά αρκετά ακριβείς, παρ' όλα αυτά, η έρευνα γύρω από τις μεθόδους πρόβλεψης της ζήτησης συνεχίζεται, καθώς η περαιτέρω μείωση του σφάλματος θα παρέχει σημαντική εξοικονόμηση στις μονάδες που διευθύνουν μεγάλα διασυνδεδεμένα συστήματα ενέργειας. Για να πραγματοποιηθεί ο προγραμματισμός της επόμενης ημέρας, ο διαχειριστής μπορεί να λάβει υπόψη δικά του μέσα παραγωγής ενέργειας, εάν υπάρχουν, ή/και να αγοράσει ενέργεια από ανεξάρτητους παραγωγούς ενέργειας. Πρέπει, επομένως, ανάμεσα στους υποψήφιους παραγωγούς, να εντοπίσει εκείνους που θα του παρέχουν την ενέργεια που απαιτεί η ζήτηση και φυσικά σε χαμηλό κόστος. Είναι εμφανές ότι οι παραγωγοί αιολικών και φ/β σταθμών δεν είναι σε θέση να καταθέσουν τις προτάσεις τους χωρίς να γνωρίζουν εκ των προτέρων την εκτιμώμενη ενέργεια που θα παράγουν. Για αυτό το λόγο, γίνεται επιτακτική η ανάγκη για χρήση προηγμένων εργαλείων πρόβλεψης της παραγωγής [1][2].

Οι καιρικές συνθήκες διαδραμάτιζαν ανέκαθεν καθοριστικό ρόλο στον ενεργειακό τομέα διαμορφώνοντας το επίπεδο της ζήτησης αλλά και τη δυνατότητα παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ.Η μετεωρολογική πρόβλεψη, που παραδοσιακά είχε έντονη σημασία, αποτελεί πλέον απαραίτητη προϋπόθεση για τις εταιρείες που δραστηριοποιούνται στην σύγχρονη ενεργειακή αγορά.

Εξειδικευμένες εταιρείες δραστηριοποιούνται στο χώρο των μετεωρολογικών προβλέψεων, έχοντας εξελίξει την ακρίβεια των προβλέψεων που παρέχουν και εμπλουτίσει τις υπηρεσίες τους παρέχοντας τη δυνατότητα πρόβλεψης παραγωγής για σταθμούς Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Παραγωγοί ΑΠΕ, Διαχειριστές Δικτύων και Φορείς Σωρευτικής Εκπροσώπησης σταθμών ΑΠΕ (ΦοΣΕ) έχουν πλέον τη δυνατότητα επιλογής μετεωρολογικής πρόβλεψης και πρόγνωσης παραγωγής ο κάθε ένας ανάλογα με τις ανάγκες του. Η παροχή προβλέψεων αποτελεί επίσης απαραίτητο εργαλείο για τις εταιρείες διαχείρισης χαρτοφυλακίων έργων αλλά και παροχής συντήρησης και λειτουργίας σταθμών ΑΠΕ, οι οποίες λαμβάνοντας εξειδικευμένες ανά έργο μετεωρολογικές προβλέψεις έχουν το πλεονέκτημα του ορθότερου προγραμματισμού των εργασιών συντήρησης συμβάλλοντας στη βελτιστοποίηση της παραγωγής.

Για ιδιοκτήτες αιολικών και φ/β σταθμών, διαχειριστές χαρτοφυλακίου, διαχειριστές δικτύου και Συστήματος, εταιρείες εμπορίου (trading), οι ακριβείς προβλέψεις παραγωγής προσφέρουν ανταγωνιστικό πλεονέκτημα και τις πληροφορίες που διευκολύνουν τις εργασίες τους. Είναι σημαντικό οι προβλέψεις να πραγματοποιούνται με την ευκρίνεια και την κλίμακα που ικανοποιεί συγκεκριμένες επιχειρησιακές ανάγκες.

Τα παγκόσμια καιρικά μοντέλα βελτιώνονται με υψηλής ανάλυσης, εσωτερικά μοντέλα, εξασφαλίζοντας ακριβείς προβλέψεις για οποιοδήποτε έργο ΑΠΕ, σε οποιαδήποτε τοποθεσία στον κόσμο.

Υπάρχουν πολλοί κίνδυνοι στο εμπόριο ενέργειας σε μια πλήρως ανοιχτή αγορά: i. Διακυμάνσεις παραγωγής μεγάλης κλίμακας, ii. Μεταβολές από έτος σε έτος στην αιολική και ηλιακή ακτινοβολία iii Επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, iv. Μεγάλη διακύμανση της προβλεψιμότητας (εποχή και

τοποθεσία), v. Θερμικές επιδράσεις (ακτογραμμή ή ορεινή περιοχή), vi. Διακοπή λειτουργίας εγκαταστάσεων (μη προγραμματισμένη), vii. Πλεόνασμα παραγωγής, viii. Υψηλότερα κόστη εξισορρόπησης, ix. Χαμηλές ή αρνητικές τιμές ενέργειας, x. Κυρώσεις xi. Εκδηλώσεις καιρικών αιχμών - προβληματικών τόσο για αυτούς που εξισορροπούν το Σύστημα όσο και για εκείνους που ασχολούνται με την εμπορία ηλεκτρικής ενέργειας και xii. Συνέπειες που σχετίζονται με τον καιρό (καταιγίδες, παγετός, χιόνι και μεταφορά σκόνης).

2. ΣΚΟΠΟΣ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται συγκριτική αξιολόγηση προβλέψεων και πραγματικών παραγωγών για πληθώρα φωτοβολταϊκών και αιολικών έργων σε όλη την επικράτεια στα πλαίσια παροχής προγνώσεων σε ιδιώτες παραγωγούς ΑΠΕ καθώς και ΦοΣΕ για χρονικό διάστημα μεγαλύτερο του ενός πλήρους έτους.

Εξάγονται οι συντελεστές αξιολόγησης NMAE, MAPE, NRMSE, NBIAS για έξι (6) αιολικά πάρκα και τέσσερα (4) φωτοβολταϊκά πάρκα ανά την Ελλάδα για διάρκεια ενός έτους.

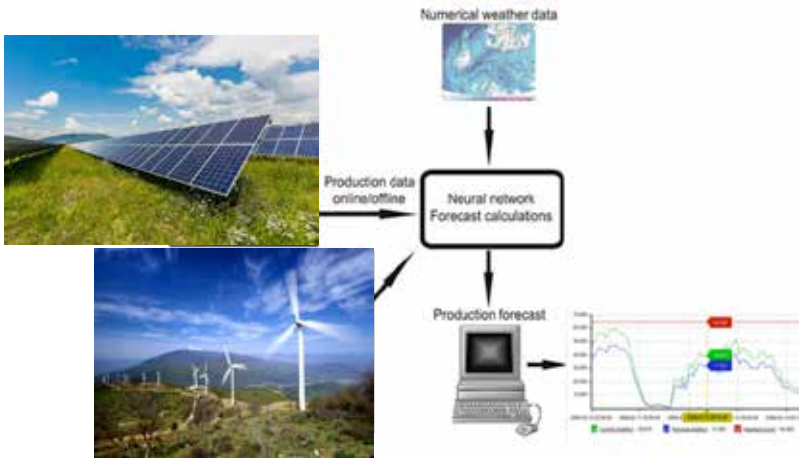
Η μελετητική ομάδα αξιολογεί τα αποτελέσματα, ερευνά περιορισμούς και αιτίες διαφοροποίησης και παρέχει χρήσιμα συμπεράσματα για τη βελτίωση των παρεχομένων προγνώσεων ενεργειακής παραγωγής.

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

3.1. Μετεωρολογικά μοντέλα

Η υπηρεσία πρόβλεψης παραγωγής ενέργειας βασίζεται σε αριθμητική είσοδο καιρού πολλαπλών μοντέλων. Η ConWx έχει εκτεταμένη εμπειρία με την εκτέλεση αριθμητικών μοντέλων καιρού in-house και πρόσβαση σε ακριβή και αξιόπιστα δεδομένα καιρού είναι το κύριο κλειδί για την παραγωγή ακριβών προβλέψεων. Η ConWx χρησιμοποιεί πάντα τουλάχιστον τρεις (3) μετεωρολογικά μοντέλα για να μειώσει το συνολικό σφάλμα πρόβλεψης, να διασφαλίσει τη διαθεσιμότητα των προβλέψεων και να περιγράψει πιθανές εναλλακτικές καιρικές εξελίξεις. Τα λειτουργικά μοντέλα της ConWx προβλέπουν τα καιρικά φαινόμενα σε ανάλυση 1-10 χλμ [3].

Τα μεσοκλιματικά μετεωρολογικά μοντέλα καιρού που χρησιμοποιεί η ConWx είναι : α) IRIE και β) WRF. Η ConWx χρησιμοποιεί οριακές συνθήκες στα μοντέλα της τόσο από το GFS όσο και από το ECMWF. Οι προβλέψεις παραγωγής ενέργειας παράγονται για κάθε μεμονωμένο μοντέλο καιρού και η κύρια πρόβλεψη είναι ο σταθμισμένος μέσος όρος των τριών.



Σχήμα 1 : Σχηματική απεικόνιση πρόβλεψης ενεργειακής παραγωγής.

3.2. Μετεωρολογικά δεδομένα

Τα τρία μοντέλα καιρού που επιλέγονται συνήθως για ένα έργο αιολικής ενέργειας είναι: α. GFS-IRIE, β.EC-IRIE, γ.ECMWF. Η χρήση των μεσοκλιματικών δεδομένων IRIE εξασφαλίζει μια καλή περιγραφή των τοπικών καιρικών φαινομένων, ενώ η χρήση δύο διαφορετικών παγκόσμιων μοντέλων επιτρέπει την παρατήρηση διαφορών στις καιρικές εξελίξεις μεγάλης κλίμακας, οι οποίες καθίστανται ολοένα και πιο σημαντικές όσο περισσότερο αυξάνει ο ορίζοντας των προβλέψεων [3].

Για κάθε σημείο πρόβλεψης (σταθμό παραγωγής ενέργειας) πραγματοποιείται μια συγκεκριμένη επιλογή μοντέλου καιρού, καθώς κάθε μοντέλο καιρού έχει πλεονεκτήματα σε συγκεκριμένα εδάφη.

3.3. Περιγραφή συστήματος πρόβλεψης

3.3.1. Εκτέλεση μοντέλου καιρού

Το σύστημα κατεβάζει δεδομένα GFS 4 φορές την ημέρα και δεδομένα ECMWF 2 φορές την ημέρα. Καθένα από τα παγκόσμια μοντέλα θα οδηγήσει ένα περιφερειακό μοντέλο IRIE, το οποίο παρέχει 6 ενημερώσεις μεσοκλιματικού μοντέλου ανά ημέρα. Επιπλέον, τα δεδομένα πρόβλεψης ECMWF χρησιμοποιούνται απευθείας δίνοντας συνολικά 8 διαθέσιμες εκτελέσεις (τρεξίματα) ανά ημέρα.

3.3.2. Παρεμβολή στο σημείο του σταθμού παραγωγής ηλ. ενέργειας

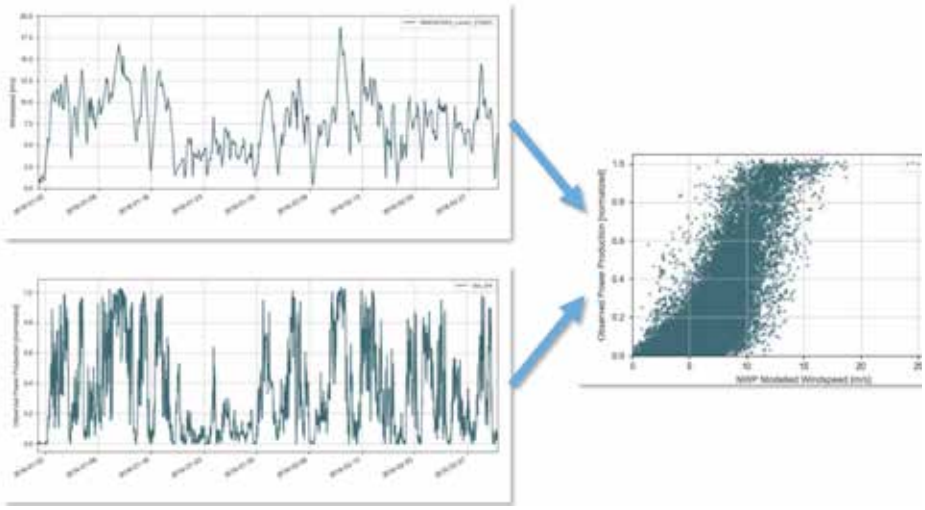
Το σύστημα θα λάβει μια λίστα με όλες τις ενεργές τοποθεσίες στη βάση δεδομένων και θα εκτελέσει παρεμβολή από τα σημεία πλέγματος στις συντεταγμένες των τοποθεσιών των έργων. Η παρεμβολή πραγματοποιείται με τον σταθμισμένο μέσο όρο των τιμών πρόβλεψης από τα 4 πλησιέστερα σημεία του πλέγματος. Η στάθμιση βασίζεται στις αποστάσεις από το σημείο της τοποθεσίας έως τα πλησιέστερα σημεία πλέγματος, δηλαδή διμερή παρεμβολή.

3.3.3. Ποιότητα πρόβλεψης

Τα πρωτογενή μετεωρολογικά δεδομένα δημιουργούνται σε ωριαία ανάλυση, αλλά μπορούν να προσαρμοστούν ώστε να ταιριάζουν με τις απαιτήσεις της αγοράς. Τα δεδομένα ECMWF είναι διαθέσιμα σε ανάλυση 3 ωρών, αλλά μπορούν να παρεμβληθούν σε οποιαδήποτε απαιτούμενη χρονική ανάλυση.

3.3.4. Μεθοδολογία πρόβλεψης

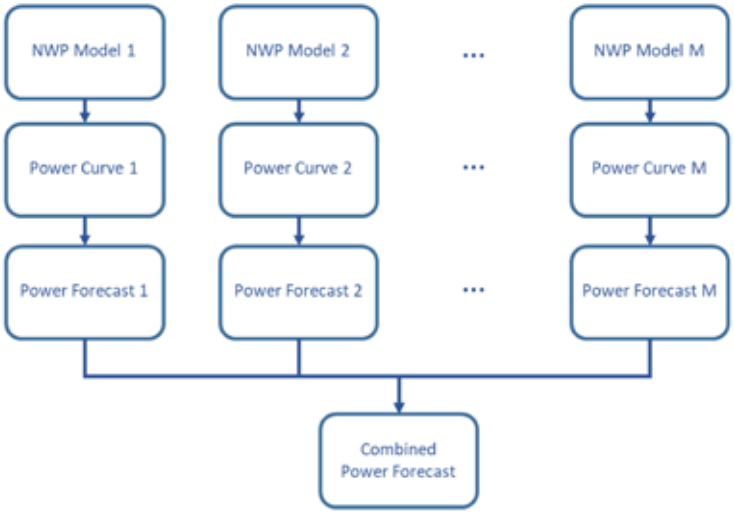
Η προσέγγιση της παραγωγής καμπυλών ισχύος για μια συγκεκριμένη μονάδα παραγωγής ενέργειας βασίζεται σε ιστορικά δεδομένα παραγωγής ενέργειας και σε δεδομένα ιστορικών προβλέψεων καιρού. Σχετίζοντας τα ιστορικά πραγματικά στοιχεία παραγωγής με τις σχετικές παραμέτρους ιστορικών προβλέψεων, δημιουργούνται εμπειρικές καμπύλες ισχύος. Οι εμπειρικές καμπύλες ισχύος μπορούν να δημιουργηθούν για συγκεκριμένους τύπους καιρού ή εποχές. Για την παραγωγή έργων αιολικής ενέργειας, η διεύθυνση του ανέμου είναι ο κύριος παράγοντας που πρέπει να εξαχθεί. Για τις προβλέψεις παραγωγής αιολικής ενέργειας, κάθε ιστορικό χρονικό βήμα, συμπεριλαμβανομένου της μοντελοποιημένης ταχύτητας ανέμου και της μετρούμενης ισχύος, αντιστοιχίζεται και ενεργοποιείται στον αντίστοιχο τομέα διεύθυνσης, οπότε για κάθε συνδυασμό ταχύτητας και διεύθυνσης ανέμου, υπάρχει διαθέσιμη αντίστοιχη τιμή παραγωγής. Όσο περισσότερα ιστορικά δεδομένα παραγωγής είναι διαθέσιμα, τόσο περισσότερες καιρικές παράμετροι μπορούν να ληφθούν υπόψη και ως εκ τούτου μπορούν να παραχθούν πιο συγκεκριμένες καμπύλες ισχύος. Για την ηλιακή ενέργεια, η συνολική διαδικασία είναι η ίδια, αν και η ηλιακή ακτινοβολία χρησιμοποιείται ως κύρια παράμετρος καιρού που σχετίζεται με την παραγωγή ενέργειας. Η περιγραφόμενη προσέγγιση περιορίζει τα εγγενή συστηματικά σφάλματα στα μετεωρολογικά δεδομένα του μοντέλου.



Σχήμα 2 : Ιστορικά δεδομένα πρόβλεψης ταχύτητας ανέμου και αποδιδόμενης ισχύος συνδυαζόμενα να εξάγουν μια εμπειρική καμπύλη ισχύος.

Όταν πραγματοποιείται «εκπαίδευση» των καμπυλών ισχύος, ένα μέρος των διαθέσιμων ιστορικών δεδομένων παραγωγής δεν χρησιμοποιείται, αφού χρησιμεύει ως επαλήθευση για τη τελική πρόβλεψη.

Η «εκπαίδευση» του καιρού ως προς την ισχύ γίνεται για κάθε ένα από τα μεμονωμένα μοντέλα καιρού, οπότε για κάθε μονάδα παραγωγής ενέργειας που έχει εγκατασταθεί στο σύστημα, παράγονται 3 προβλέψεις παραγωγής ενέργειας. Οι 3 προβλέψεις σταθμίζονται βάσει ιστορικών επιδόσεων στο συγκεκριμένο σταθμό παραγωγής ενέργειας για να σχηματίσουν μια βελτιστοποιημένη πρόβλεψη.



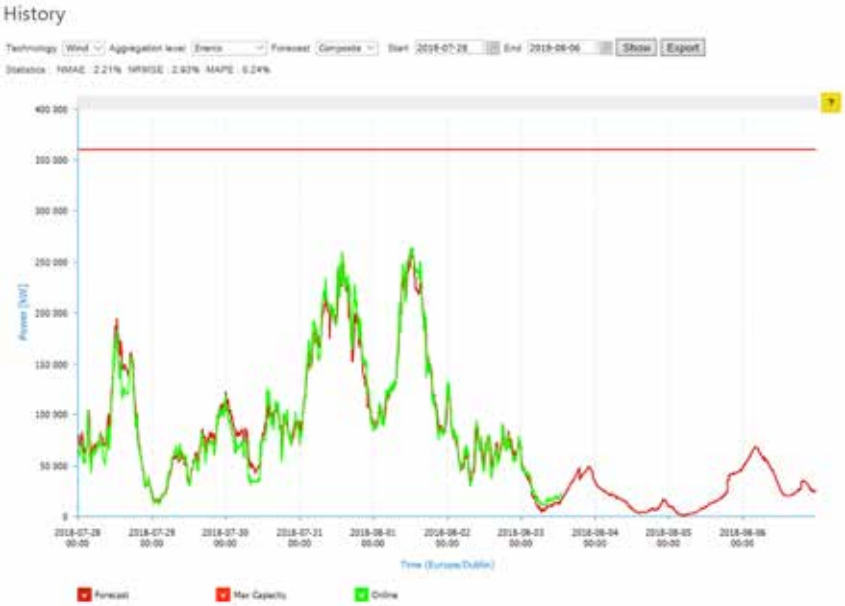
Σχήμα 3 : Διάγραμμα ροής παραγωγής πρόβλεψης ισχύος.

Για υψηλής συγκέντρωσης χαρτοφυλάκια, όπως προβλέψεις ολόκληρης της χώρας ή ζώνης προσφοράς, η βελτιστοποίηση εφαρμόζεται για να επιτευχθεί υψηλότερη ακρίβεια πρόβλεψης από ό,τι

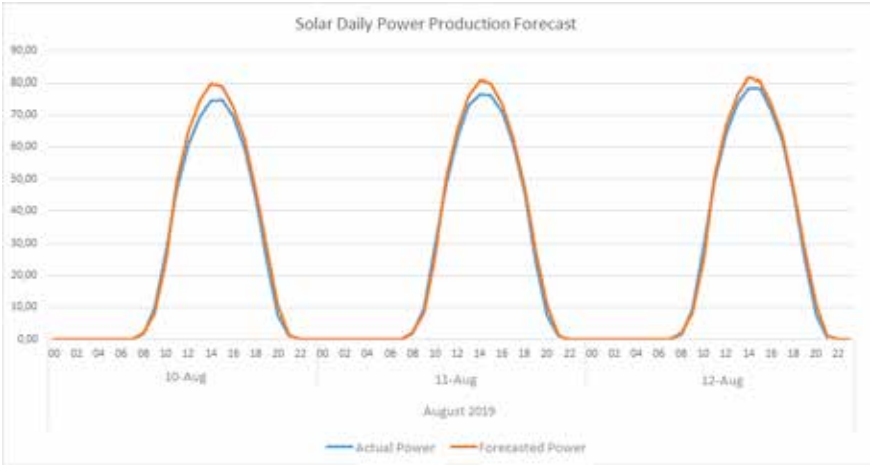
είναι δυνατό, απλώς συνοψίζοντας την παραγωγή από κάθε μεμονωμένο σταθμό παραγωγής ενέργειας.

Κατά τη διάρκεια της επιχειρησιακής πρόβλεψης, το σύστημα μπορεί να λάβει υπόψη πραγματικά δεδομένα παραγωγής, είτε σε επίπεδο σταθμού είτε σε συγκεντρωτικό επίπεδο. Τα πραγματικά αυτά δεδομένα χρησιμοποιούνται για την προσαρμογή των πρώτων ωρών της πρόβλεψης. Η βέλτιστη μέθοδος βαθμονόμησης του μοντέλου πρόβλεψης καθορίζεται με προσομοίωση και ανάλυση των ιστορικών δεδομένων παραγωγής.

Στα σχήματα 4 και 5 παρουσιάζονται ενδεικτικές προγνώσεις παραγωγής αιολικού και φωτοβολταϊκού σταθμού.



Σχήμα 4: Ενδεικτική πρόγνωση παραγωγής και σύγκριση με τη πραγματικότητα για αιολικό πάρκο.



Σχήμα 5: Ενδεικτική πρόγνωση παραγωγής και σύγκριση με τη πραγματικότητα για φωτοβολταϊκό σταθμό.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Έχουν εξαχθεί οι συντελεστές αξιολόγησης NMAE, MAPE, NRMSE, NBIAS για έξι (6) αιολικά πάρκα και τέσσερα (4) φωτοβολταϊκά πάρκα ανά την Ελλάδα για διάρκεια ενός έτους, στα πλαίσια παροχής προγνώσεων σε ιδιώτες παραγωγούς ΑΠΕ καθώς και Φορέων Σωρευτικής Εκπροσώπησης (ΦοΣΕ). Στον πίνακα 2 παρουσιάζονται οι συντελεστές αξιολόγησης.

Πίνακας 1 : Συντελεστές Αξιολόγησης.

Ρίζα Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος (RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{N}\left(P_t - \overline{P_t}\right)^2}{N}} \quad (1)$$

Κανονικοποιημένη Ρίζα Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος (NRMSE)

$$NRMSE = \frac{1}{P_{inst}} \cdot RMSE \quad (2)$$

Μέσο Απόλυτο Σφάλμα (MAE)

$$MAE = \frac{1}{N} \cdot \sum_{t=1}^{N}\left|P_t - \overline{P_t}\right| \quad (3)$$

Κανονικοποιημένο Μέσο Απόλυτο Σφάλμα (NMAE)

$$NMAE = \frac{1}{P_{inst}} \cdot MAE \quad (4)$$

Μέσο Απόλυτο Ποσοστιαίο Σφάλμα (MAPE)

$$MAPE = \frac{1}{n}\sum_{t=1}^{N}\left|\frac{P_t - \overline{P_t}}{P_t}\right| \quad (5)$$

Κανονικοποιημένο Συστηματικό Σφάλμα (NBIAS)

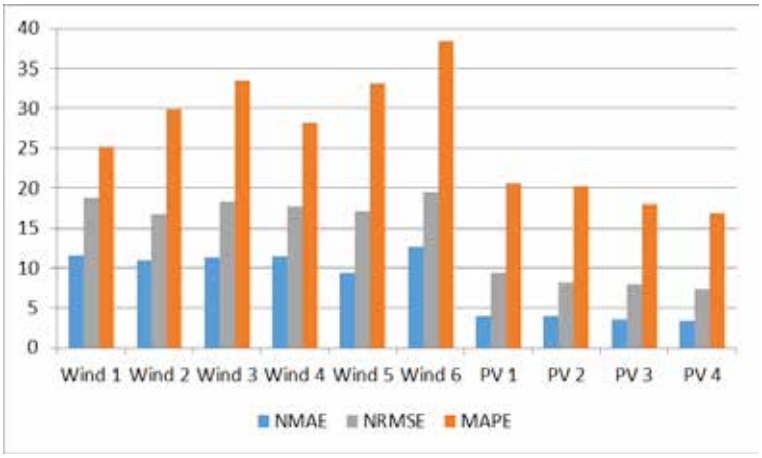
$$NBIAS = \frac{\sum_{t=1}^{n} P_t - \overline{P_t}}{P_{inst}} \quad (6)$$

Όπου: P_{inst} η εγκατεστημένη ισχύς, P_t η παρατηρηθείσα παραγωγή, $\overline{P_t}$ η προβλεπόμενη παραγωγή.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον κάτωθι πίνακα.

Πίνακας 2: Αποτελέσματα Αξιολόγησης

Έργο	Ισχύς (MW)	NMAE	MAPE	NRMSE	NBIAS
Αιολικό 1	28,8	11,56	25,17	18,73	-0,173
Αιολικό 2	30,6	10,98	29,85	16,71	-0,278
Αιολικό 3	9,2	11,4	33,5	18,29	-0,003
Αιολικό 4	22,2	11,54	28,18	17,72	-0,079
Αιολικό 5	9,6	9,44	33,09	17,03	-0,293
Αιολικό 6	36,0	12,67	38,45	19,56	0,06
Φ/Β 1	10,0	3,98	20,59	9,45	0,525
Φ/Β 2	2,4	3,9	20,17	8,25	0,08
Φ/Β 3	1,9	3,52	18,04	7,93	0,04
Φ/Β 4	0,1	3,42	16,79	7,33	0,09



Σχήμα 6: Παρουσίαση των τριών δεικτών αξιολόγησης για τα έξι αιολικά πάρκα και τα τέσσερα φ/β πάρκα.

Το Μέσο Απόλυτο Σφάλμα εκφράζει την μέση τιμή των απόλυτων αποκλίσεων των προβλεπόμενων τιμών ανεξάρτητο από θετικές (υπερεκτίμηση) ή αρνητικές (υποεκτίμηση) τιμές του σφάλματος. Μετρά το σφάλμα της πρόβλεψης στις ίδιες μονάδες με τις τιμές της χρονοσειράς βασιζόμενο στην υπόθεση ότι η σοβαρότητα του σφάλματος σχετίζεται γραμμικά με το μέγεθος του σφάλματος.

Το Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα μετρά τη διασπορά της κατανομής των σφαλμάτων πρόβλεψης, παρόμοια με το Μέσο Απόλυτο Σφάλμα, κάνοντας περισσότερο αισθητή την ύπαρξη προβλέψεων που απέχουν αρκετά από τις αντίστοιχες πραγματικές τιμές καθώς μεγεθύνει τις μεγάλες αποκλίσεις λόγω του τετραγώνου, στην οποία υψώνεται κάθε απόκλιση. Χρησιμοποιείται συχνότερα από το Μέσο Απόλυτο Σφάλμα για την αξιολόγηση της μεθόδου πρόβλεψης. Η θετική τιμή της τετραγωνικής του ρίζας ονομάζεται Ρίζα Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος RMSE.

Το Μέσο Απόλυτο Ποσοστιαίο Σφάλμα εκφράζει το άθροισμα των απόλυτων τιμών των σφαλμάτων της πρόβλεψης προς τις αντίστοιχες πραγματικές τιμές μελετώντας το πώς συμπεριφέρεται η απόλυτη τιμή του σφάλματος της πρόβλεψης σε σχέση με την πραγματική παραγωγή. Αποτυπώνει την απόκλιση των προβλέψεων ως ποσοστό της πραγματικής τιμής και αποτελεί ένα χρήσιμο κριτήριο όταν για την αξιολόγηση της μεθόδου έχει σημασία το μέγεθος της μεταβλητής πρόβλεψης. Χρησιμοποιείται επίσης για τη σύγκριση της ακρίβειας μιας ή περισσοτέρων μεθόδων πρόβλεψης και για περισσότερες από μια χρονολογικές σειρές.

Το Συστηματικό Σφάλμα δείχνει την απόκλιση της πρόγνωσης σε σχέση την πραγματική παραγωγή λαμβάνοντας θετικές (υπερεκτίμηση) ή αρνητικές (υποεκτίμηση) τιμές.

Οι συντελεστές NMAE στα αιολικά έργα είναι της τάξης 9,4-12,7 ενώ αισθητά χαμηλότεροι είναι στα φωτοβολταϊκά έργα (3,4-4,0), γεγονός που επαληθεύει την πολυπλοκότητα των παραμέτρων λειτουργείας των αιολικών σε σχέση με τα φωτοβολταϊκά και την αντίστοιχη πρόγνωση της παραγωγής τους.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το γενικό συμπέρασμα είναι η παροχή αξιοσημείωτων αποτελεσμάτων που απορρέουν από την μεθοδολογία για τη δημιουργία ενός συγκεκριμένου καιρικού μοντέλου για κάθε σημείο πρόβλεψης (σταθμός παραγωγής ενέργειας), καθώς κάθε μοντέλο καιρού έχει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα σε σχέση με την μορφολογία της εκάστοτε περιοχής που είναι αισθητά κυρίως στην πρόγνωση παραγωγής αιολικών σταθμών παραγωγής ενέργειας.

Παρ' όλα αυτά, αναπτύσσουμε συνεχώς προηγμένα μοντέλα για να επιτύχουμε υψηλότερο επίπεδο πρόγνωσης καιρού και, κατά συνέπεια, προβλεπόμενη ακρίβεια παραγωγής ενέργειας. Αυτό παρέχει μια πλεονεκτική θέση ειδικά στη λειτουργία της ενδοημερήσιας αγοράς.

Ένα τελευταίο σημείο που χρήζει βελτίωσης είναι η αδιάλειπτη ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των συστημάτων παρακολούθησης των σταθμών παραγωγής ενέργειας και των παρόχων προβλέψεων, καθώς και η έγκαιρη ενημέρωση που παρέχεται από την ομάδα λειτουργίας κάθε σταθμού παραγωγής ενέργειας επί των προγραμματισμένων ή εκτάκτων διακοπών της λειτουργίας τους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] P. Pinson, C. Chevallier, G. Kariniotakis, 'Trading wind generation with short-term probabilistic forecasts of wind power', IEEE Trans. on Power Systems 22 (3), pp. 1148-1156, 2007

[2] Debra Lew and Michael Milligan, National Renewable Energy Laboratory, Gary Jordan and Richard Piwko, GE Energy, "The Value of Wind Power Forecasting"

[3] ConWx internal documentation, 2019. Copenhagen

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΑΥΤΟΝΟΜΟ ΕΥΡΩΠΑΙΚΟ ΠΑΡΑΤΗΡΗΤΗΡΙΟ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ ΣΤΟ ΝΗΣΙ ΤΩΝ ΑΝΤΙΚΥΘΗΡΩΝ

Ι.Κ. Καλδέλλης[1*], Εμ. Πλειώνης[2,4], Αιμ. Κονδύλη[3], Αθ. Δήμου[2], Δ. Ζαφειράκης[1]

[1]Εργαστήριο Ήπιων Μορφών Ενέργειας & Προστασίας Περιβάλλοντος,
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής
[2]Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών
[3]Εργαστήριο Αριστοποίησης Παραγωγικών Συστημάτων, Παν. Δυτικής Αττικής
[4]Αριστοτέλειο Παν/μιο Θεσσαλονίκης
Τ.Θ. 41046, Αθήνα 12201, jkald@uniwa.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το νησί των Αντικυθήρων είναι ένα μοναδικό σε ομορφιά μικρό νησί στο σημείο που συναντώνται το Ιόνιο, το Μυρτώο και το Αιγαίο πέλαγος, ανάμεσα στην Πελοπόννησο και στην Κρήτη. Σύμφωνα με τα πιο πρόσφατα δεδομένα, ο μόνιμος πληθυσμός των Αντικυθήρων δεν ξεπερνά τους τριάντα κατοίκους, ενώ η συνολική ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας κυμαίνεται από 250 έως 300 MWh_e, ανάλογα με την τουριστική κίνηση του καλοκαιριού. Αντίστοιχα, το φορτίο αιχμής του νησιού, που εμφανίζεται τους θερινούς μήνες, δεν ξεπερνά τα 100-120 kW_p και μέχρι σήμερα καλύπτεται από τον υφιστάμενο Τοπικό Σταθμό Παραγωγής, ο οποίος λειτουργεί με ελαφρύ πετρέλαιο ενώ το μέσο ολικό κόστος ηλεκτροπαραγωγής ξεπερνά τα 1400 €/MWh_e.

Πρόσφατα, λόγω της γεωγραφικής του θέσης, το νησί των Αντικυθήρων επιλέχθηκε από την Ελληνική Πολιτεία και την Ευρωπαϊκή Τράπεζα Επενδύσεων για να φιλοξενήσει το παρατηρητήριο Γεωεπιστημών και Κλιματικής Αλλαγής (ΠΑΓΓΑΙΑ), που θα υλοποιήσει το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών (ΕΑΑ). Η συστηματική λειτουργία του ΠΑΓΓΑΙΑ αναμένεται να υπερ-τριπλασιάσει την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας του τοπικού ηλεκτρικού δικτύου (η αναμενόμενη ενεργειακή κατανάλωση του Παρατηρητηρίου αναμένεται σε πλήρη ανάπτυξη να ξεπεράσει τις 800MWh_e ετησίως). Παράλληλα, για λόγους περιβαλλοντικής συμβατότητας και περιορισμού του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της όλης εγκατάστασης, δεν είναι επιθυμητή η χρήση συμβατικών καυσίμων (πετρελαίου) ώστε να μην επιβαρύνεται η όλη ερευνητική προσπάθεια με πρόσθετες τοπικές εκπομπές ρύπων και αερίων του θερμοκηπίου. Άλλωστε η επιλογή του νησιού των Αντικυθήρων έγινε μεταξύ των άλλων καθώς έχει την ελάχιστη ανθρωπογενή επιρροή.

Για το σκοπό αυτό, το ΕΑΑ που σχεδιάζει την υλοποίηση της υποδομής του ΠΑΓΓΑΙΑ σε συνεργασία με την τοπική Δημοτική Αρχή (Δήμος Κυθήρων) και την ερευνητική ομάδα του Εργαστηρίου Ήπιων Μορφών Ενέργειας και Προστασίας Περιβάλλοντος (ΗΜΕ & ΠΡΟΠΕ) του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής διερευνούν τις προοπτικές ανάπτυξης Υβριδικού Ενεργειακού Σταθμού στο νησί, που θα βασίζεται στην αξιοποίηση του διαθέσιμου ηλιακού δυναμικού και τη χρήση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας, περιορίζοντας στον ελάχιστο δυνατό βαθμό τη λειτουργία του υφιστάμενου πετρελαϊκού τοπικού σταθμού παραγωγής (ΤΣΠ).

Στο πλαίσιο αυτό, η παρούσα εργασία επιχειρεί μια ρεαλιστική διαστασιολόγηση του προτεινόμενου υβριδικού σταθμού, αξιοποιώντας και την πρόσφατη εμπειρία από το ευρωπαϊκό έργο TILOS-Horizon 2020. Για την ενίσχυση της αξιοπιστίας της προτεινόμενης λύσης παρουσιάζεται σειρά αποτελεσμάτων ετήσιας προσομοίωσης λειτουργίας της εγκατάστασης για ένα ευρύ φάσμα αριθμητικών τιμών των βασικών παραμέτρων του υβριδικού σταθμού. Από την αξιολόγηση των προτεινόμενων λύσεων προκύπτει ότι είναι δυνατή η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών ολόκληρου του νησιού με την ελάχιστη περιβαλλοντική επιβάρυνση, ενώ ενισχύεται η αξιοπιστία του τοπικού ηλεκτρικού δικτύου και συρρικνώνεται το αντίστοιχο κόστος ηλεκτροπαραγωγής κατά περίπου μια τάξη μεγέθους.

Λέξεις Κλειδιά: *Αέρια Θερμοκηπίου, Θερμικός Σταθμός, Φωτοβολταϊκά Πλαίσια, Αποθήκευση Ενέργειας*

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Το Νησί των Αντικυθήρων

Σχήμα 1: Το νησί των Αντικυθήρων

Σχήμα 2: Ποταμός, το λιμάνι των Αντικυθήρων

Το νησί των Αντικυθήρων είναι ένα μοναδικό σε ομορφιά μικρό νησί με έκταση περίπου 20 km^2 και μήκος ακτών περίπου 24km, Σχήμα 1. Τα Αντικύθηρα βρίσκονται στο σημείο που συναντώνται το Ιόνιο, το Μυρτώο και το Αιγαίο πέλαγος, σε αρκετά μεγάλη απόσταση ανάμεσα στην Πελοπόννησο και στην Κρήτη. Σύμφωνα με τα πιο πρόσφατα [1] δεδομένα, ο μόνιμος πληθυσμός των Αντικυθήρων δεν ξεπερνά τους τριάντα κατοίκους, ενώ κατά τη θερινή περίοδο υπερβαίνει τους 200 επισκέπτες. Το έδαφος του είναι ημιορεινό με υψηλότερη κορυφή στα περίπου 380 μέτρα, ενώ διαθέτει προς το παρόν μερικώς επαρκή υδάτινα αποθέματα, με πιθανότητα εμφάνισης προβλημάτων στο μέλλον για κάλυψη επισκεπτών. Στο νησί βρίσκονται περίπου 15 μικροί οικισμοί, από τους οποίους σημαντικότεροι είναι ο Ποταμός όπου βρίσκεται και το μοναδικό λιμάνι του νησιού (Σχήμα 2) και τα Χαρχαλιανά στην περιοχή των οποίων σχεδιάζεται η δημιουργία του παρατηρητηρίου Γεωεπιστημών και Κλιματικής Αλλαγής (ΠΑΓΓΑΙΑ). Οι οικισμοί του νησιού συνδέονται μεταξύ τους με αρκετά καλό οδικό δίκτυο ενώ το νησί διαθέτει και ελικοδρόμιο. Αναφορικά με την κάλυψη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στο νησί λειτουργεί μικρός αυτόνομος πετρελαϊκός σταθμός εγκατεστημένης ισχύος περίπου 350kW, δεδομένου ότι το νησί δεν είναι διασυνδεδεμένο με το ηπειρωτικό ηλεκτρικό δίκτυο.

1.2 Ευρωπαϊκό Παρατηρητήριο Γεωεπιστημών και Κλιματικής Αλλαγής (ΠΑΓΓΑΙΑ)

Το νησί των Αντικυθήρων λόγω της γεωγραφικής του θέσης έχει επιλεχθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση για να φιλοξενήσει το **Ευρωπαϊκό Παρατηρητήριο Γεωεπιστημών και Κλιματικής Αλλαγής** που θα υλοποιήσει το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών [2]. Η συστηματική λειτουργία του Ευρωπαϊκού Παρατηρητηρίου Κλιματικής Αλλαγής αναμένεται να αυξήσει σημαντικά (υπερ-τριπλασιάσει) την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας του τοπικού ηλεκτρικού δικτύου, αφενός λόγω του απαραίτητου μετρητικού εξοπλισμού αφετέρου λόγω των νέων κτηριακών εγκαταστάσεων του Παρατηρητηρίου στα Πέρα Χαρχαλιανά. Επιπλέον, δεδομένης της ευαισθησίας αλλά και της υψηλής αξίας του προς εγκατάσταση εξοπλισμού υπάρχει σημαντική ανησυχία κατά πόσο το ασθενές τοπικό αυτόνομο ηλεκτρικό δίκτυο έχει την ικανότητα να υποστηρίξει αποτελεσματικά και με ασφάλεια την πλήρη λειτουργία του Παρατηρητηρίου.

Τέλος, δεδομένης της περιβαλλοντικής σημασίας του έργου είναι προφανές ότι για λόγους περιβαλλοντικής συμβατότητας και περιορισμού του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της όλης εγκατάστασης δεν είναι επιθυμητή η χρήση συμβατικών καυσίμων (πετρελαίου) για την ενεργειακή κάλυψη της λειτουργίας του Παρατηρητηρίου και για λόγους συμβολικούς αλλά και ουσιαστικούς, ώστε να μην επιβαρύνεται η όλη ερευνητική προσπάθεια με τοπικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου [3]. Άλλωστε η επιλογή του νησιού των Αντικυθήρων για την υλοποίηση της Παρατηρητηρίου έγινε μεταξύ των άλλων επειδή παρουσιάζει την ελάχιστη ανθρωπογενή επιρροή.

Στο πλαίσιο αυτό και μετά από πολύμηνη συνεργασία με την ερευνητική ομάδα σχεδιασμού-υλοποίησης του (ΠΑΓΓΑΙΑ) αλλά και με την τοπική Δημοτική Αρχή αποφασίστηκε η αξιοποίηση της ερευνητικής-

επιστημονικής εμπειρίας της ερευνητικής ομάδας του TILOS-Horizon 2020, του Εργαστηρίου Ήπιων Μορφών Ενέργειας και Προστασίας Περιβάλλοντος (ΗΜΕ & ΠΡΟΠΕ) του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής (Πα.Δ.Α.) [4] για τη διερεύνηση ανάπτυξης Αυτόνομου Υβριδικού Ενεργειακού Σταθμού στο νησί, που θα βασίζεται αρχικά στην αξιοποίηση του διαθέσιμου τοπικού ανανεώσιμου δυναμικού (π.χ. της διαθέσιμης ηλιακής ενέργειας) και τη χρήση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας [5,6], σε συνεργασία με το υφιστάμενο τοπικό σταθμό παραγωγής (ΤΣΠ). Η προτεινόμενη λύση στην πλήρη της μορφή περιλαμβάνει και την εφεδρεία του υφιστάμενου μικρού θερμικού-πετρελαϊκού σταθμού, ο οποίος θα τίθεται σε λειτουργία μόνο σε έκτακτες περιπτώσεις, παρέχοντας με τον τρόπο αυτό συνολική ενεργειακή λύση και αξιοποιώντας τον υπό σχεδιασμό υβριδικό σταθμό ΑΠΕ.

2. Η ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΩΝ ΑΝΤΙΚΥΘΗΡΩΝ

2.1 Το Ηλεκτρικό Σύστημα Αντικυθήρων-Παρούσα Κατάσταση

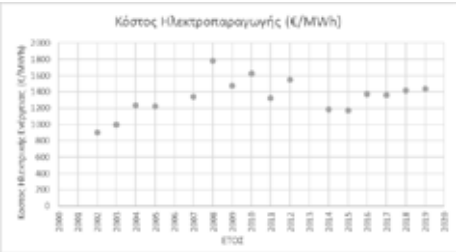
Όπως ήδη αναφέρθηκε οι ανάγκες κάλυψης ηλεκτρικής ζήτησης στο νησί των Αντικυθήρων καλύπτεται από τον υφιστάμενο ΤΣΠ, ο οποίος (βάσει των διαθέσιμων στοιχείων από τη ΔΕΗ ΑΕ) [7] στηρίζεται στη λειτουργία τεσσάρων θερμικών μονάδων 90kW η καθεμία (τρεις μηχανές Hyundai και μία μηχανή Fiat-IVECO), οι οποίες καταναλώνουν ελαφρύ πετρέλαιο diesel και εξασφαλίζουν επάρκεια εγκατεστημένης ισχύος υπό τις παρούσες συνθήκες.

Σχήμα 3: Ηλεκτρική κατανάλωση Αντικυθήρων

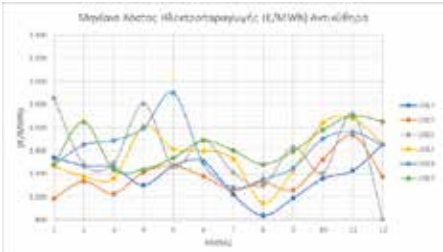
Σχήμα 4: Μέγιστο Ηλεκτρικό φορτίο Αντικυθήρων

Αν και η απουσία συστήματος απομακρυσμένης καταγραφής (SCADA) δεν παρέχει τις απαιτούμενες πληροφορίες παραγωγής/κατανάλωσης, η συνολική ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας κυμαίνεται από 250 έως 300 MWh_e, ανάλογα με την τουριστική κίνηση του καλοκαιριού (Σχήμα 3), περίπου εξαπλάσια με αυτήν του 1990. Αξίζει να σημειωθεί ότι η εν λόγω κατανάλωση προκύπτει κυρίως από οικιακές καταναλώσεις, δημοτικό φωτισμό και μονοψήφιο αριθμό μικρών τουριστικών καταλυμάτων [8].

Αντίστοιχα, το φορτίο αιχμής του νησιού [8], που εμφανίζεται τους θερινούς μήνες, δεν ξεπερνά (Σχήμα 4) τα 100-120 kW_p και μέχρι σήμερα καλύπτεται από τον υφιστάμενο Τοπικό Σταθμό Παραγωγής, ο οποίος λειτουργεί με ελαφρύ πετρέλαιο. Παράλληλα, η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, όπως και στα περισσότερα ελληνικά νησιά, μεταβάλλεται σημαντικά στη διάρκεια του έτους και με βάση τα χειρόγραφα στοιχεία του ΤΣΠ εμφανίζει μέγιστες τιμές στη διάρκεια των θερινών μηνών, ενώ κατά τους υπόλοιπους μήνες το μέσο φορτίο του δικτύου κυμαίνεται γύρω στα 20kW.



Σχήμα 5: Διαχρονικό Κόστος ηλεκτροπαραγωγής Αντικυθήρων



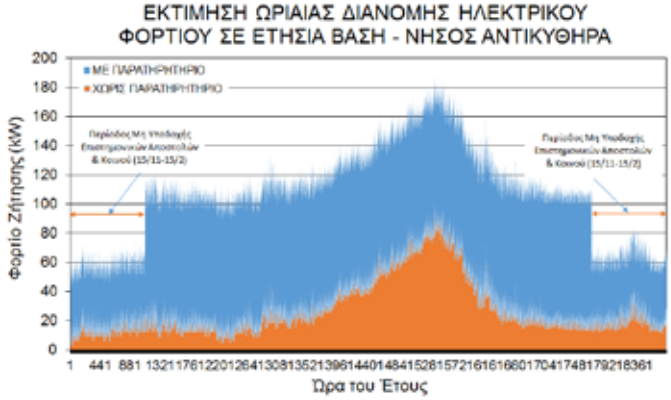
Σχήμα 6: Μηνιαία μεταβολή κόστους ηλεκτροπαραγωγής Αντικυθήρων

Σε συμφωνία με τα ανωτέρω, το μέσο ολικό κόστος ηλεκτροπαραγωγής εμφανίζεται ιδιαίτερα υψηλό, ίσως το υψηλότερο στον ελλαδικό (ή και ευρωπαϊκό) χώρο και κυμαίνεται σύμφωνα με τα επίσημα

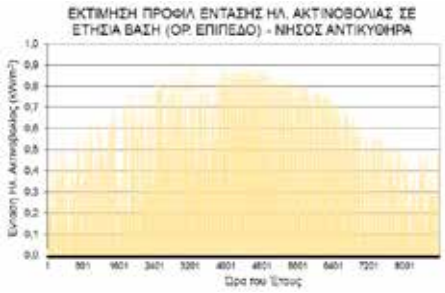
στοιχεία (Σχήμα 5) στα 1400€/MWh$_e$. Ιδιαίτερες μεταβολές εμφανίζει (Σχήμα 6) και το μηνιαίο κόστος ηλεκτροπαραγωγής, όπως αποδίδεται από τον ΔΕΔΔΗΕ, που όμως πιθανόν να προκύπτουν και από προβλήματα καταγραφής των δεδομένων. Σε κάθε περίπτωση όμως είναι προφανές ότι το κόστος ηλεκτροπαραγωγής στον ΤΣΠ ξεπερνά τα 1000€/MWh$_e$, σημαντικό μέρος του οποίου συνδέεται με το μεταβλητό κόστος λειτουργίας του τοπικού σταθμού.

2.2 Η Νέα Ενεργειακή Κατάσταση και το Διαθέσιμο Δυναμικό ΑΠΕ

Από την ανάλυση των διαθέσιμων δεδομένων προκύπτει ότι η ενεργειακή κατανάλωση του Παρατηρητηρίου αναμένεται σε πλήρη ανάπτυξη να ξεπεράσει τις 800MWh$_e$ ετησίως. Στην κατανάλωση αυτή περιλαμβάνεται τόσο η λειτουργία των νέων κτηριακών εγκαταστάσεων όσο και η λειτουργία του ερευνητικού εξοπλισμού. Συνεπώς, η συνολικά αναμενόμενη κατανάλωση των Αντικυθήρων με τη λειτουργία του ευρωπαϊκού Παρατηρητηρίου θα ξεπεράσει τις 1000MWh$_e$, βλέπε και Σχήμα 7. Πράγματι στο Σχήμα 7 εμφανίζεται η αναμενόμενη αύξηση της κατανάλωσης λόγω λειτουργίας του νεοσύστατου Παρατηρητηρίου, το οποίο θα παρουσιάζει κατά κανόνα (μαζί με τις κτηριακές εγκαταστάσεις) σταθερή ζήτηση ισχύος 80-120kW. Αντίστοιχα, η εκτιμώμενη νέα αιχμή ζήτησης θα προσεγγίζει τα 200-260kW$_p$, θέτοντας σε ευθεία αμφισβήτηση την επάρκεια ισχύος του υφιστάμενου εξοπλισμού των 4x90kW.



Σχήμα 7: Ετήσια διανομή ηλεκτρικού φορτίου στο σύστημα των Αντικυθήρων με συνεκτίμηση της λειτουργίας του ΠΑΓΓΑΙΑ (ενδεικτική διανομή φορτίου)



Σχήμα 8: Ηλιακό δυναμικό στην ευρύτερη περιοχή των Αντικυθήρων

Σχήμα 9: Υφιστάμενο, εκτός λειτουργίας, Φ/Β πάρκο της ΔΕΗ στο νησί των Αντικυθήρων

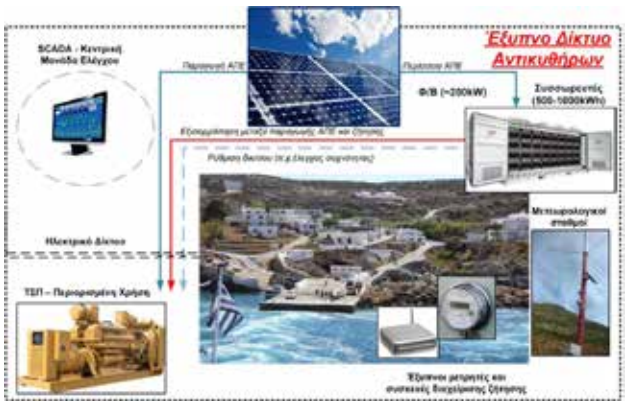
Από την ανάλυση των διαθέσιμων δεδομένων προκύπτει ότι το νησί των Αντικυθήρων, λόγω της θέσης και της τοπογραφίας του, διαθέτει υψηλό αιολικό και κυματικό δυναμικό, καθώς και υψηλό ηλιακό δυναμικό [9]. Από την άλλη πλευρά όμως, η θέση των Αντικυθήρων συνδέεται με τα μεταναστευτικά ρεύματα των αποδημητικών πτηνών, γεγονός που καθιστά προβληματική την εγκατάσταση αιολικών μηχανών στο νησί [10]. Την άποψη αυτή ενισχύει και η απομακρυσμένη θέση του νησιού όπως και το έντονο κυματικό δυναμικό, καθώς βρίσκεται σε μακρινή απόσταση από μεγαλύτερα νησιά ή την ηπειρωτική χώρα, καθιστώντας την πρόσβαση εξειδικευμένου τεχνικού προσωπικού αρκετά προβληματική. Αντιθέτως, το κυματικό δυναμικό του νησιού αποτελεί μια ενδιαφέρουσα και χαμηλής

περιβαλλοντικής όχλησης προοπτική, που όμως στην παρούσα φάση δεν ενδείκνυται λόγω της πειραματικής φάσης της συγκεκριμένης τεχνολογίας [11]. Συνεπώς, υπό τις παρούσες συνθήκες η πλέον πρόσφορη τεχνολογία που αξιοποιεί το υφιστάμενο ηλιακό δυναμικό (Σχήμα 8) αλλά και δεν έχει ιδιαίτερες απαιτήσεις συντήρησης είναι η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών (Φ/Β) πλαισίων. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται και από την πρώιμη εγκατάσταση αυτόνομου Φ/Β σταθμού από τη ΔΕΗ στο πρώτο μισό της δεκαετίας του '80, τμήματα του οποίου διασώζονται έως και σήμερα, Σχήμα 9.

3. ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΑΥΤΟΝΟΜΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΛΥΣΗ

Λαμβάνοντας υπόψιν την πιεστική ανάγκη για κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του Παρατηρητηρίου χωρίς την περαιτέρω χρήση συμβατικών και συνεπώς ρυπογόνων καυσίμων προτείνεται και διερευνώνται οι προοπτικές ανάπτυξης ενός Υβριδικού Ενεργειακού Σταθμού στο νησί, που θα βασίζεται κυρίως στην αξιοποίηση του διαθέσιμου ηλιακού δυναμικού και τη χρήση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας, περιορίζοντας στον ελάχιστο δυνατό βαθμό τη λειτουργία του υφιστάμενου πετρελαϊκού τοπικού σταθμού παραγωγής (ΤΣΠ). Επιπλέον, με την ευκαιρία της δημιουργίας του ευρωπαϊκού Παρατηρητηρίου προτείνεται η νέα ενεργειακή υποδομή να διαθέτει τα κατάλληλα λειτουργικά χαρακτηριστικά ώστε να καλύπτει ταυτόχρονα όχι μόνο τις ανάγκες της ερευνητικής λειτουργίας του Παρατηρητηρίου αλλά και τις ανάγκες της τοπικής κοινωνίας προσφέροντας πολλαπλά οφέλη:

- ✓ Καθαρή Ενεργειακή Παραγωγή από ΑΠΕ
- ✓ Μικρό περιβαλλοντικό αποτύπωμα και επεκτάσιμα χαρακτηριστικά
- ✓ Σημαντικά Μειωμένο Κόστος Ηλεκτροπαραγωγής
- ✓ Συμβολή στην υλοποίηση μια εμβληματικής Ευρωπαϊκής Ερευνητικής Προσπάθειας
- ✓ Αυξημένη Ασφάλεια-Αξιοπιστία λόγω της ύπαρξης των Συστημάτων Αποθήκευσης αλλά και της διατήρησης σε εφεδρεία του ΤΣΠ.



Σχήμα 10: Προτεινόμενο Έξυπνο Δίκτυο Αντικυθήρων.
(Τα εμφανιζόμενα μεγέθη στο παραπάνω σχήμα είναι εντελώς ενδεικτικά)

Στο πλαίσιο αυτό προτείνεται η υλοποίηση της εγκατάστασης του Σχήματος 10, βάσει του οποίου:

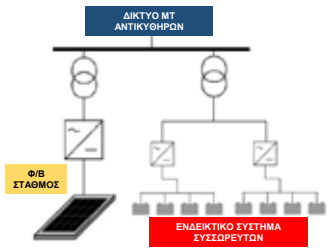
i) Σχεδιάζεται η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πλαισίων με κατάλληλη αποθήκευση ενέργειας και σύστημα ηλεκτρονικών ισχύος, ενώ σε επόμενο χρονικό διάστημα είναι πιθανή και η συμμετοχή άλλων μικρών πιλοτικών εγκαταστάσεων ΑΠΕ. [12]
ii) Επιλέγεται οι υφιστάμενες σχετικά παλαιές θερμικές μονάδες να παραμείνουν σε εφεδρεία, με περιορισμένη λειτουργία μόνο σε έκτακτες περιπτώσεις, συνεπώς με ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης καυσίμου άρα και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. [3,13]

iii) Υποστηρίζεται η δημιουργία συστήματος απομακρυσμένης καταγραφής και πλήρης έλεγχος της λειτουργίας του Υβριδικού Σταθμού, με προοπτική η δημιουργία σύγχρονου συστήματος διαχείρισης ζήτησης και ταυτόχρονης βελτιστοποίησης λειτουργίας του Υβριδικού Σταθμού, μέσα από την ανάπτυξη ενός έξυπνου δικτύου με σκοπό τη μέγιστη συνεισφορά ΑΠΕ και μηδενισμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. [14]

3.1 Περιγραφή Προτεινόμενου Υβριδικού Σταθμού (ΥΒΣ)

Μετά από μια πρώτη αξιολόγηση των δεδομένων, ο προτεινόμενος ΥΒΣ αποτελείται από τα υποσυστήματα του Πίνακα Ι.

- Φ/Β πάρκο συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 200-500kW$_p$ (εξετάζεται εύρος από 0-500kW για τις ανάγκες της παραμετρικής ανάλυσης) για αξιοποίηση του υψηλού ηλιακού δυναμικού της ευρύτερης περιοχής, με σκοπό την επίτευξη παραγωγής ενέργειας χαμηλού κόστους και ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων στο οικοσύστημα του νησιού.
- Σύγχρονους συσσωρευτές τύπου Li-ion με δυνατότητα βαθέων εκφορτίσεων και αυξημένης ενεργειακής απόδοσης, συνολικής χωρητικότητας 500kWh-2000kWh (εξετάζεται εύρος από 0-2000kWh για τις ανάγκες της παραμετρικής ανάλυσης). Το δε μέγιστο δυνατό βάθος εκφόρτισης των συσσωρευτών ανέρχεται σε 80%, ενώ η ενεργειακή απόδοση υπό ονομαστική λειτουργία κυμαίνεται στα επίπεδα του 85-90% (ο συνολικός βαθμός απόδοσης σε επίπεδο προσομοίωσης ελήφθη ίσος με 76%, λαμβάνοντας υπόψη και τις απώλειες στους ηλεκτρονικούς μετατροπείς).
- Τους απαραίτητους ηλεκτρονικούς μετατροπείς για τη διασύνδεση του φωτοβολταϊκού πάρκου και μετατροπείς αμφίδρομης λειτουργίας για τη λειτουργία και διασύνδεση των συσσωρευτών του σταθμού.
- Το σύστημα απομακρυσμένου ελέγχου και παρακολούθησης λειτουργίας (SCADA) του ΥΒΣ, καθώς και το Σύστημα Ενεργειακής Διαχείρισης του ΥΒΣ.



Σχήμα 11: Σχηματική απεικόνιση ΥΒΣ

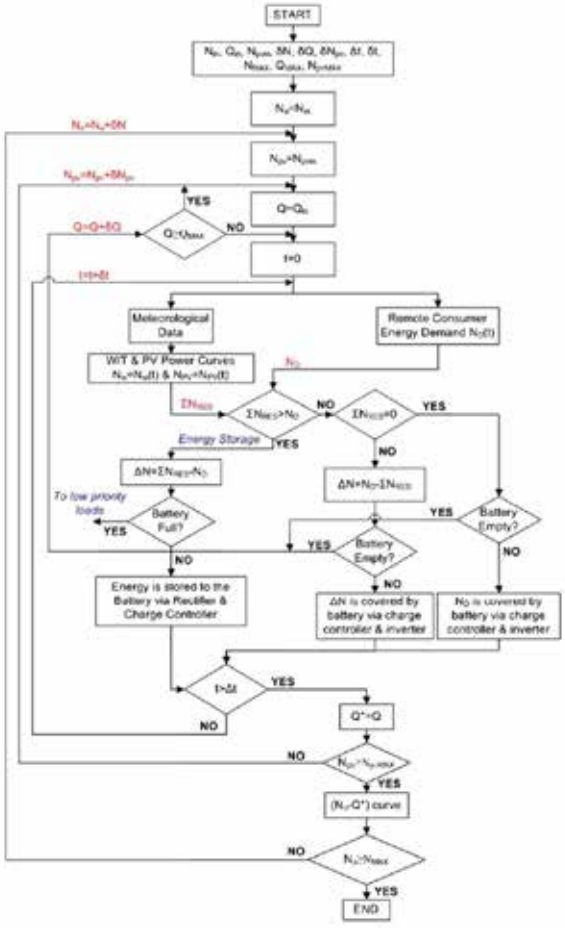
Πίνακας Ι: Χαρακτηριστικά μεγέθη ΥΒΣ & εξεταζόμενα εύρη κύριων μεταβλητών

Παράμετρος	**Τιμή**
Ονομαστική ισχύς Φ/Β πάρκου	0-500kW$_p$
Συνολική χωρητικότητα συσσωρευτών	0-2000kWh
Μέγιστο βάθος εκφόρτισης συσσωρευτών	80%
Συνολικός βαθμός απόδοσης φόρτισης/εκφόρτισης συσσωρευτών	76%

4. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ - ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

Για την προσομοίωση και παραμετρική ανάλυση της διαστασιολόγησης των επιμέρους τμημάτων του ΥΒΣ χρησιμοποιήθηκε "in-house" υπολογιστικός αλγόριθμος-κώδικας του Εργαστηρίου Ήπιων Μορφών Ενέργειας & Προστασίας του Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής (βλέπε Σχήμα 12 και σχετική βιβλιογραφία) [15]. Ο υπολογιστικός κώδικας έχει αναπτυχθεί για τη λεπτομερή μελέτη υβριδικών συστημάτων ΑΠΕ-συσσωρευτών με συμμετοχή και συμβατικών τεχνολογιών, όπως γεννητριών ντίζελ, με σκοπό την επίτευξη επιθυμητής ενεργειακής αυτονομίας για δεδομένες ανάγκες ηλεκτρικής ζήτησης και δεδομένα χαρακτηριστικά υποσυστημάτων και τοπικού δυναμικού ΑΠΕ. Πιο συγκεκριμένα, με τη χρήση ωριαίων μετρήσεων/ιστορικών δεδομένων ηλεκτρικής ζήτησης, ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο, ταχύτητας ανέμου, μετεωρολογικών δεδομένων όπως ατμοσφαιρική πίεση, θερμοκρασία περιβάλλοντος και υγρασία, καθώς και των απαραίτητων χαρακτηριστικών λειτουργίας των συμμετεχόντων υποσυστημάτων (π.χ. καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας, καμπύλες ρεύματος-τάσης Φ/Β πλαισίων, κ.λπ.) είναι δυνατή η διερεύνηση της ωριαίας κάλυψης από τον ΥΒΣ των αναγκών σε ηλεκτρική ζήτηση για διάρκεια ενός ολόκληρου έτους. Αναλυτικότερα, τα βήματα του υπολογιστικού κώδικα για τη συγκεκριμένη περίπτωση συνοψίζονται στα ακόλουθα:

1. Υπολογισμός της παραγωγής του Φ/Β σταθμού με τη χρήση τιμών μέσης ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας (Σχήμα 8), και των χαρακτηριστικών του Φ/Β πλαισίου και του ηλεκτρονικού μετατροπέα υπό εξέταση, λαμβάνοντας επίσης υπόψη την επίδραση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος.
2. Σύγκριση της παραγόμενης Φ/Β ισχύος με το αντίστοιχο καταγεγραμμένο ηλεκτρικό φορτίο από ιστορικά δεδομένα (Σχήμα 7) και υπολογισμός του εμφανιζόμενου πλεονάσματος ή ελλείμματος ενέργειας για κάθε ώρα του έτους.
3. Αξιοποίηση των εμφανιζόμενων πλεονασμάτων Φ/Β παραγωγής μέσω αποθήκευσης στο σύστημα συσσωρευτών (συμπεριλαμβανομένων των απωλειών ενέργειας κατά τη διαδικασία φόρτισης), με ταυτόχρονο έλεγχο της στάθμης φόρτισης του τελευταίου και εκτίμηση τυχόν δευτερογενούς πλεονάσματος (λόγω πλήρωσης των συσσωρευτών), το οποίο μπορεί είτε να διατεθεί για την τροφοδότηση ηλεκτρικών φορτίων δευτερεύουσας σημασίας ή να απορριφθεί.
4. Αντιμετώπιση των εμφανιζόμενων ελλειμμάτων μέσω εκμετάλλευσης των αποθεμάτων ενέργειας στο σύστημα συσσωρευτών (συμπεριλαμβανομένων των απωλειών ενέργειας κατά τη διαδικασία εκφόρτισης), μη παραβιάζοντας τη συνθήκη του μέγιστου βάθους εκφόρτισης παρά μόνο σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης καθώς και αξιοποιώντας εφεδρική(ές) μονάδα(ες) ντίζελ του Τοπικού Σταθμού Παραγωγής (ΤΣΠ) του νησιού σε περιορισμένο βαθμό και μόνο εφόσον τα αποθέματα ενέργειας στους συσσωρευτές δεν κρίνονται επαρκή.



Σχήμα 12: Υπολογιστικός κώδικας διαστασιολόγησης ΥΒΣ ΑΠΕ-συσσωρευτών [15]

Η ανωτέρω ακολουθία εκτελείται για ένα ολόκληρο (ή και περισσότερα) έτος, με τον υπολογιστικό κώδικα να καταγράφει απολογιστικά τη δυνατότητα του συστήματος να εξυπηρετήσει τις ενεργειακές του απαιτήσεις μέσω δεικτών όπως οι ώρες απόρριψης φορτίου ετησίως, το ποσοστό ενεργειακής

κάλυψης μέσω ΑΠΕ, το τελικά εμφανιζόμενο πλεόνασμα κ.α., ενώ επαναλαμβάνεται για πλήθος συνδυασμών (ισχύος Φ/Β, χωρητικότητας συσ-σωρευτών, βάθος εκφόρτισης, ισχύος μετατροπέων, κ.λπ.) με σκοπό τη μετέπειτα ενεργειακή αλλά και οικονομική αξιολόγησή τους χρησιμοποιώντας κριτήρια βελτιστοποίησης.

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

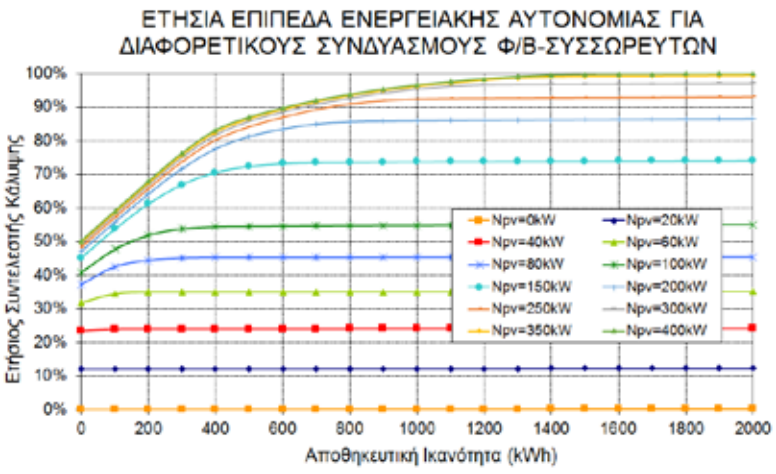
5.1 Υφιστάμενη Κατάσταση

Με βάση τα ανωτέρω [16], εξετάσθηκε στη συνέχεια πλήθος συνδυασμών Φ/Β ισχύος και χωρητικότητας συσσωρευτών, με τα συγκεντρωτικά, απολογιστικά ενεργειακά και οικονομικά αποτελέσματα να παρατίθενται στα γραφήματα των Σχημάτων 13 και 14, αρχικά για το σενάριο κάλυψης της **υφιστάμενης ηλεκτρικής κατανάλωσης** στο νησί. Ειδικότερα, στο Σχήμα 13 εμφανίζεται ο εκτιμώμενος **Ετήσιος Συντελεστής Κάλυψης** (ΕΣΚ) ηλεκτρικής κατανάλωσης σε ετήσια βάση και για διαφορετικούς συνδυασμούς Φ/Β-συσσωρευτών, ενώ στο Σχήμα 14 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα οικονομικά αποτελέσματα τα οποία αναφέρονται στο Σταθμισμένο Κόστος Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας (Levelized Cost of Electricity-LCOE), με βάση και τις τιμές του Πίνακα ΙΙ. Για την εκτίμηση του Ανηγμένου Κόστους Επένδυσης (ΑΚΕ) χρησιμοποιούνται οι τιμές του Πίνακα ΙΙ.

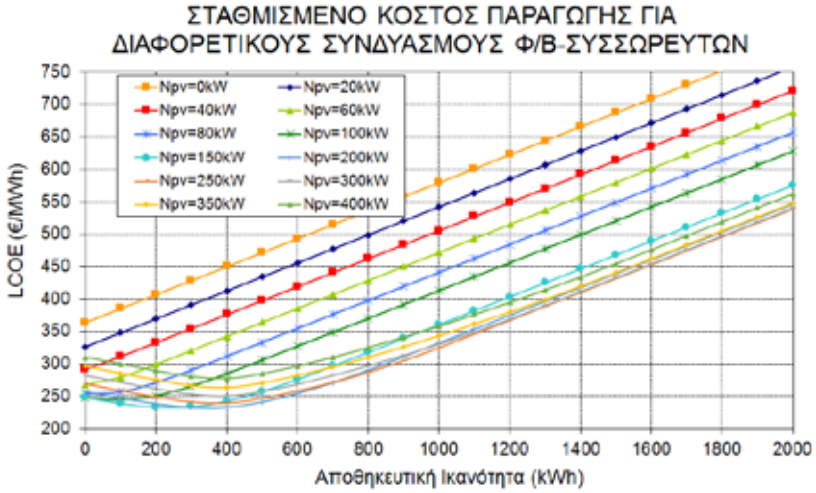
Πίνακας ΙΙ: Ενδεικτικά οικονομικά μεγέθη της παρούσας ανάλυσης

Παράμετρος	**Τιμή**
Ανηγμένο κόστος Φ/Β σταθμού	750€/kW
Ανηγμένο κόστος συστήματος συσσωρευτών	500€/kWh
Κόστος μελετών, συνοδών έργων, εγκαταστάσεων, μεταφορικών, συστήματος SCADA και διαχείρισης ενέργειας, κ.λπ.	~20% x κόστος βασικού εξοπλισμού
Κόστος πετρελαίου για λειτουργία του ΤΣΠ	1.2€/lt
Συντελεστής ετήσιου σταθερού κόστους συντήρησης & λειτουργίας	3% x ΑΚΕ
Επιτόκιο αναγωγής	5%

Όπως προκύπτει από το Σχήμα 13, για Φ/Β ισχύ μεγαλύτερη των 150kW$_p$ και αποθηκευτική ικανότητα υψηλότερη των 400kWh, ο ΕΣΚ ξεπερνά το 70%. Περαιτέρω αύξηση της Φ/Β ισχύος και της αποθηκευτικής ικανότητας των συσσωρευτών, άνω των 200kW και των 500kWh αντίστοιχα, σηματοδοτεί την αύξηση του ΕΣΚ στα επίπεδα του >80%, ενώ για Φ/Β ισχύ >300kW και σύστημα συσσωρευτών >1000kWh, ο ΕΣΚ αγγίζει τα επίπεδα του 95%. Η αύξηση του ΕΣΚ συνοδεύεται, όπως θα αναμενόταν, από ανάλογη αύξηση του ΑΚΕ, καθοδηγούμενη κατά κύριο λόγο από το κόστος των συσσωρευτών.



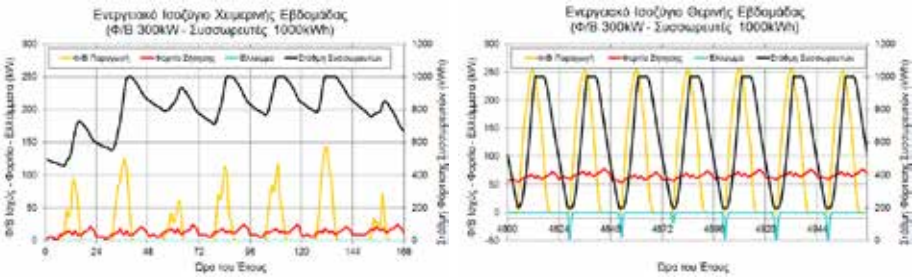
Σχήμα 13: Ετήσιος Συντελεστής Κάλυψης για διαφορετικούς συνδυασμούς Φ/Β-συσσωρευτών



Σχήμα 14: Σταθμισμένο Κόστος Παραγωγής για διαφορετικούς συνδυασμούς Φ/Β-συσσωρευτών

Αντιθέτως, και εξαιτίας του μη άμεσα αξιοποιήσιμου πλεονάσματος Φ/Β παραγωγής, το LCOE δε χαρακτηρίζεται από γραμμική αύξηση για το σύνολο των περιπτώσεων Φ/Β ισχύος (Σχήμα 14), παρουσιάζοντας συγκεκριμένες περιοχές ελάχιστου κόστους παραγωγής, οι οποίες εμφανίζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον (~300-600kWh αποθηκευτική ικανότητα και ~200-300kW$_p$ Φ/Β ισχύος). Να τονισθεί ότι το τρέχον κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σήμερα προσεγγίζει τα 1400€/MWh.

Τέλος, και για την πληρέστερη περιγραφή του τρόπου λειτουργίας του ΥΒΣ, στο Σχήμα 15 παρουσιάζεται το ενεργειακό ισοζύγιο αντιπροσωπευτικής εγκατάστασης για επίτευξη υψηλής διείσδυσης ΑΠΕ (Φ/Β ισχύς 300kW$_p$ και συσσωρευτές 1000kWh με ΕΣΚ>95%), για τυπική εβδομάδα λειτουργίας κατά τη χειμερινή και θερινή περίοδο, όπου και απεικονίζεται η μεταβολή της στάθμης του συστήματος συσσωρευτών σε συνδυασμό με τη διακύμανση της Φ/Β παραγωγής και του αντίστοιχου φορτίου ζήτησης, καθώς και η εμφάνιση ελλειμμάτων κατά τη θερινή περίοδο, όταν και απαιτείται η συμβολή του ΤΣΠ για την αντιμετώπισή τους.

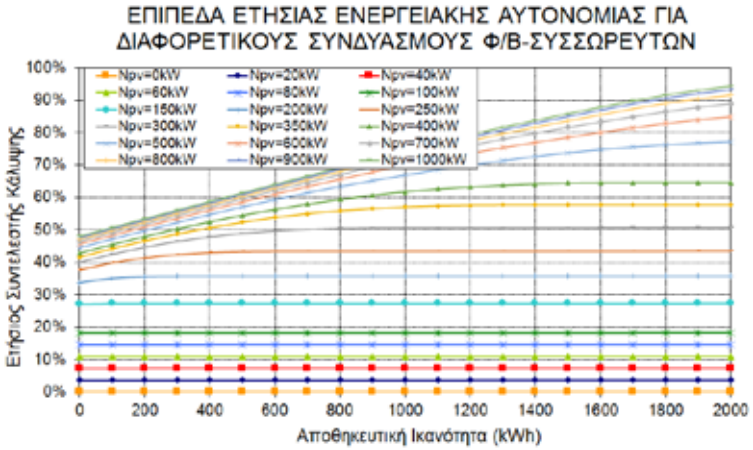


Σχήμα 15: Ενεργειακό ισοζύγιο αντιπροσωπευτικού ΥΒΣ για τυπικές εβδομάδες λειτουργίας

5.2 Αποτελέσματα Προσομοίωσης – Μετά τη Λειτουργία του ΠΑΓΓΑΙΑ

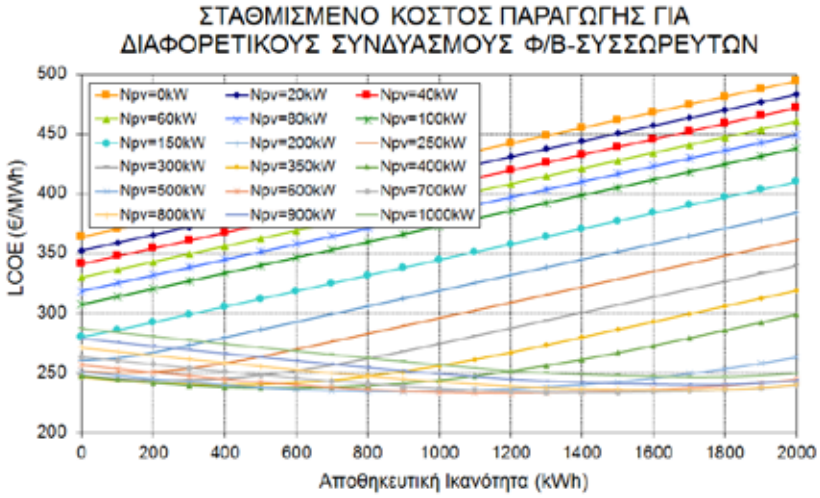
Η διαδικασία προσομοίωσης επαναλαμβάνεται στη συνέχεια προκειμένου να ληφθεί υπόψιν και η λειτουργία του (ΠΑΓΓΑΙΑ), η οποία αναμένεται να αυξήσει σημαντικά (πλέον του 200%) την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στο νησί. Η αναμενόμενη αυτή αύξηση αποδίδεται αφενός στις υψηλές απαιτήσεις του επιστημονικού εξοπλισμού του Παρατηρητηρίου σε κατανάλωση ενέργειας (καθεστώς ~αδιάλειπτης λειτουργίας), αφετέρου στη δυνατότητα επισκέψεων (campaigns) επιστημονικών ομάδων στο Παρατηρητήριο (εξαιρουμένης της περιόδου 15/11-15/2, οπότε και λόγω καιρικών συνθηκών θα αποθαρρύνεται η πραγματοποίηση παρόμοιων αποστολών) και στην παράλληλη λειτουργία επιπρόσθετου, φορητού εξοπλισμού κατά τη διάρκεια αυτών.

Με βάση τα παραπάνω, στο Σχήμα 7 παρουσιάζεται τροποποιημένο προφίλ κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας το οποίο λαμβάνει υπόψη καθεστώς αδιάλειπτης λειτουργίας για εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύ 85kW του ΠΑΓΓΑΙΑ (ακραία επιβαρυμένο σενάριο) -με την εξαίρεση της περιόδου 15/11-15/2 οπότε και το αντίστοιχο φορτίο μειώνεται στα 40kW- ενώ αυξάνεται ταυτοχρόνως το άνω όριο μελέτης για την παράμετρο της Φ/Β ισχύος από τα 400kW στα 1000kW (Πίνακας Ι).



Σχήμα 16: Ετήσιος Συντελεστής Κάλυψης για διαφορετικούς συνδυασμούς Φ/Β-συσσωρευτών (σενάριο με συνεκτίμηση λειτουργίας ΠΑΓΓΑΙΑ)

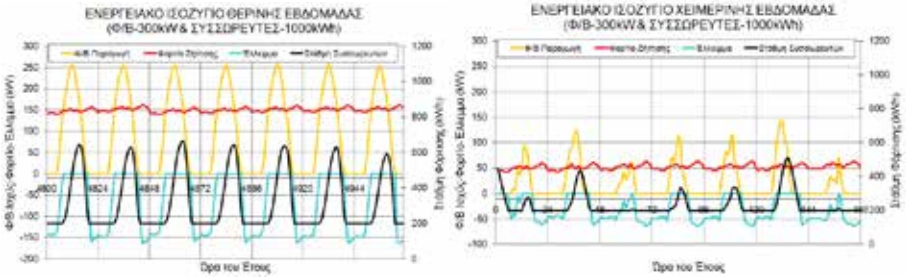
Τα αποτελέσματα της νέας προσομοίωσης παρουσιάζονται στη συνέχεια στα Σχήματα 16-18, με εμφανή τη μείωση του ΕΣΚ και την ανάγκη για αύξηση της εγκατεστημένης Φ/Β ισχύος (>500kW) για την επίτευξη ΕΣΚ>75%-80% (Σχήμα 16). Παράλληλα, καταγράφεται αναλογική αύξηση του ΑΚΕ, ενώ με ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρατηρούμε τη συνολική μείωση του LCOE (Σχήμα 17) λόγω της καλύτερης αξιοποίησης της Φ/Β παραγωγής σε ετήσια βάση, η οποία με τη σειρά της εξηγείται από τη μείωση του εμφανιζόμενου πλεονάσματος Φ/Β παραγωγής.



Σχήμα 17: Σταθμισμένο Κόστος Παραγωγής για διαφορετικούς συνδυασμούς Φ/Β-συσσωρευτών (σενάριο με συνεκτίμηση λειτουργίας ΠΑΓΓΑΙΑ)

Κλείνοντας, στο Σχήμα 18 παρουσιάζεται εκ νέου το ενεργειακό ισοζύγιο της εγκατάστασης του Σχήματος 10 (Φ/Β ισχύς 300kW$_p$ και συσσωρευτές 1000kWh) για τις ίδιες τυπικές περιόδους μελέτης,

με τη συμβολή του ΤΣΠ να είναι πλέον απαραίτητη και κατά τη χειμερινή περίοδο, γεγονός που υποδηλώνει την ανάγκη για πιθανή αύξηση των διαστάσεων του ΥΒΣ.



Σχήμα 18: Ενεργειακό ισοζύγιο αντιπροσωπευτικού ΥΒΣ για τυπικές εβδομάδες λειτουργίας (σενάριο με συνεκτίμηση λειτουργίας ΠΑΓΓΑΙΑ)

Με βάση την υφιστάμενη εμπειρία αλλά και τις ιδιομορφίες των Αντικυθήρων, η υλοποίηση της προτεινόμενης λύσης μπορεί να υλοποιηθεί σε χρονικό ορίζοντα 1.5-2.5 ετών. Αντίστοιχα, ο συνολικός εκτιμώμενος προϋπολογισμός του συνολικού έργου είναι της τάξης του 1.5-2.0 Μ€, με δυνατότητα σταδιακής επέκτασης λόγω της σπονδυλωτής δομής (Φ/Β πλαίσια, ηλεκτρικοί συσσωρευτές) της εγκατάστασης.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας εξετάσθηκε η δυνατότητα υλοποίησης μιας ενεργειακής λύσης βασισμένης στην αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του παρατηρητήριου Γεωεπιστημών και Κλιματικής Αλλαγής (ΠΑΓΓΑΙΑ) στο νησί των Αντικυθήρων. Το ΠΑΓΓΑΙΑ έχει ανατεθεί από την ΕΕ στο Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών με σημαντική χρηματοδότηση με σκοπό την πειραματική συλλογή μεγάλου εύρους επιστημονικών παραμέτρων. Στο πλαίσιο αυτό, κατά την υλοποίηση και τη λειτουργία του Παρατηρητηρίου θα απαιτηθεί πρόσθετη ηλεκτρική ισχύς περίπου 200kW, ενώ η επιπλέον ετήσια ενεργειακή κατανάλωση εκτιμάται στις 800 MWh ηλεκτρικής ενέργειας άριστων ποιοτικών χαρακτηριστικών.

Για την περιβαλλοντικά συμβατή και οικονομικά αποδεκτή επίλυση του προβλήματος το Εργαστήριο ΗΜΕ & ΠΡΟΠΕ του Πα.Δ.Α. σε συνεργασία με το ΕΑΑ προέβησαν σε συστηματική μελέτη του προβλήματος, στην οποία συμπεριλαμβάνεται η ανάλυση του τοπικού ηλιακού δυναμικού, η ζήτηση του ηλεκτρικού φορτίου του νησιού πριν και μετά την υλοποίηση του ΠΑΓΓΑΙΑ καθώς και η συστηματική αξιολόγηση των διαθέσιμων τεχνολογικών επιλογών σχετικά με την αποθήκευση ενέργειας.

Συνδυάζοντας τα παραπάνω δεδομένα και διαθέσιμους υπολογιστικούς κώδικες για αυτόνομους ΥΒΣ προέκυψε μια ρεαλιστική διαστασιολόγηση της προτεινόμενης λύσης, αξιοποιώντας και την πρόσφατη εμπειρία από το ευρωπαϊκό έργο TILOS-Horizon 2020. Για την ενίσχυση της αξιοπιστίας της προτεινόμενης λύσης παρουσιάζεται ενδεικτική σειρά αποτελεσμάτων ετήσιας προσομοίωσης λειτουργίας της εγκατάστασης για ένα ευρύ φάσμα αριθμητικών τιμών των βασικών παραμέτρων του υβριδικού σταθμού. Από την αξιολόγηση των προτεινόμενων λύσεων προκύπτει ότι είναι δυνατή η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών όχι μόνο του ΠΑΓΓΑΙΑ αλλά και ολόκληρου του νησιού των Αντικυθήρων με την ελάχιστη περιβαλλοντική επιβάρυνση, ενισχύοντας ταυτόχρονα την αξιοπιστία του τοπικού ηλεκτρικού δικτύου και συρρικνώνοντας σημαντικά το αντίστοιχο κόστος ηλεκτροπαραγωγής.

Το προτεινόμενο σύστημα καθαρής ηλεκτροπαραγωγής είναι αρθρωτό (modular) και μπορεί να διευρυνθεί σταδιακά. Επίσης, η ενσωμάτωση τεχνικών διαχείρισης της ηλεκτρικής ζήτησης (Demand Side Management-Smart Meters) σε συνδυασμό με τη στρατηγική αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας θα μπορούσε να αποτελέσει μία επιπρόσθετη αναβάθμιση, ενισχύοντας περαιτέρω την ενεργειακή ανεξαρτησία του νησιού και απαλλάσσοντας το ΠΑΓΓΑΙΑ από τη χρήση παραγώγων του πετρελαίου. Προϋπόθεση για τη βέλτιστη υλοποίηση των ανωτέρω αποτελεί μία ολοκληρωμένη τεχνο-οικονομική ανάλυση έτσι ώστε να διερευνηθούν όλες οι επιμέρους συνιστώσες του προβλήματος.

Ανακεφαλαιώνοντας, η παρούσα ερευνητική προσπάθεια ανέδειξε τις δυνατότητες που παρέχει ένα αυτόνομο σύστημα ηλιακής ενέργειας με χρήση ηλεκτρικών συσσωρευτών για την ενεργειακά αυτόνομη και περιβαλλοντικά καθαρή λειτουργία του Παρατηρητηρίου Γεωεπιστημών και Κλιματικής Αλλαγής αλλά και ολόκληρου του νησιού των Αντικυθήρων, με ρεαλιστικό κόστος και αυξημένη ασφάλεια ενεργειακού εφοδιασμού. Ο βιώσιμος χαρακτήρας της προτεινόμενης λύσης, η οποία χαίρει της

έμπρακτης υποστήριξης της τοπικής κοινωνίας και των δημοτικών αρχών, αποτελεί και τον κρίσιμο παράγοντα για την άμεση υλοποίηση του υπό μελέτη αυτόνομου ηλιακού σταθμού.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Hellenic Statistic Authority, 2018, “Greece in numbers”. Available from: https://www.statistics.gr (Accessed at 13th January 2021).

[2] Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, 2021, "Πρόγραμμα ΠΑΓΓΑΙΑ", https://www.noa.gr/research/infrastructure/paggaia/, (Accessed at 25th January 2021).

[3] Kaldellis J.K., Kondili E.M., Paliatsos A.G., 2008, "The Contribution of Renewable Energy Sources on Reducing the Air Pollution of Greek Electricity Generation Sector", *Fresenius Environmental Bulletin,* Vol.17(10a), pp.1584-1593.

[4] Kaldellis J.K., D. Zafirakis, 2020, Prospects and challenges for clean energy in European Islands. The TILOS paradigm, Renewable Energy, Volume 145, Pages 2489-2502.

[5] Kaldellis J.K., I. Ninou, D. Zafirakis, 2011, Minimum long-term cost solution for remote telecommunication stations on the basis of photovoltaic-based hybrid power systems, Energy Policy, Volume 39, Issue 5, Pages 2512-2527.

[6] Kaldellis J.K.,, 2010, Overview of stand-alone and hybrid wind energy systems (Pages 3-28), in "*Technology of Stand-Alone and Hybrid Wind Energy Production and Storage*", Kaldellis J.K. (editor), Woodhead Publishing/Elsevier, July 2010, ISBN: 978-1-84569-527-9.

[7] ΔΕΗ ΑΕ, 2016, "Ετήσιο Πρόγραμμα Αυτόνομων Σταθμών Παραγωγής", Δ/νση Παραγωγής Νήσων.

[8] Hellenic Electricity Distribution Network Operator (HEDNO), 2020, [Online], Available from: https://www.deddie.gr/ (Accessed at 10th October 2020).

[9] Global Solar Atlas, 2019, *Global Horizontal Irradiation Map,* διαθέσιμο από: https://globalsolaratlas.info/download/greece, (Accessed at 10th January 2021).

[10] Kaldellis J.K., Kavadias K.A., Paliatsos A.G., 2003, "Environmental Impacts of Wind Energy Applications: Myth or Reality?" *Environmental Bulletin,*. Vol.12(4), pp.326-337.

[11] Kaldellis J.K., Giannaraki Chr., 2014, "Wave Energy Potential in Enclosed Seas: A Case Study in the South – East Mediterranean Sea". In Energy Science and Technology, Vol.9, J.N. Govil, R. Prasad, S. Sivakumar, C. Sharma (eds.), Studium Press LLC, 926.

[12] Kaldellis J.K., D. Zafirakis, 2012, Optimum sizing of stand-alone wind-photovoltaic hybrid systems for representative wind and solar potential cases of the Greek territory, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Volumes 107–108, Pages 169-178.

[13] Kaldellis J.K., D. Zafirakis, K. Kavadias, 2012, Minimum cost solution of wind–photovoltaic based stand-alone power systems for remote consumers, Energy Policy, Volume 42, Pages 105-117.

[14] Zafirakis D., G. Tzanes, J.K. Kaldellis, 2017, An advanced microgrid simulator for stand-alone and market-dependent energy strategies, in: 2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe).

[15] Kaldellis J.K., 2004, "Optimum Techno-Economic Energy-Autonomous Photovoltaic Solution for Remote Consumers throughout Greece", Journal of Energy Conversion and Management, Vol.45(17), pp.2745-2760.

[16] Kaldellis J.K., K. Kavadias, D. Zafirakis, 2012, "Experimental Validation of the Optimum Photovoltaic Panels' Tilt Angle for Remote Consumers", Renewable Energy, Vol.46, pp.179-191.

ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΑΠΕ-ΑΙΟΛΙΚΑ

Ο ΥΒΡΙΔΙΚΟΣ ΣΤΑΘΜΟΣ ΣΙΦΝΟΥ. ΟΙ ΑΝΑΠΤΥΞΙΑΚΕΣ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΜΕΣΩ ΤΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΚΟΙΝΟΤΗΤΩΝ.

Δημήτρης Αλ. Κατσαπρακάκης[1*], Ειρήνη Δακανάλη[1], Γιάννης Γκύλλης[2], Απόστολος Δημόπουλος[2]

[1*] Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο,
[2] Συνεταιριστική Εταιρεία Σίφνου
714 10, Ηράκλειο Κρήτης, Ελλάδα, e-mail: dkatsap@hmu.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η Συνεταιριστική Εταιρεία Σίφνου μέσω της εν γένει σχεδίασης της ενεργειακής μετάβασης στο νησί, με βασικό πυλώνα έναν υβριδικό σταθμό αποτελούμενο από αιολικό πάρκο και αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό, κατάφερε να ενταχθεί η Σίφνος ως ένα από τα 6 πιλοτικά νησιά της Ευρωπαϊκής Επιτροπής για τη δράση «Καθαρή ενέργεια στα νησιά της Ευρωπαϊκής Ένωσης». Στόχος της Συνεταιριστικής Εταιρείας Σίφνου είναι η επίτευξη της ενεργειακής μετάβασης στο νησί με τρόπο αποδοτικό και ορθολογικό, εξασφαλίζοντας ενεργειακή ανεξαρτησία και δημοκρατία στο νησί και διεκδικώντας τις μέγιστες δυνατές αναπτυξιακές προοπτικές για την τοπική νησιωτική κοινότητα.

Το άρθρο παρουσιάζει τα βασικά τεχνικά και οικονομικά στοιχεία του υβριδικού σταθμού Σίφνου και τις τεράστιες αναπτυξιακές προοπτικές που ανοίγονται μέσα από την κατασκευή και τη λειτουργία του. Το έργο προσφέρει αποθηκευτική χωρητικότητα 860 MWh, η οποία συνεπάγεται αυτονομία παραγωγής για διάστημα 16 ημερών. Η οικονομική βιωσιμότητα του έργου εξασφαλίζεται με μία τιμή πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας της τάξης των 0,26 €/kWh τουλάχιστον μέχρι να αποπληρωθούν οι δανειακές υποχρεώσεις. Η σημαντική περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας που προκύπτει λόγω της ετήσιας διακύμανσης της ζήτησης μπορεί να καλύψει πλήρως τις νέες καταναλώσεις για τη μετάβαση στην ηλεκτροκίνηση, για το διπλασιασμό της σημερινής παραγωγής πόσιμου νερού μέσω αφαλάτωσης και για την παραγωγή υδρογόνου που θα επιτρέψει την πρόωση μικρού επιβατηγού πλοίου και θα εξασφαλίσει καθημερινή ακτοπλοϊκή σύνδεση της νήσου με τα σημαντικά κέντρα του Νομού Κυκλάδων.

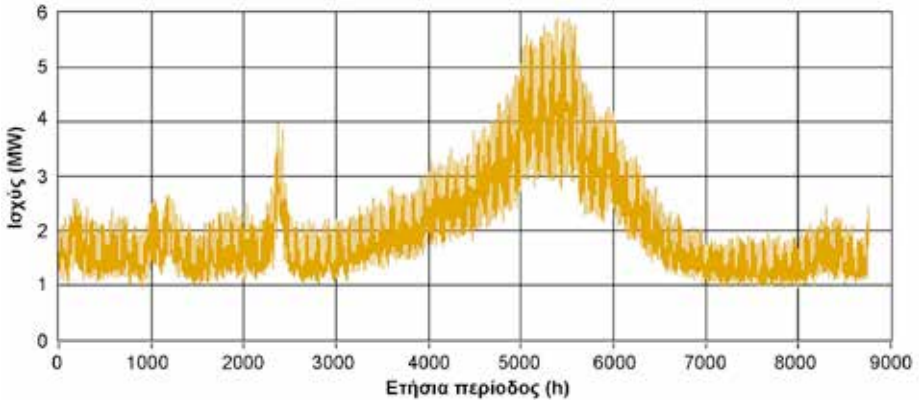
Η Ελληνική Πολιτεία οφείλει να αντιμετωπίσει την πρωτοβουλία της Συνεταιριστικής Εταιρείας Σίφνου στην πραγματική διάστασή της ως ένα πιλοτικό νησί της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, εξασφαλίζοντας την απαιτούμενη τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας από τον υβριδικό σταθμό που θα εγγυηθεί την οικονομική βιωσιμότητά του.

Λέξεις Κλειδιά: Ενεργειακή μετάβαση, υβριδικοί σταθμοί αιολικών πάρκων και αναστρέψιμων υδροηλεκτρικών, ενεργειακές κοινότητες, καθαρή ενέργεια στα νησιά της Ευρωπαϊκής Ένωσης, ενεργειακή ανεξαρτησία και δημοκρατία

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

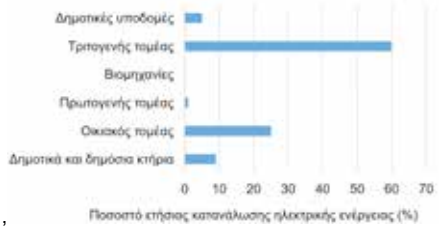
Η Σίφνος αποτελεί αυτόνομο νησιωτικό σύστημα, χωρίς ηλεκτρική διασύνδεση ούτε με το ηπειρωτικό δίκτυο, ούτε με κάποιο γειτονικό νησί. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο νησί στηρίζεται κυρίως σε ένα θερμοηλεκτρικό σταθμό, με εννιά εγκατεστημένες ντιζελογεννήτριες ονομαστικής ισχύος 1,1 MW έκαστη, στις οποίες καταναλώνεται αποκλειστικά ελαφρύ καύσιμο (ντίζελ). Σύμφωνα με τα ετήσια στοιχεία λειτουργίας του συστήματος Σίφνου όπως παραχωρήθηκαν από το ΔΕΔΔΗΕ για το 2015, το μέσο ετήσιο μεταβλητό και σταθερό ειδικό κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στο σύστημα Σίφνου υπολογίζεται στα 222,62 €/MWh και 121,45 €/MWh αντίστοιχα, τα οποία δίνουν ένα συνολικό ειδικό κόστος παραγωγής στα 344.07 €/MWh [1].

Η οικονομία στη Σίφνο στηρίζεται σε ποσοστό άνω του 90% στον τουρισμό. Τούτο διαμορφώνει και τη διακύμανση της ετήσιας ζήτησης ηλεκτρικής ισχύος, η οποία παρουσιάζεται στην εικόνα 1 για το 2015. Στο σχήμα αυτό παρατηρείται ότι η αιχμή ζήτησης ηλεκτρικής ισχύος το καλοκαίρι διαμορφώθηκε το έτος αυτό στα 5,90 MW, ενώ το χειμώνα είναι της τάξης των 2,5 MW, δηλαδή περίπου 60% χαμηλότερη. Η ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στο νησί το 2015 ανήλθε στις 17.461 MWh.



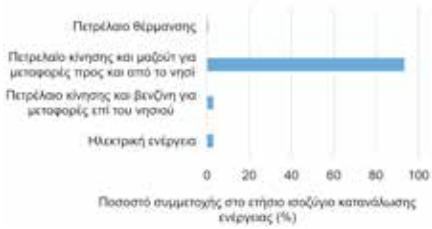
Εικόνα 1: Ετήσια διακύμανση ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στη Σίφνο το 2015.

Στη Σίφνο υπάρχουν ακόμα εγκατεστημένα 335 kW αποκεντρωμένων φωτοβολταϊκών σταθμών, ενώ από το 2019 λειτουργεί ένα αιολικό πάρκο με ονομαστική ισχύ 1,26 MW. Οι σταθμοί αυτοί συνεισφέρουν σε ποσοστά 2,5% και 16,7% αντίστοιχα στην κάλυψη της ετήσιας ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στο νησί, περιορίζοντας την παραγωγή των θερμοηλεκτρικών μονάδων στο 80,8%.



,

Εικόνα 2α: Ετήσια ποσοστιαία κατανομή κατανάλωσης ενέργειας στη Σίφνο.



Εικόνα 2β: Ετήσια ποσοστιαία κατανομή κατανάλωσης ενέργειας στη Σίφνο.

Οι καταναλώσεις ενέργειας στο νησί συνίστανται:

- στις καταναλώσεις ηλεκτρικής ενέργειας για τον τριτογενή τομέα (κυρίως τουριστικές υποδομές), τον κτηριακό οικιακό τομέα, τις δημοτικές υποδομές (δημοτικά κτήρια, οδοφωτισμός κλπ) και τις αγροτικές – κτηνοτροφικές υποδομές
- στην κατανάλωση υγρών καυσίμων για τις μεταφορές επί του νησιού

- στην κατανάλωση πετρελαίου θέρμανσης για τη θέρμανση κτηρίων
- στις καταναλώσεις υγρών καυσίμων για τις υπεράκτιες μεταφορές προς και από το νησί.

Η ποσοστιαία σύνθεση των καταναλώσεων αυτών παρουσιάζεται στην εικόνα 2 [2]. Παρατηρείται η μεγάλη συμμετοχή των υπεράκτιων μετακινήσεων στη διαμόρφωση της τελικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στο νησί. Οι τελικές καταναλώσεις ενέργειας παρουσιάζονται στον πίνακα 1.

Πίνακας 1: Ανάλυση ενεργειακών καταναλώσεων στη Σίφνο το 2015.

	Τελική ενέργεια (MWh)	Ποσοστιαία συμμετοχή (%)	Πρωτογενής ενέργεια (MWh)	Εκπομπές CO_2 (tn)
Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας				
Δημοτικά και δημόσια κτήρια	1.571	9,0	4.557	3.558
Οικιακός τομέας	4.365	25,0	12.659	9.883
Πρωτογενής τομέας	175	1,0	506	395
Βιομηχανίες	0	0,0	0	0
Τριτογενής τομέας	10.477	60,0	30.382	23.720
Δημοτικές υποδομές	873	5,0	2.532	1.977
Σύνολο	17.461	100,0	50.637	39.533
Μεταφορές επί του νησιού				
LPG	0	0,0	0	0
Diesel	8.813	51,0	9.695	2.559
Βενζίνη	8.468	49,0	9.314	2.329
Σύνολο	17.281	100,0	19.009	4.888
Μεταφορές προς και από το νησί				
Διά θαλάσσης (μαζούτ)	0	0,0	0	0
Διά θαλάσσης (ντίζελ)	529.733	100,0	582.706	153.834
Αεροπορικές (κηροζίνη)	0	0,0	0	0
Σύνολο	529.733	100,0	582.706	153.834
Θέρμανση και μαγείρεμα				
Καυστήρες πετρελαίου/αερίου	2.800	81,7	3.080	813
Ξυλεία / βιομάζα	0	0,0	0	0
Υγραέριο	0	0,0	0	0
Ηλιακοί συλλέκτες	628	18,3	0	0
Σύνολο	3.428	100,0	3.080	813
Σύνολα	567.903		655.432	199.068

2. Η ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΜΕΤΑΒΑΣΗ ΣΤΗ ΣΙΦΝΟ

2.1. Η Συνεταιριστική Εταιρεία Σίφνου

Λαμβάνοντας υπόψη:

- την υψηλή εξάρτηση του νησιού σε εισαγόμενες ενεργειακές πηγές
- το υψηλό κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας
- την επιχορήγηση της τιμής καταναλωτή για την ηλεκτρική ενέργεια από τους καταναλωτές του διασυνδεδεμένου συστήματος, με ετήσιο κατά κεφαλήν εισόδημα που σε αρκετά διαμερίσματα της χώρας διαμορφώνεται χαμηλότερο από αυτό της νησιωτικής χώρας
- την αναμενόμενη απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας

- την τάση που εκδηλώνεται από ιδιώτες επενδυτές για έργα ηλεκτροπαραγωγής από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μεγάλου μεγέθους στα νησιά της χώρας

κάτοικοι της Σίφνου πήραν την πρωτοβουλία το 2013 για την ίδρυση της Συνεταιριστικής Εταιρείας Σίφνου, με στόχο να διεκδικήσουν την ορθολογική και δίκαιη ενεργειακή μετάβαση στο νησί, επιδιώκοντας να αποκομίσουν τα μέγιστα δυνατά οικονομικά, αναπτυξιακά και κοινωνικά οφέλη για τη νησιωτική κοινωνία από τη διαδικασία αυτή.

Μέχρι σήμερα η Συνεταιριστική Εταιρεία Σίφνου έχει δραστηριοποιηθεί σε μία σειρά πρωτοβουλιών:

- την ενημέρωση των κατοίκων της Σίφνου για θέματα ενεργειακής μετάβασης και για τους στόχους της Εταιρείας
- την ανάληψη δράσης για την εξάλειψη της χρήσης της πλαστικής σακούλας στο νησί ήδη από το 2014, δηλαδή πολύ πριν την επιβολή του σχετικού τέλους χρήσης, η οποία οδήγησε μέσα σε 1 έτος στη μείωση της χρήσης πλαστικής σακούλας στο νησί κατά 50%
- την ένταξη της Εταιρείας στην Ευρωπαϊκή Ομοσπονδία Ενεργειακών Συνεταιρισμών RESCoop.eu, στις δράσεις της οποίας συμμετέχει ενεργητικά
- τη συμβολή στη διαβούλευση για την κατάρτιση του νόμου 4513/2018 με τον οποίο εισήχθη ο θεσμός των ενεργειακών κοινοτήτων στην Ελλάδα
- στη σχεδίαση υβριδικού σταθμού αποτελούμενου από αιολικό πάρκο και αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό διαστασιολογημένο με στόχο να καλύψει 100% τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας στο νησί και στην υποβολή σχετικού αιτήματος στη Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας το 2016 για έκδοση άδειας παραγωγής, η οποία τελικά εκδόθηκε το 2020.

Την τρέχουσα χρονική περίοδο η Συνεταιριστική Εταιρεία Σίφνου είναι στη διαδικασία μετασχηματισμού της σε Ενεργειακή Κοινότητα, ενώ παράλληλα εκπονείται η μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων για την περαιτέρω αδειοδότηση του υβριδικού σταθμού Σίφνου.

2.2. Η δράση «Καθαρή Ενέργεια για τα νησιά της Ευρωπαϊκής Ένωσης»

Για την ανωτέρω περιγραφόμενη δράση της, το όραμα της ενεργειακής ανεξαρτησίας και την ύπαρξη συγκεκριμένου σχεδίου προσέγγισής της με βασικό πυλώνα το έργο του υβριδικού σταθμού, η Σίφνος επιλέχτηκε από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή ως ένα από τα τρία πρώτα, από τα συνολικά έξι, πιλοτικά νησιά της πρωτοβουλίας «Καθαρή Ενέργεια για τα νησιά της Ευρωπαϊκής Ένωσης» (Clean Energy for EU Islands). Η διάκριση αυτή αποτυπώνει την καινοτομία και τις προκλήσεις του εγχειρήματος της ενεργειακής μετάβασης στη Σίφνο, ενώ επίσης το αναδεικνύει σε οδηγό για ολόκληρη την Ευρώπη. Πράγματι, η πρωτοβουλία της Συνεταιριστικής Εταιρείας Σίφνου, ιδιαίτερα μέσα από τη σχεδίαση του υβριδικού σταθμού, παρουσιάζει τα ακόλουθα στοιχεία καινοτομίας σε παγκόσμιο επίπεδο:

- είναι το πρώτο έργο παγκοσμίως υβριδικού σταθμού το οποίο βασίζεται σε συνδυασμό αιολικού πάρκου και αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού με θαλασσινό νερό
- είναι το πρώτο έργο παγκοσμίως το οποίο έχει διαστασιολογηθεί με στόχο την απόλυτη κάλυψη σε ποσοστό 100% της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα αυτόνομο, μη διασυνδεδεμένο νησιωτικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας
- είναι το πρώτο έργο παγκοσμίως το οποίο αποσκοπεί στην 100% κάλυψη των ενεργειακών αναγκών σε ένα αυτόνομο, μη διασυνδεδεμένο νησιωτικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας με φορέα υλοποίησης ένα ενεργειακό συνεταιριστικό σχήμα.

Η Σίφνος, ως 6 πιλοτικό νησί της ανωτέρω δράσης, εκπόνησε και υπέβαλε Σχέδιο Ενεργειακής Μετάβασης στην Ευρωπαϊκή Επιτροπή [2]. Η επιτυχής ολοκλήρωση των στόχων της Συνεταιριστικής Εταιρείας Σίφνου, όπως αποτυπώνονται στο Σχέδιο Ενεργειακής Μετάβασης Σίφνου, αποτελεί ένα πανευρωπαϊκό στοίχημα και θα λειτουργήσει ως οδηγός για τα νησιά της Ευρώπης.

3. Ο ΥΒΡΙΔΙΚΟΣ ΣΤΑΘΜΟΣ ΣΙΦΝΟΥ

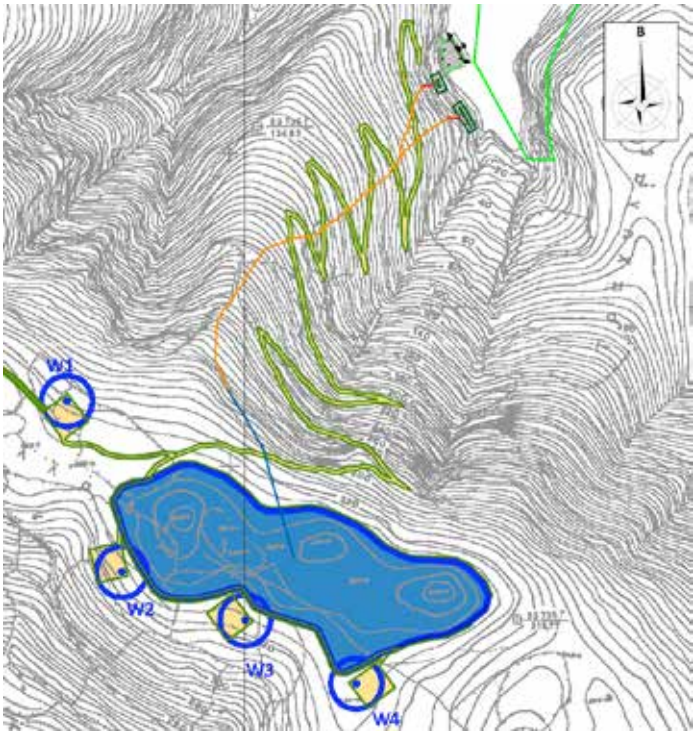
3.1. Βασικά στοιχεία διαστασιολόγησης - χωροθέτηση

Ο υβριδικός σταθμός Σίφνου σχεδιάστηκε για την 100% κάλυψη των συνολικών αναγκών ενέργειας στο νησί σε όλους τους τομείς (οικιακός, τριτογενής, πρωτογενής, δημοτικές υποδομές και μεταφορές επί του νησιού). Αποσκοπώντας στην κατασκευή ενός έργου με το ελάχιστο δυνατό κόστος, επαρκή αποθηκευτική ικανότητα, τεχνική επάρκεια να αντεπεξέλθει στα ποιοτικά χαρακτηριστικά της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, τα ιδρυτικά μέλη της Συνεταιριστικής Εταιρείας Σίφνου μελετώντας και ερευνώντας τη διεθνή τεχνική και επιστημονική βιβλιογραφία κατέληξαν χωρίς την παροχή συμβουλευτικής υποστήριξης από εξωτερικούς μελετητές, στο ότι οι βέλτιστες τεχνολογίες οι οποίες

πρέπει να χρησιμοποιηθούν για τη σύνθεση του υβριδικού σταθμού είναι ένα αιολικό πάρκο, πιθανώς ένας φωτοβολταϊκός σταθμός και ένα αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό ως μονάδα αποθήκευσης. Η διαστασιολόγηση του έργου εκτελέστηκε μέσα από την υπολογιστική προσομοίωση της ετήσιας λειτουργίας του υβριδικού σταθμού, που υλοποιήθηκε μέσα από την ανάπτυξη κατάλληλης εφαρμογής λογισμικού, η οποία κατέληξε στα ακόλουθα μεγέθη για τις βασικές συνιστώσες του έργου:

- Το ρόλο της μονάδας ηλεκτροπαραγωγής από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) αναλαμβάνει ένα αιολικό πάρκο ονομαστικής ισχύος 12 MW, αποτελούμενο από τέσσερις (4) ανεμογεννήτριες Enercon E-82/E4 ισχύος 3.000 kW έκαστη, διαμέτρου πτερωτής 82 m.
- Η μονάδα αποθήκευσης ενέργειας του υβριδικού σταθμού θα είναι ένα αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό, το οποίο θα λειτουργεί με θαλασσινό νερό και θα αποτελείται από:
  - άνω δεξαμενή χωρητικότητας 1.106.057 m^3 σε απόλυτο υψόμετρο 332 m
  - υδροηλεκτρικό σταθμό με τέσσερις (4) υδροστρόβιλους τύπου Pelton ονομαστικής ισχύος 2,185 MW έκαστος, ήτοι συνολικής ονομαστικής ισχύος 8,74 MW, οι οποίοι θα αποτελέσουν τις μονάδες ελεγχόμενης παραγωγής του υβριδικού σταθμού
  - αντλιοστάσιο, με δώδεκα (12) φυγόκεντρες αντλίες ονομαστικής ισχύος 0,857 MW έκαστη, ήτοι συνολικής ισχύος 10,28 MW, οι οποίες θα αποτελέσουν τις μονάδες πλήρωσης της μονάδας αποθήκευσης του υβριδικού σταθμού
  - ένα ζεύγος αγωγών μεταφοράς νερού για την υδατόπτωση και ένα ακόμα για την άντληση, με διάμετρο αγωγού 1 m, από υαλοποιημένο πολυεστέρας (GRP).

Η θέση εγκατάστασης του υβριδικού σταθμού εντοπίζεται στη βορειοανατολική ακτογραμμή της Σίφνου. Χάρτης με τη χωροθέτηση του υβριδικού σταθμού παρουσιάζεται στην εικόνα 3, σε υπόβαθρο τοπογραφικού διαγράμματος της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού.



Εικόνα 3: Θέση εγκατάστασης υβριδικού σταθμού Σίφνου σε υπόβαθρο τοπογραφικού διαγράμματος Γ.Υ.Σ. και σύστημα συντεταγμένων ΕΓΣΑ '87.

Το αιολικό πάρκο χωροθετείται στην ίδια θέση με την άνω δεξαμενή, σε υψίπεδο με απόλυτο υψόμετρο που κυμαίνεται μεταξύ 332 m και 340 m. Ο υδροηλεκτρικός σταθμός και το αντλιοστάσιο χωροθετούνται επί της βορειοανατολικής ακτογραμμής της νήσου. Η θέση εγκατάστασης επιλέχτηκε

από τη Συνεταιριστική Εταιρεία Σίφνου σε συνεργασία με τους μελετητές του έργου, λαμβάνοντας υπόψη πέρα από τις βασικές τεχνικές απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιούνται και τις δυνητικές επιπτώσεις από την κατασκευή και λειτουργία του έργου. Οι προφανείς τεχνικές απαιτήσεις αφορούν στη διαθεσιμότητα υψηλού αιολικού δυναμικού, ομαλό εδαφικό ανάγλυφο προς αποφυγή φαινομένων αποκόλλησης του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος και την εμφάνιση διάτμησης, την επιπεδότητα της θέσης για τη μείωση του όγκου εκσκαφών για τη διαμόρφωση της άνω δεξαμενής, τη γειτνίασή της με την ακτογραμμή και το ήπιο πρανές προς αυτή που θα διευκολύνει την πρόσβαση και την επιφανειακή εγκατάσταση των αγωγών μεταφοράς νερού, αποφεύγοντας έτσι τη δαπανηρή υπόγεια όδευσή τους μέσω σήραγγας, και τη διαθεσιμότητα επαρκούς χώρου με ήπιο ανάγλυφο στην ακρογραμμή για την εγκατάσταση των σταθμών υδροδυναμικών μηχανών [3]. Ας σημειωθεί ότι ο ωφέλιμος όγκος της άνω δεξαμενής σε συνδυασμό με το απόλυτο υψόμετρο στη θέση εγκατάστασης συνεπάγονται αποθηκευτική ικανότητα 860 MWh, που εξασφαλίζει αυτονομία λειτουργίας της μονάδας αποθήκευσης, ξεκινώντας από πλήρη φόρτιση και χωρίς ενδιάμεση αποθήκευση ενέργειας, για διάστημα 16 ημερών, υπολογιζόμενο ως προς τη μέση ετήσια ημερήσια ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας.

Αναφορικά με τις δυνητικές επιπτώσεις από την κατασκευή και τη λειτουργία του έργου στο φυσικό και ανθρωπογενές περιβάλλον, η θέση εγκατάστασης βρίσκεται εκτός ορίων της μοναδικής περιοχής του δικτύου NATURA 2000 στο νησί και εκτός ορίων των οριοθετημένων αρχαιολογικών περιοχών. Οι αποστάσεις του έργου από τους οικισμούς του νησιού είναι μεγαλύτερη των 2.500 m, ενώ η εδαφική μορφολογία του νησιού πρακτικά εξαλείφει την όποια οπτική επαφή από τους οικισμούς του νησιού ή τα βασικότερα σημεία τουριστικού ενδιαφέροντος με τις εγκαταστάσεις του έργου. Το παρόν έργο αποδεικνύει ότι οι δυνητικές επιπτώσεις από τα έργα αξιοποίησης των ΑΠΕ, και δη τα έργα ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ, μπορούν να ελαχιστοποιηθούν ή και πρακτικά να απαλειφθούν εντελώς ήδη από τη φάση σχεδίασής τους, με τη σωστή διαστασιολόγηση και χωροθέτησή τους [4].

3.2. Αλγόριθμός λειτουργίας – παραγωγή και αποθήκευση ενέργειας

Η ετήσια λειτουργία του υβριδικού σταθμού Σίφνου προσομοιώνεται βάσει συγκεκριμένου αλγόριθμου λειτουργίας που έχει αναπτυχθεί από τους μελετητές σε ακαδημαϊκό επίπεδο [5]. Ο αλγόριθμος λειτουργίας υλοποιείται για ετήσια περίοδο και για μέσο ωριαίο χρονικό βήμα υπολογισμού και παρουσιάζεται στη συνέχεια.

1. Σε κάθε χρονικό βήμα υπολογισμού εισάγονται ως δεδομένα η διαθέσιμη ισχύς P_{RES} από τη μονάδα ΑΠΕ του υβριδικού σταθμού (αιολικό πάρκο) και η ζήτηση ισχύος P_d.
2. Υπολογίζεται η διείσδυση $P_{RES\delta}$ της μονάδας ΑΠΕ του υβριδικού σταθμού στην παραγωγή εγγυημένης ισχύος, η οποία, όπως αναφέρθηκε ανωτέρω, δεν μπορεί να υπερβαίνει το 15% της τρέχουσας συνολικής παραγωγής εγγυημένης ισχύος, η οποία ταυτίζεται σε κάθε χρονική στιγμή με τη ζήτηση ισχύος P_d. Συνεπώς:
   i. αν $P_{RES} > 0{,}15 \cdot P_d$, τότε $P_{RES\delta} = 0{,}15 \cdot P_d$
   ii. αν $P_{RES} \leq 0{,}15 \cdot P_d$, τότε $P_{RES\delta} = P_{RES}$.
3. Η ζήτηση ισχύος που παραμένει προς κάλυψη ισούται με:
   $P_d - P_{RES\delta}$.
4. Η διαθέσιμη προς αποθήκευση ισχύς P_{RESav} από τη μονάδα ΑΠΕ του υβριδικού σταθμού είναι σε κάθε περίπτωση:
   $P_{RESav} = P_{RES} - P_{RES\delta}$.
5. Υπολογίζεται ο όγκος V_P που πρέπει να αποθηκευτεί στην άνω δεξαμενή προκειμένου να αποθηκευτεί ισχύς P_{RESav} για χρονικό βήμα διάρκειας t (γ το ειδικό βάρος του νερού, H_P το ολικό μανομετρικό άντλησης και η_P ο μέσος βαθμός απόδοσης των αντλιών):
   $V_p = \eta_p \cdot P_{RESav} \cdot t / \gamma \cdot H_P$
6. Υπολογίζεται ο όγκος νερού V_T που θα πρέπει να αφαιρεθεί από την άνω δεξαμενή προκειμένου να καλυφθεί η ζήτηση ισχύος P_d-$P_{RES\delta}$ από τους υδροστρόβιλους για το χρονικό βήμα διάρκειας t (H_h το ολικό μανομετρικό υδατόπτωσης και η_h ο μέσος βαθμός απόδοσης των υδροστροβίλων):
   $V_h = (P_d - P_{RES\delta}) \cdot t / \eta_h \cdot \gamma \cdot H_h$.
7. Ο παραμένων όγκος νερού κατά το τρέχον χρονικό βήμα j στην άνω δεξαμενή θα είναι:
   $V_{st}(j) = V_{st}(j-1) + V_p - V_h$.
8. Ελέγχεται αν ο παραμένων όγκος νερού στην άνω δεξαμενή υπερβαίνει τη μέγιστη χωρητικότητα V_{max} της δεξαμενής:

i. Αν $V_{st}(j) > V_{max}$, τότε (P_{st} η αποθήκευση ισχύος από τις αντλίες, P_{sur} η απόρριψη ηλεκτρικής ενέργειας της μονάδας ΑΠΕ, P_h και P_{th} η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος από τους υδροστροβίλους και τις θερμοηλεκτρικές μονάδες αντίστοιχα):
$P_h = P_d - P_{RES\delta}$
$P_{th} = 0$
$P_{st} = 0$
$P_{sur} = P_{RESav}$
$V_{st}(j) = V_{st}(j-1) - V_h$.

ii. Αν $V_{st}(j) \leq V_{max}$, τότε ελέγχεται επιπλέον αν ο όγκος νερού που παραμένει στην άνω δεξαμενή είναι μικρότερος από τον ελάχιστα παραμένοντα όγκο σε αυτή:

a. αν $V_{st}(j) < V_{min}$, τότε δεν υπάρχει επάρκεια όγκου στη δεξαμενή για την παραγωγή ισχύος:
$P_h = 0$
$P_{th} = P_d - P_{RES\delta}$
$P_{st} = P_{RESav}$
$P_{sur} = 0$
$V_{st}(j) = V_{st}(j-1) + V_p$.

b. αν $V_{st}(j) \geq V_{min}$, τότε υπάρχει επάρκεια όγκου στη δεξαμενή για την παραγωγή ισχύος:
$P_h = P_d - P_{RES\delta}$
$P_{th} = 0$
$P_{st} = P_{RESav}$
$P_{sur} = 0$
$V_{st}(j) = V_{st}(j-1) - V_h + V_p$.

Ο ανωτέρω αλγόριθμος εκτελέστηκε για μία μελλοντική ζήτηση ισχύος, με πρόβλεψη αύξησης της ετήσιας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στις 18.860 MWh.

Πίνακας 2: Παραγωγή και αποθήκευση ενέργειας από τον υβριδικό σταθμό ετησίως.

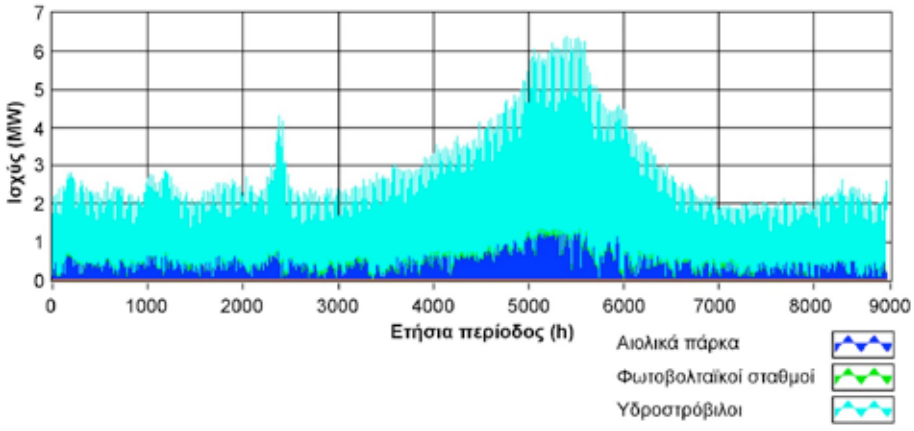
Περιγραφή μεγέθους	Ποσό
Συνολική παραγωγή ενέργειας από το αιολικό πάρκο (MWh)	41.753
Εγγυημένη παραγωγή ενέργειας από το αιολικό πάρκο (MWh)	2.337
Παραγωγή εγγυημένης ενέργειας από υδροστρόβιλο (MWh)	14.935
Αποθήκευση ενέργειας από το αιολικό πάρκο (MWh)	23.349
Αποθήκευση ενέργειας από θερμοηλεκτρικές μονάδες (MWh)	0
Συνολική αποθήκευση ενέργειας (MWh)	23.349
Ποσοστό αποθήκευσης ενέργειας από θερμοηλεκτρικές μονάδες (%)	0
Βαθμός απόδοσης αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού (%)	65,6
Περίσσειας ενέργειας το αιολικό πάρκο (MWh)	16.069
Ποσοστό περίσσειας ενέργειας ΑΠ ως προς την αρχική παραγωγή (MWh)	40,8

Τα αποτελέσματα της εκτέλεσης της υπολογιστικής προσομοίωσης του υβριδικού σταθμού συνοψίζονται στον πίνακα 2, βάσει των οποίων επιτυγχάνεται κάλυψη της ετήσιας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας σε ποσοστό 100%.

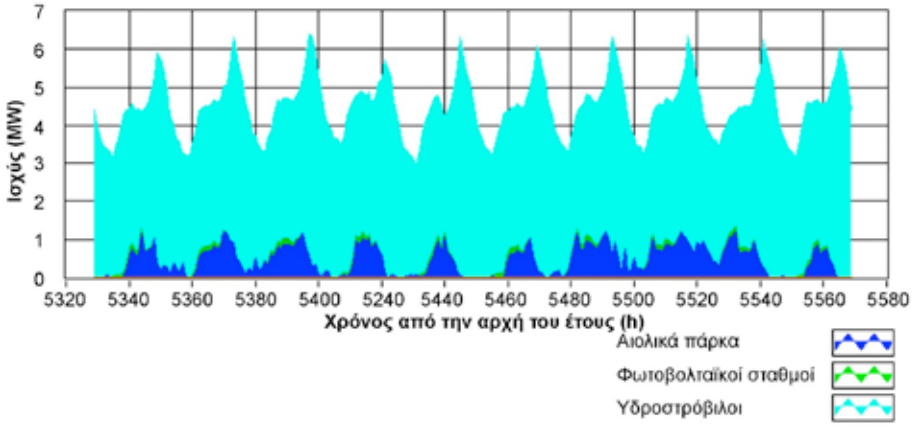
Αξιοσημείωτη, ωστόσο, είναι η μεγάλη περίσσεια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από το αιολικό πάρκο, η οποία ανέρχεται σε 16.069 MWh, που αντιστοιχεί στο 40,8% της αρχικά διαθέσιμης παραγωγής του και της ενέργειας που τελικά χρειάζεται να αξιοποιηθεί από τον υβριδικό σταθμό για την κάλυψη της ζήτησης. Η ενέργεια αυτή, η οποία αρχικά λόγω του μεγάλου ποσοστού μπορεί να θεωρηθεί ως μειονέκτημα του υβριδικού σταθμού, αφού είναι ενέργεια που απορρίπτεται, μπορεί να μετατραπεί σε πλεονέκτημα, καθώς μπορεί να αποτελέσει την πηγή για την ανάπτυξη νέων δραστηριοτήτων στο νησί, π.χ. μέσω της αφαλάτωσης που θα επιτρέψει την ανάπτυξη γεωργικών ή

κτηνοτροφικών δραστηριοτήτων, της παραγωγής υδρογόνου για την κίνηση σκαφών κλπ. Οι προοπτικές αυτές αναλύονται στην ακόλουθη ενότητα.

Στην εικόνα 4α παρουσιάζεται ετήσια σύνθεση παραγωγής ισχύος, ενώ στην εικόνα 4β παρουσιάζεται σύνθεση παραγωγής ισχύος για το διάστημα από 10 έως 20 Αυγούστου, δηλαδή κατά την περίοδο μεγιστοποίησης της ζήτησης ηλεκτρικής ισχύος στο νησί.



Εικόνα 4α: Ετήσια σύνθεση παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος στη Σίφνο με τον υβριδικό σταθμό.



Εικόνα 4β: Σύνθεση παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος στη Σίφνο με τον υβριδικό σταθμό από 10 έως 20/8.

3.3. Συμβολή του υβριδικού σταθμού στην ενεργειακή μετάβαση και ανάπτυξη της Σίφνου

Η ετήσια υφιστάμενη κατανάλωση τελικής ενέργειας για τις επίγειες μετακινήσεις στο νησί έχει εκτιμηθεί στις 17.281 MWh. Θεωρώντας μία μέση θερμογόνο δύναμη του πετρελαίου κίνησης και της βενζίνης στις 10,0 kWh/L και στις 8,9 kWh/L αντίστοιχα, μία μέση κατανάλωση ενός επιβατηγού αυτοκινήτου στα 7,5 L/100 km και μία μέση κατανάλωση ενός αντίστοιχου ηλεκτροκίνητου αυτοκινήτου στις 20 kWh/100 km, υπολογίζεται ότι η ανωτέρω κατανάλωση καυσίμων για τις επίγειες μετακινήσεις ισοδυναμεί με ετήσια κατανάλωση από ηλεκτροκίνητα οχήματα 1.500 MWh ηλεκτρικής ενέργειας.

Επιπλέον, με τη μέθοδο της αντίστροφης ώσμωσης η παραγωγή πόσιμου νερού επιτυγχάνεται με την κατανάλωση περίπου 4 kWh/m^3 ηλεκτρικής ενέργειας. Ενδεικτικά, με τη διάθεση 5.000 MWh από την ετήσια περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας για το σκοπό αυτό, η ετήσια παραγωγή γλυκού νερού

ανέρχεται στα 1.250.000 m^3 ετησίως. Ας σημειωθεί ότι σήμερα η ετήσια παραγωγή γλυκού νερού από τις δημοτικές υποδομές της Σίφνου ανέρχεται στα 600.000 m^3, η οποία καταναλώνεται σχεδόν αποκλειστικά σε οικιακή χρήση και στον τριτογενή τομέα (τουρισμός). Γίνεται κατανοητό με βάση τα ανωτέρω νούμερα ότι η επιπρόσθετη αυτή διαθεσιμότητα νερού, διπλάσια από τη σημερινή, μπορεί να αποτελέσει τη βάση για την ανάπτυξη νέων επαγγελματικών και παραγωγικών δραστηριοτήτων στο νησί, όπως η βιολογική κτηνοτροφία και γεωργία, οι οποίες σήμερα δεν είναι εφικτό να αναπτυχθούν ακριβώς λόγω έλλειψης νερού. Οι νέες αυτές δραστηριότητες θα επιτρέψουν την απαγκύστρωση της σχεδόν καθολικής εξάρτησης της νησιωτικής οικονομίας από τον τουρισμό.

Επιπλέον, μία τυπική εμπορική μονάδα ηλεκτρόλυσης εμφανίζει ειδική κατανάλωση για την παραγωγή υδρογόνου 4,75 kWh/Nm^3 [6]. Με τη διάθεση, ενδεικτικά, 10.000 MWh από την περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας για το σκοπό αυτό, είναι δυνατή η ετήσια παραγωγή περίπου 2.100.000 Nm^3 υδρογόνου. Με πυκνότητα υδρογόνου σε πρότυπες συνθήκες πίεσης 1 atm και θερμοκρασίας 0 ^oC (standard temperature and pressure conditions – STP) στα 0,0887 kg/Nm^3 [7], ο ανωτέρω όγκος αντιστοιχεί σε 186.740 kg υδρογόνου. Αν δεχτούμε ότι ένα σκάφος μήκους 13,1 m με ικανότητα μεταφοράς 40 επιβατών και ικανότητα πλεύσης με ανέμους μέχρι και 6 μποφόρ έχει μέση κατανάλωση 2,5 kg/nm, τότε η ανωτέρω ποσότητα μπορεί να εξασφαλίσει την κάλυψη περίπου 74.500 nm ετησίως. Η απόσταση Πλατύ Γυαλού – Πολλώνια στη Μήλο είναι 15 nm, ενώ με το λιμάνι της Παροικιάς στην Πάρο είναι 22 nm. Επίσης ένα κυκλικό ενδοκυκλαδικό δρομολόγιο Πλατύς Γυαλός – Πολλώνια – Παροικιά – Ερμούπολη – Πλατύς Γυαλός έχει μήκος 110 nm. Με τη συνολική ετήσια δυνάμενη κάλυψη των 74.700 nm, το εν λόγω δρομολόγιο μπορεί να εκτελεστεί 680 φορές ετησίως. Γίνεται λοιπόν αντιληπτό ότι η δυνάμενη να παραχθεί ποσότητα υδρογόνου από την περίσσεια ενέργειας του υβριδικού σταθμού είναι ικανή να εξασφαλίσει την καθημερινή ακτοπλοϊκή σύνδεση του νησιού με τα σημαντικά κέντρα του Νομού Κυκλάδων, με μόνη παράμετρο αποκλεισμού τις καιρικές συνθήκες.

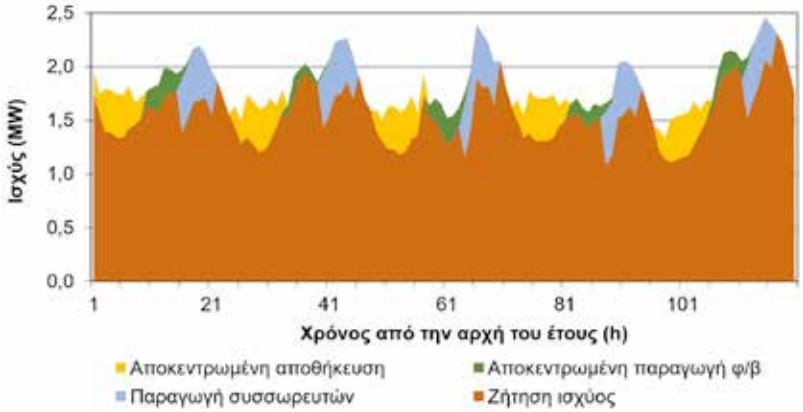
Τα ανωτέρω καταδεικνύουν την πολύπλευρη συμβολή του υβριδικού σταθμού Σίφνου στην κάλυψη του συνόλου των ενεργειακών αναγκών στο νησί αλλά και στη δημιουργία σημαντικών αναπτυξιακών προοπτικών. Προφανώς για να είναι εφικτή η αξιοποίηση της περίσσειας αυτής ηλεκτρικής ενέργειας και της ανάπτυξης των αντίστοιχων δράσεων, απαιτείται η πρότερη ανάπτυξη σχετικών υποδομών, όπως δίκτυα και δεξαμενές αποθήκευσης πόσιμου νερού, μονάδες ηλεκτρόλυσης και δεξαμενές αποθήκευσης υδρογόνου κλπ. Οι υποδομές όμως αυτές είναι εφικτό να υλοποιηθούν με την επένδυση των καθαρών κερδών από τη λειτουργία του υβριδικού σταθμού και με την ένταξη των έργων αυτών ως πιλοτικά και καινοτόμα σε εθνικά και πανευρωπαϊκά χρηματοδοτικά προγράμματα.

Ας σημειωθεί, ακόμα, ότι όλα τα ανωτέρω θα συνδυαστούν αναπόφευκτα από παράλληλες δράσεις εξοικονόμησης ενέργειας, μέσα από χρηματοδοτικά προγράμματα που συνεχώς θα είναι διαθέσιμα τα επόμενα έτη είτε για δημοτικές υποδομές είτε για ιδιωτικές καταναλώσεις (π.χ. το πρόγραμμα Εξοικονομώ – Αυτονομώ). Η αναμενόμενη εξοικονόμηση ενέργειας που θα προκύψει από αυτές τις δράσεις θα οδηγήσει σε αύξηση των περιθωρίων ανάπτυξης των νέων επαγγελματικών δραστηριοτήτων στο νησί, οι οποίες λογικά θα προκαλέσουν νέες ενεργειακές καταναλώσεις.

Για παράδειγμα, η ανάπτυξη έξυπνων δικτύων με κάποιες βασικές λειτουργικές δυνατότητες, όπως αποκεντρωμένη παραγωγή και αποθήκευση ενέργειας, εφόσον βέβαια τούτο επιτραπεί από την αναμενόμενη μείωση του κόστους προμήθειας των ηλεκτροχημικών συσσωρευτών, θα επιτρέψει την εξομάλυνση του ημερήσιου προφίλ ζήτησης ισχύος και θα αυξήσει την ευελιξία λειτουργίας του υβριδικού σταθμού Σίφνου. Ενδεικτικά στην εικόνα 5 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της εφαρμογής της στρατηγικής αποκεντρωμένης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκούς σταθμούς με στόχο τον ετήσιο συμψηφισμό παραγωγής – κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας και της αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας σε αποκεντρωμένους ηλεκτροχημικούς συσσωρευτές. Έστω ότι 200 οικογένειες στη Σίφνο εγκαθιστούν από ένα φωτοβολταϊκό σταθμό ονομαστικής ισχύος 3 kW, ενώ 100 οικογένειες εγκαθιστούν μία μπαταρία με αποθηκευτική ικανότητα 10 kWh και ικανότητα φόρτισης – εκφόρτισης 10 kW, μέσω της οποίας εκτελείται αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας κατά τις ώρες χαμηλής ζήτησης ισχύος και παραγωγή κατά τις ώρες αιχμές. Το αποτέλεσμα της συνδυασμένης αυτής αποκεντρωμένης παραγωγής και αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας παρουσιάζεται στην εικόνα 5, όπου είναι ευδιάκριτη πρακτικά η απαλοιφή των ημερήσιων αιχμών ζήτησης ισχύος.

Η αποκεντρωμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά πλαίσια με στόχο τον ετήσιο συμψηφισμό της κατανάλωσης εμφανίζει περιόδους αποπληρωμής της τάξης των 5 – 6 ετών. Η αποκεντρωμένη αποθήκευση με τα σημερινά κόστη προμήθειας και τη διαθέσιμη διάρκεια ζωής των ηλεκτροχημικών συσσωρευτών πρακτικά δεν αποπληρώνεται. Η οικονομική σκοπιμότητα αυτής της δράσης προϋποθέτει την πτώση της τιμής προμήθειας των ηλεκτροχημικών συσσωρευτών στα 100 €/kWh αποθηκευτικής χωρητικότητας, με τη διάρκεια ζωής τους στα 10 έτη. Στην περίπτωση αυτή η περίοδος αποπληρωμής τους, υποθέτοντας ένα καθαρό οικονομικό όφελος του κύκλου φόρτισης –

εκφόρτισης της μπαταρίας στα 0,09 €/kWh, εκτιμάται στα 5 έτη. Η επικουρική αυτή λειτουργία του έξυπνου δικτύου θα εξασφαλίσει σημαντική ευελιξία στη λειτουργία του υβριδικού σταθμού, θα αυξήσει επιπλέον των μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας το περιθώριο ένταξης νέων φορτίων στο νησί και θα επιτρέψει την αξιοποίηση της περίσσειας ενέργειας από τον υβριδικό σταθμό για την κάλυψη των νέων αναμενόμενων φορτίων (αφαλάτωση, παραγωγή υδρογόνου, ηλεκτροκίνηση, νέες επαγγελματικές – παραγωγικές δραστηριότητες).



Εικόνα 5: Απαλοιφή αιχμών ισχύος στη Σίφνο μέσω της αποκεντρωμένης παραγωγής και αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας.

Τέλος, αναφορικά με τη συμβολή του υβριδικού σταθμού στην ανάπτυξη της Σίφνου, θα ήταν σημαντική παράλειψη να μην αναφερθεί και η αναμενόμενη ενίσχυση του προσφερόμενου τουριστικού προϊόντος στο νησί, καθώς το ίδιο αυτό το έργο, εντασσόμενο ως βασικός πυλώνας στην ευρύτερη ενεργειακή μετάβαση του νησιού, θα αποτελέσει λογικά έναν ισχυρό λόγο σημαντικής αύξησης της τουριστικής επισκεψιμότητας, υπό την προϋπόθεση της επαρκούς και στοχευμένης προβολής της Σίφνου ως το πρώτο νησί παγκοσμίως που θα έχει επιτύχει την 100% ενεργειακή μετάβαση στις καθαρές μορφές ενέργειας, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα ενεργειακή δημοκρατία.

4. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ

4.1. Η πιθανή διασύνδεση της Σίφνου

Έχει προκύψει γενικά το ερώτημα για τη σκοπιμότητα υλοποίησης του υβριδικού σταθμού και την οικονομική βιωσιμότητά του στην περίπτωση διασύνδεσης της Σίφνου. Καταρχήν, παρόλο που σε καμία περίπτωση δεν αμφισβητείται η τεχνική αναγκαιότητα για την ηλεκτρική διασύνδεση της νήσου, από την άλλη μεριά τούτη δεν μπορεί να εγγυηθεί την ασφάλεια στην ενεργειακή τροφοδοσία του νησιού, με βάση τις καταγεγραμμένες αστοχίες – βλάβες που έχουν προκύψει σε νησιά διασυνδεδεμένα είτε με γειτονικά τους είτε με το ηπειρωτικό δίκτυο. Τέτοιες περιπτώσεις έχουν σημειωθεί στα νησιά Άραν της Ιρλανδίας (5/8/2016) [8], στη Μινόρκα των Βαλεαρίδων Νήσων στην Ισπανία (23/5/2015 και τον Οκτώβριο του 2017) [9], στην Τήλο (17/1/2016) και στην Κάσο (25/7/2003), κατά τις οποίες τα ανωτέρω νησιά έμειναν χωρίς παροχή ηλεκτρικής ενέργειας η Τήλος για 1 μέρα, τα Νησιά Άραν για 3 ημέρες και η Κάσος και 6 μέρες. Τα ανωτέρω παραδείγματα καταδεικνύουν ότι ο μόνος τρόπος για να εξασφαλιστεί η αδιάλειπτη παροχή ισχύος σε ένα νησιωτικό σύστημα είναι η διατήρηση εγγυημένης παραγωγής σε αυτό. Εγγυημένη παραγωγή μπορεί να διατεθεί είτε με τη διατήρηση των θερμοηλεκτρικών μονάδων σε κατάσταση ψυχρής εφεδρείας είτε με την εγκατάσταση τεχνολογιών αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Η πρώτη επιλογή θα συνεπάγεται ότι πρακτικά ο διαχειριστής θα χρειαστεί να επωμιστεί το σταθερό κόστος παραγωγής (121,45 €/MWh). Αν σε αυτό προστεθεί και το κόστος παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας από το διασυνδεδεμένο σύστημα, το οποίο μαζί με τις απώλειες μεταφοράς εκτιμάται στα 60 €/MWh, το συνολικό κόστος παραγωγής στο νησί αναμένεται να διαμορφωθεί μεγαλύτερο των 180 €/MWh. Με αυτό τον τρόπο λοιπόν, αφενός δεν επιτυγχάνεται, τουλάχιστον στο βαθμό που τούτο ίσως θα ήταν επιθυμητό, η μείωση του κόστους παραγωγής στο νησί, ενώ επιπλέον η παραγωγή εγγυημένης ισχύος σε αυτό παραμένει εξαρτώμενη

από τεχνολογίες καύσης υδρογονανθράκων, άρα καταρρίπτεται ο στόχος της απεξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα και της επίτευξης ενεργειακής ανεξαρτησίας.

Την ίδια στιγμή η σκοπιμότητα ένταξης τεχνολογιών αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας έχει ήδη αναγνωριστεί από το Υπουργείο Ενέργειας ως απαραίτητη για την ασφαλή ένταξη της ολοένα αυξανόμενης εγκατεστημένης ισχύος από τις μονάδες ΑΠΕ, με τις σχετικές εξαγγελίες του Υπουργού για άνοιγμα αντίστοιχης επενδυτικής επιλογής μέσω των διαδικασιών της Ρυθμιστικής Αρχής Ενέργειας. Η θέσπιση έργων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας για το διασυνδεδεμένο σύστημα και η εξασφάλιση της οικονομικής βιωσιμότητάς τους πρακτικά εξασφαλίζει και την τεχνική σκοπιμότητα και οικονομική βιωσιμότητα και του αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού στη Σίφνο, ακόμα και στην περίπτωση διασύνδεσή της πριν την ολοκλήρωση της κατασκευής του έργου ως υβριδικός σταθμός.

4.2. Η τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας

Στον πίνακα 3 παρουσιάζεται η επίδραση της τιμής πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας από τον υβριδικό σταθμό στην οικονομική απόδοση της επένδυσης, μέσα από τυπικούς οικονομικούς δείκτες. Σημειώνεται ότι το συνολικό κόστος της επένδυσης εκτιμάται, βάσει της σχετικής αίτησης για έκδοση άδειας παραγωγής, στα 37.255.000 €, ενώ το χρηματοδοτικό σχήμα θεωρείται 13% ίδια κεφάλαια και 87% τραπεζικός δανεισμός με περίοδο αποπληρωμής 15 έτη και επιτόκιο δανεισμού 1,5%. Οι οικονομικοί δείκτες υπολογίζονται ως προς τα ίδια κεφάλαια της επένδυσης.

Πίνακας 3: Επίδραση τιμής πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας από τον υβριδικό σταθμό στην οικονομική απόδοσή του.

Τιμή πώλησης (€/kWh)	Οικονομικοί δείκτες					
	Περίοδος αποπληρωμής (έτη)	Έντοκη περίοδος αποπληρωμής (έτη)	IRR (%)	NPV (€)	ROI (%)	ROE (%)
0,18	> 20	> 20	-1,3	-4.161.682	1,6	12,4
0,20	19,0	> 20	1,6	-1.373.986	9,1	71,1
0,22	17,0	18,2	5,6	2.414.699	19,2	150,8
0,24	15,3	15,9	9,9	6.203.385	29,4	230,6
0,26	8,2	9,7	14,5	9.992.071	39,6	310,4

Παρατηρείται η ισχυρή εξάρτηση της οικονομικής βιωσιμότητας του εγχειρήματος από την τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας, όπως άλλωστε ήταν αναμενόμενο. Με τις νομοθετικές αλλαγές που έλαβαν χώρα εντός του 2020 η άδεια παραγωγής του υβριδικού σταθμού εκδόθηκε χωρίς ταυτόχρονα να έχει οριστεί η τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας από αυτόν. Τούτη, βάσει του νόμου 4685/2020 [10], θα καθοριστεί με απόφαση Υπουργού, χωρίς όμως να ορίζονται οι παράμετροι και τα κριτήρια ορισμού της. Η υλοποίηση συνεπώς του έργου του υβριδικού σταθμού με όλες τις αναμενόμενες αναπτυξιακές προοπτικές που αναφέρθηκαν και τεκμηριώθηκαν παραπάνω, παραμένει μετέωρη όσο δεν είναι γνωστή η τιμή πώλησης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

Η οικονομική βιωσιμότητα του υβριδικού σταθμού, βάσει των στοιχείων του πίνακα 3, εξασφαλίζεται με μία τιμή της τάξης των 0,26 €/kWh, η οποία δεν είναι σημαντικά υψηλότερη από το αντίστοιχο κόστος των 180 €/MWh που αφορά στη διάθεση της ηλεκτρικής ενέργειας από το διασυνδεδεμένο δίκτυο με ταυτόχρονη διατήρηση της εγγυημένης παραγωγής ισχύος από τις θερμοηλεκτρικές μονάδες. Ας σημειωθεί ακόμα ότι η ανωτέρω τιμή αρκεί να διατεθεί για το χρονικό διάστημα αποπληρωμής των δανειακών υποχρεώσεων, δηλαδή για μία περίοδο της τάξης των 15 ετών. Από κει και πέρα η τιμή πώλησης θα μπορούσε κάλλιστα να μειωθεί σε επίπεδα της τάξης του 0,15 €/kWh, με το δεδομένο ότι η βασική υποδομή της μονάδας αποθήκευσης έχει διάρκεια ζωής πολλών δεκαετιών. Αποδεικνύεται λοιπόν ότι με το προτεινόμενο σύστημα επιτυγχάνεται η χαμηλότερη τιμή διάθεσης ηλεκτρικής ενέργειας στους τελικούς καταναλωτές, με ταυτόχρονη εξασφάλιση εγγυημένης παραγωγής ισχύος στο νησί και ολική απεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα. Επιπλέον, παρέχονται όλες οι προαναφερόμενες αναπτυξιακές προοπτικές στη Σίφνο. Ας σημειωθεί επίσης ότι με βάση ειδικότερα το κόστος κατασκευής του αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού, το οποίο εκτιμάται στα 25.800.000 € και την επιτευχθείσα αποθηκευτική χωρητικότητα (860 MWh), το ειδικό κόστος κατασκευής της μονάδας αποθήκευσης υπολογίζεται στα 0,30 €/kWh αποθηκευτικής χωρητικότητας.

Τέλος, θα ήταν μέγιστο σφάλμα από την πλευρά της Ελληνικής Πολιτείας η αντιμετώπιση της πρωτοβουλίας της Συνεταιριστικής Εταιρείας Σίφνου υπό το ίδιο πρίσμα με τους ιδιώτες επενδυτές οι οποίοι έχουν λάβει άδεια παραγωγής για 4 μικρούς υβριδικούς σταθμούς στο νησί, αποτελούμενους από φωτοβολταϊκά πλαίσια και τεχνολογίες ηλεκτροχημικής αποθήκευσης. Τα έργα αυτά αφορούν καθαρά κερδοσκοπικές κινήσεις από φορείς που εν γένει δραστηριοποιούνται στο χώρο με σωρεία υποβολής παρόμοιων αιτήσεων σε πλήθος ελληνικών νησιών. Τέτοιες κινήσεις δεν έχουν καμία σχέση με το στόχο και το όραμα της Συνεταιριστικής Εταιρείας Σίφνου, η οποία θα πρέπει να αντιμετωπιστεί στην πραγματική διάστασή της, ως ένα δηλαδή από τα τρία πρώτα πιλοτικά νησιά της Ευρωπαϊκής Επιτροπής και ως πρότυπο αποκεντρωμένης ανάπτυξης εκ της βάσης για τις νησιωτικές κοινότητες.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η Συνεταιριστική Εταιρεία Σίφνου, μέσω της εν γένει σχεδίασης της ενεργειακής μετάβασης στο νησί με πυλώνα τον υβριδικό σταθμό Σίφνου, κατάφερε να αναδείξει τη Σίφνο σε πανευρωπαϊκό επίπεδο. Το προτεινόμενο έργο με τις συγκεκριμένες τεχνολογίες είναι το μόνο που μπορεί να εγγυηθεί ομαλή, ασφαλή και οικονομικά βιώσιμη ενεργειακή μετάβαση στο νησί. Παράλληλα, λόγω του χαρακτήρα του, της υψηλής προστιθέμενης αξίας και της μεγάλης αποθηκευτικής ικανότητας, δημιουργεί σημαντικές αναπτυξιακές προοπτικές στο νησί. Ο προτεινόμενος υβριδικός σταθμός, υπό την προϋπόθεση ορισμού της τιμής πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας περίπου στα 0,26 €/kWh, παρουσιάζει περίοδο αποπληρωμής της τάξης των 8 ετών, προσφέροντας υψηλή αποθηκευτική ικανότητα 860 MWh, η οποία συνεπάγεται περίοδο αυτονομίας 16 ημερών. Η Ελληνική Πολιτεία οφείλει να στηρίξει την πρωτοβουλία της Συνεταιριστικής Εταιρείας Σίφνου αλλά και των υπόλοιπων ενεργειακών κοινοτήτων ευρείας βάσης στην Ελλάδα, με τη θέσπιση ειδικής τιμολογιακής πολιτικής και προτεραιότητας στην αδειοδότηση. Η ορθολογική και αποδοτική αξιοποίηση των ΑΠΕ από τις ενεργειακές κοινότητες ευρείας βάσης με ισχυρό αναπτυξιακό προσανατολισμό μπορεί να αποτελέσει τη βάση για την κοινωνική και οικονομική ανάπτυξη της χώρας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Διαχειριστής του Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας. Διεύθυνση Διαχείρισης Νησιών. Τεχνικά και οικονομικά στοιχεία του αυτόνομου ηλεκτρικού συστήματος Σίφνου. Αθήνα 2016.

[2] Clean Energy for EU Islands. Sifnos Island Clean Energy Transition Agenda. Version October 2019. https://euislands.eu/document/clean-energy-transition-agenda-sifnos (τελευταία πρόσβαση: 18/3/2021).

[3] Katsaprakakis, D. Al., Christakis, D G., Stefanakis, I., Spanos, P. and Stefanakis, N., 2013, "Technical details regarding the design, the construction and the operation of seawater pumped storage systems", Energy, 55, pp. 619-630.

[4] Katsaprakakis, D. Al., 2012, "A review of the environmental and human impacts from wind parks. A case study for the Prefecture of Lasithi, Crete". Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(5), pp. 2850-2863.

[5] Katsaprakakis, D. Al., Dakanali, I., Condaxakis, C., Christakis, D. G., 2019, "Comparing electricity storage technologies for small insular grids", Applied Energy, 251(1), 113332.

[6] Katsaprakakis D. Al., "Power Plant Synthesis", CRC Press, 1st edition, June 2020, Boca Raton, Florida, USA.

[7] Hydrogen tools. Hydrogen Density at different temperatures and pressures. https://h2tools.org/hyarc/hydrogen-data/hydrogen-density-different-temperatures-and-pressures (τελευταία πρόσβαση: Μάρτιος 2021).

[8] Thejournal.ie: ESB restores power to the Aran Islands. https://www.thejournal.ie/aran-islands-power-2915463-Aug2016/ (last accessed on 5/1/2021).

[9] NewEurope: Power outage plunges entire Spanish island of Menorca in Mediterranean into darkness. https://www.neweurope.eu/wires/power-outage-plunges-entire-spanish-island-of-menorca-in-mediterranean-into-darkness/ (last accessed on 5/1/2021).

[10] Νόμος 4685/2020 - ΦΕΚ 92/Α/7-5-2020, «Εκσυγχρονισμός περιβαλλοντικής νομοθεσίας, ενσωμάτωση στην ελληνική νομοθεσία των Οδηγιών 2018/844 και 2019/692 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου και λοιπές διατάξεις.»

ΑΓΡΟΤΙΚΕΣ ΧΡΗΣΕΙΣ ΣΕ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑΚΟΥ ΤΥΠΟΥ ΜΕ ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΣΤΗΝ ΟΡΟΦΗ

Αναστασία Μαρτζοπούλου[1]*, Βασίλειος Φιρφιρής[2], Θωμάς Κωτσόπουλος[2]

[1]* Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή ΑΠΘ,
[2] Τμήμα Γεωπονίας, Σχολή Γεωπονίας, Δασολογίας και Φυσικού Περιβάλλοντος, ΑΠΘ
e-mail: amartzopoulou@arch.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι περιοχές της Μεσογείου και της Βόρειας Αφρικής χαρακτηρίζονται από έντονη ηλιοφάνεια με ταυτόχρονη έλλειψη βροχοπτώσεων με αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση των αποθεμάτων νερού και τον περιορισμό της αγροτικής δραστηριότητας. Σήμερα υπάρχουν συστήματα αφαλάτωσης που θα μπορούσαν να υποστηρίξουν την παραγωγή νερού για αγροτικές χρήσεις. Εντούτοις, τα συστήματα αυτά, χαρακτηρίζονται ακόμα από σχετικά υψηλό κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας και δεν προσφέρονται ιδιαίτερα για απομονωμένες περιοχές.

Η παρούσα εργασία προτείνει την ανάπτυξη και λειτουργία μιας καινοτόμου και βιώσιμης θερμοκηπιακού τύπου κατασκευής που αξιοποιεί την οροφή της για την παραγωγή νερού άρδευσης, με τη μέθοδο της ηλιακής αφαλάτωσης, και ταυτόχρονη αξιοποίηση του παραγόμενου νερού σε αγροτική δραστηριότητα που μπορεί να αναπτυχθεί εντός και εκτός του θερμοκηπιακού χώρου. Ο σχεδιασμός και η λειτουργία μιας τέτοιας μονάδας αποσκοπεί στην παραγωγή νερού άρδευσης σε άνυδρες περιοχές, δημιουργώντας σημαντικά περιβαλλοντικά και κοινωνικά οφέλη τα οποία εστιάζονται στην εξοικονόμηση και προστασία των υδάτινων πόρων των περιοχών αυτών καθώς επίσης και στην ανάπτυξη αγροτικής οικονομικής δραστηριότητας σε συνθήκες ανομβρίας.

Βασικός σκοπός της εργασίας είναι η μελέτη των αγροτικών χρήσεων και κυρίως των κτηνοτροφικών που μπορεί να υποδεχθεί αυτή η πρότυπη θερμοκηπιακή κατασκευή. Λαμβάνοντας υπόψη τις εσωτερικές συνθήκες περιβάλλοντος (θερμοκρασία, υγρασία, αερισμό, φωτισμό) που δημιουργούνται στην προτεινόμενη μονάδα αλλά και αυτές που απαιτούνται για τη ζωική παραγωγή μελετώνται και προτείνονται οι χρήσεις που μπορεί να παραλάβει η συγκεκριμένη κατασκευή καθώς και οι αντίστοιχες σχεδιαστικές προτάσεις προκειμένου να επιτυγχάνονται οι βέλτιστες συνθήκες ανάπτυξης των παραγωγικών ζώων. Η λειτουργία ενός τέτοιου καινοτόμου συστήματος θερμοκηπίου για συνδυασμένη αγροτική χρήση και παραγωγή νερού άρδευσης δημιουργεί την ευκαιρία στις τοπικές κοινωνίες να επωφεληθούν από την αύξηση των τοπικά παραγόμενων προϊόντων σε χαμηλότερες τιμές, και από την αναβάθμιση και αξιοποίηση άνυδρων εκτάσεων που προηγουμένως δεν είχαν άλλη χρήση.

Λέξεις Κλειδιά: *Άνυδρες περιοχές, νερό άρδευσης, θερμοκήπιο, ηλιακή αφαλάτωση, ενίσχυση αγροτικής οικονομίας*

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αφαλάτωση αποτελεί αντικείμενο παγκόσμιας συζήτησης και η εφαρμογή της είναι διαρκώς αυξανόμενη προκειμένου να καλύψει τις ανάγκες γλυκού νερού σε περιοχές άνυδρες που παρουσιάζουν έλλειψη βροχοπτώσεων ή και σημαντική μείωση αποθεμάτων νερού [1], όπως οι περιοχές της Μεσογείου και της Βόρειας Αφρικής. Σύμφωνα με αναφορά του Οργανισμού Ηνωμένων Εθνών για την Παγκόσμια Ανάπτυξη Νερού το 2014 [2] υπήρχαν πάνω από 16.000 εγκαταστάσεις αφαλάτωσης παγκοσμίως με συνολική παγκόσμια λειτουργική ικανότητα περίπου 70 εκατομμυρίων m^3 / ημέρα. Σήμερα η αφαλάτωση βρίσκει μεγάλη εφαρμογή κυρίως στις περιοχές της Μέσης Ανατολής και της Βόρειας Αφρικής (70% της παγκόσμιας ικανότητας).

Η αφάλατωση είναι μια ενεργοβόρα διαδικασία με αποτέλεσμα το λειτουργικό κόστος να είναι αρκετά υψηλό. Γενικά το κόστος επένδυσης και λειτουργίας είναι ιδιαίτερα υψηλό κάνοντας την αφαλάτωση μη κατάλληλη για τομείς μεγάλης κατανάλωσης νερού όπως η άρδευση στον αγροτικό τομέα [2]. Ο Διεθνής Σύνδεσμος Αφαλάτωσης θέτει στόχους μείωσης της ενεργειακής κατανάλωσης μέσω τεχνολογιών όπως αυτή της ηλιακής αφαλάτωσης η οποία θεωρείται ιδανική για άνυδρες περιοχές [2].

Η εργασία αυτή, η οποία προκύπτει από το ερευνητικό έργο “Καινοτόμο Σύστημα Θερμοκηπίου για Συνδυασμένη Αγροτική Χρήση και Παραγωγή Νερού Άρδευσης – IRISS” έχει ως κύριο στόχο τη δημιουργία μιας καινοτόμου μονάδας μορφής θερμοκηπίου για παραγωγή νερού για αγροτικές χρήσεις με χαμηλό κόστος επένδυσης και λειτουργίας και ταυτόχρονη αξιοποίηση του χώρου της μονάδας για στέγαση αγροτικών ζώων, καλλιέργεια ή αποθήκευση. Δεδομένης της ανάγκης της ενεργειακής μετάβασης για μεταστροφή της οικονομίας με χρήση ΑΠΕ, και των επιπτώσεων από την κλιματική αλλαγή, (ξηρασία, έλλειψη αποθεμάτων νερού, κάλυψη διατροφικών αναγκών για έναν εκθετικά αυξανόμενο πληθυσμό) η ιδέα της ανάπτυξης δραστηριοτήτων καλλιέργειας, στέγασης παραγωγικών ζώων ή αποθήκευσης, με ταυτόχρονη παραγωγή νερού άρδευσης, σε έναν ενιαίο χώρο καθώς και η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας στο στάδιο της αφαλάτωσης για την παραγωγή νερού άρδευσης αποτελεί βασική καινοτομία στο πλαίσιο αυτό. Η ιδέα είναι επίσης σημαντική καθώς επιτυγχάνεται η εφαρμογή ενός συστήματος αφαλάτωσης με μειωμένο κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας συγκριτικά με άλλα συστήματα αφαλάτωσης.

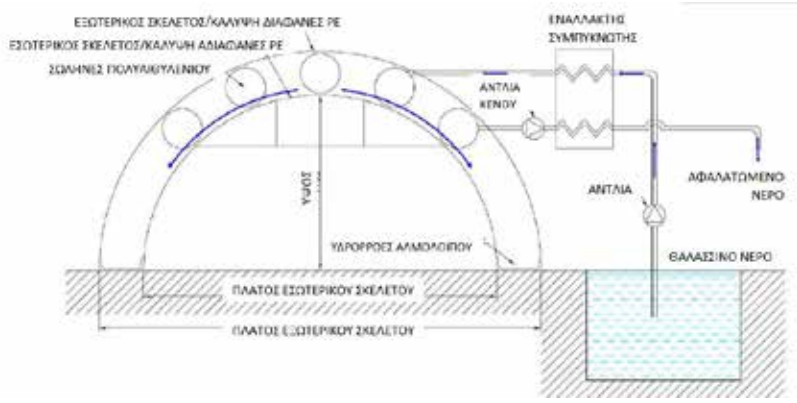
Προκειμένου να επιτευχθεί η συνδυαστική χρήση της πρότυπης αυτής κατασκευής διερευνώνται οι πιθανές χρήσεις του θερμοκηπιακού χώρου που υπάρχει κάτω από την εγκατεστημένη μονάδα ηλιακής αφαλάτωσης μελετώντας την καταλληλόλητα των συνθηκών μέσα στον χώρο αυτόν (θερμοκρασία, ποσοστό υγρασίας, αερισμό κλπ) για την αξιοποίησή του. Οι περιπτώσεις που διερευνώνται στο πλαίσιο του έργου εντάσσονται στις κατηγορίες της στέγασης παραγωγικών ζώων, αποθήκευσης και καλλιεργητικών δραστηριοτήτων. Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στη μελέτη στέγασης παραγωγικών ζώων σε θερμοκηπιακού τύπου κατασκευή με σύστημα ηλιακής αφαλάτωσης στην οροφή.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1. Η θερμοκηπιακού τύπου κατασκευή με το σύστημα ηλιακής αφαλάτωσης

Η πρότυπη καινοτόμος μονάδα, με τη μορφή θερμοκηπίου, της οποίας η οροφή λειτουργεί ως ηλιακός αφαλατωτής για την παραγωγή νερού άρδευσης που αναπτύσσεται εντός και εκτός του θερμοκηπιακού χώρου, εγκαταστάθηκε σε παράκτια περιοχή του αγροκτήματος του ΑΠΘ. Η προτεινόμενη μονάδα απαρτίζεται από τα ακόλουθα τρία τμήματα: i) το σύστημα εξάτμισης του θαλασσινού ή υφάλμυρου νερού, ii) το σύστημα εναλλάκτη-συμπυκνωτή για ταυτόχρονη προθέρμανση του θαλασσινού νερού και συμπύκνωση των ατμών του καθαρού νερού και iii) τη θερμοκηπιακή κατασκευή. Η μονάδα θερμοκηπιακού τύπου αποτελείται από διπλό σκελετό, τριπλό υλικό κάλυψης και μόνωση. Ο εξωτερικός σκελετός έχει κάλυψη από μονό πλαστικό πολυαιθυλένιο, διαφανές με υψηλή διαπερατότητα στο φως (άνω του 93%). Ο εσωτερικός σκελετός έχει κάλυψη από δύο φύλλα πλαστικό πολυαιθυλένιο αδιαφανές, με μία πλευρά άσπρη και μία μαύρη. Το έξω φύλλο έχει την μαύρη πλευρά προς τα πάνω και το έσω, ανάλογα με την χρήση του εσωτερικού χώρου, είτε την άσπρη είτε την μαύρη. Ανάμεσα σε αυτά τα δύο φύλλα πλαστικού, υπάρχει μόνωση υαλοβάμβακα. Το θαλασσινό ή υφάλμυρο νερό περνάει από εναλλάκτη, όπου προθερμαίνεται, και στη συνέχεια διασπείρεται σε μεγάλο αριθμό σταγονιδίων εντός σωλήνα πολυαιθυλενίου για την εξάτμισή

τους που είναι τοποθετημένος στο διάκενο μεταξύ του διπλού σκελετού όπου επιτυγχάνεται η αύξηση της θερμοκρασίας λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας (Σχήμα 1).



Σχήμα 1: .Κάθετη τομή της θερμοκηπιακής κατασκευής, με εγκατεστημένο το σύστημα της ηλιακής αφαλάτωσης στην οροφή.

Εικόνα 1. Η πειραματική κατασκευή με τις διαστάσεις της, την εξωτερική και εσωτερική όψη των αγωγών αερισμού

Σχήμα 2. Τομή του πειραματικού θερμοκηπίου και ο εξοπλισμός χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας της κατασκευής για τη διατήρηση των συνθηκών στο εσωτερικό της για την αποφυγή υψηλών θερμοκρασιών και τη ρύθμιση της υγρασίας.

Για τις ανάγκες μελέτης χρήσης του εσωτερικού χώρου της πρότυπης μονάδας κατασκευάστηκε μια αντίστοιχη μονάδα στην περιοχή του Αγροκτήματος ΑΠΘ η οποία απεικονίζεται με τις διαστάσεις της στην Εικόνα 1. Στο Σχήμα 2 παρουσιάζονται η τομή και ο εξοπλισμός χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας της κατασκευής για τη διατήρηση των συνθηκών στο εσωτερικό της (αποφυγή υψηλών θερμοκρασιών και ρύθμιση της υγρασίας). Η πειραματική διάταξη αποτελείται από σκελετό γαλβανισμένου χάλυβα και η κάλυψη του έχει γίνει με άσπρο-μαύρο πολυμερές με συντελεστή θερμοπερατότητας U = 6,7 W/m^{2}K.

2.2. Συνθήκες στέγασης παραγωγικών ζώων

Η ενεργητικότητα, η υγεία και η απόδοση των παραγωγικών ζώων εξαρτώνται κατά ένα μεγάλο ποσοστό από τις άμεσες επιδράσεις του κλιματικού τους περιβάλλοντος. Οι παράμετροι του κλιματικού περιβάλλοντος δρουν μεμονωμένα ή σε συνδυασμό μεταξύ τους και διακρίνονται σε θερμικές και χημικές. Το θερμικό περιβάλλον περιλαμβάνει τη θερμοκρασία, την υγρασία, την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και την κίνηση του αέρα, ενώ το χημικό περιβάλλον περιλαμβάνει τα αέρια, τους ατμούς, τη σκόνη και τις μυρωδιές.

Το θερμικό ισοζύγιο ενός ζώου και του περιβάλλοντος του ρυθμίζεται από την επίδραση των παραπάνω στοιχείων καθώς και από την ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ ζώου και περιβάλλοντος. Το θερμικό ισοζύγιο των ζώων εκφράζεται με βάση τους νόμους της θερμοδυναμικής και συγκεκριμένα με την ακόλουθη εξίσωση [3]:

$$MHP \pm J \pm q_{rt} \pm q_{cv} \pm q_{cd} - EHL = WC_p (dT_b / dt) \quad (1)$$

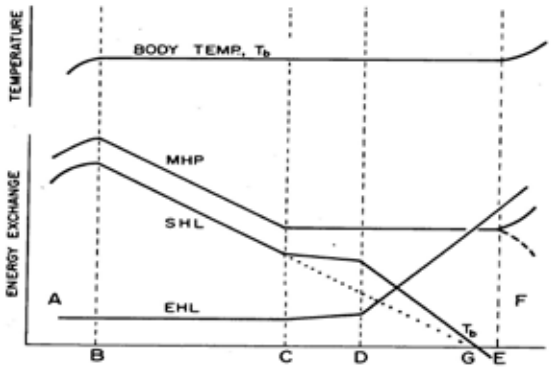
Όπου:

MHP = θερμότητα παραγόμενη από το μεταβολισμό
J = θερμότητα παραγόμενη από την ενεργητικότητα του ζώου
q_{rt} = μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία
q_{cv} = μετάδοση θερμότητας με συναγωγή
q_{cd} = μετάδοση θερμότητας με αγωγή
EHL = απώλεια θερμότητας με εξάτμιση
W = βάρος σώματος
C_p = ειδική θερμότητα της μάζας του σώματος
T_b = θερμοκρασία σώματος
t = χρόνος

2.2.1. Επίδραση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος

Η θερμοκρασία περιβάλλοντος επηρεάζει άμεσα τις απώλειες θερμότητας των ζώων. Αυτές οι απώλειες θερμότητας μέσα στο στάβλο επηρεάζουν στη συνέχεια τη θερμοκρασία και υγρασία του περιβάλλοντος. Στο Σχήμα 3 δίνεται ένα διάγραμμα ιδιαίτερα απλοποιημένο το οποίο παρουσιάζει τις συσχετίσεις μεταξύ της παραγόμενης θερμότητας μεταβολισμού (MHP), της αισθητής απώλειας θερμότητας (SHL), της απώλειας θερμότητας λόγω εξάτμισης (EHL) και της θερμοκρασίας του σώματος (T_b), όλες σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος. Το διάγραμμα αυτό, παρουσιάζει επίσης τις ανταλλαγές ενέργειας ανάμεσα στα αγροτικά ζώα και το θερμικό μικροπεριβάλλον σε γενικές γραμμές. Οι πραγματικές τιμές εξαρτώνται από το είδος του ζώου, τη διατροφή, την ηλικία, τη συμπεριφορά και τα συστήματα σταβλισμού. Στο διάγραμμα οι ζώνες του περιβάλλοντος καθορίζονται ως εξής:

Ζώνη A : ζώνη της υποθερμίας
Ζώνη CD : ζώνη της ελάχιστης προσπάθειας για θερμορύθμιση (θερμοουδέτερη ζώνη)
Ζώνη CE : ζώνη του ελάχιστου μεταβολισμού
Ζώνη BE : ζώνη θερμορύθμισης
Σημείο B : θερμοκρασία στην οποία εμφανίζεται το maximum της παραγόμενης θερμότητας μεταβολισμού και το σημείο έναρξης της υποθερμίας.
Σημείο C : κρίσιμη θερμοκρασία, κάτω από την οποία αυξάνεται ο μεταβολισμός
Σημείο D : θερμοκρασία στην οποία αρχίζει ν' αυξάνεται η απώλεια θερμότητας με εξάτμιση
Σημείο E : θερμοκρασία έναρξης της υπερθερμίας
Σημείο G : το σημείο εκείνο όπου SHL = 0 διότι η θερμοκρασία του περιβάλλοντος είναι ίση με T_b.



Σχήμα 3. Γενικό σχηματικό διάγραμμα που παρουσιάζει τις ανταλλαγές ενέργειας ενός ζώου σε σχέση με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος [4]

Κατά τον σχεδιασμό των συστημάτων ελέγχου περιβάλλοντος των κτηνοτροφικών εγκαταστάσεων πρωταρχικός στόχος είναι η διατήρηση μιας optimum θερμοκρασίας σε όλο το φάσμα του παραγωγικού κύκλου. Από τη μελέτη του διαγράμματος του Σχήματος 3, γίνεται κατανοητό ότι η "optimum" θερμοκρασία περιβάλλοντος βρίσκεται μέσα στη θερμοουδέτερη ζώνη, διότι μέσα σ' αυτήν, η συνολική παραγόμενη θερμότητα από ένα ζώο είναι ανεξάρτητη της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος και εξαρτάται κυρίως από το ζωντανό του βάρος και την προσλαμβανόμενη τροφή.

2.2.2. Υγρασία [5]

Η υγρασία του αέρα καθώς και η θερμοκρασία του, προσδίδουν τα βασικά χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος του συγκεκριμένου χώρου. Οι δύο αυτοί παράγοντες διέπονται από ορισμένες θερμοδυναμικές ιδιότητες, που γενικά ονομάζονται «ψυχρομετρικά» του ατμοσφαιρικού αέρα.

Η υψηλή σχετική υγρασία (πάνω από 80%) δημιουργεί σοβαρά προβλήματα στα σταβλισμένα ζώα, γιατί τα εμποδίζει να αποβάλουν θερμότητα με εξάτμιση και σε μερικά είδη, όπως τα πτηνά, προκαλεί ύγρανση των φτερών. Η υψηλή σχετική υγρασία διευκολύνει επίσης την απόθεση υγρασίας με τη μορφή σταγόνων πάνω στα υλικά κατασκευής, με συνέπεια να αναπτύσσονται σήψεις ξύλων, οξειδώσεις μετάλλων και ασθένειες στο αναπνευστικό σύστημα των ζώων. Όταν το ποσοστό της σχετικής υγρασίας του αέρα αυξάνεται, τότε δημιουργούνται μεγαλύτερα σταγονίδια νερού, τα οποία σαν βαρύτερα, απομακρύνονται δύσκολα με τον αερισμό.

Η εξίσωση ισορροπίας της υγρασίας είναι:

$$Y_{\Sigma} = Y_{\alpha} + Y_{\zeta} \qquad (2)$$

όπου, Y_{Σ}: η υγρασία του στάβλου, Y_{α}: υγρασία που περιέχει ο εισερχόμενος αέρας και Y_{ζ}: η υγρασία που προσδίδουν τα ζώα.

Η ρύθμιση της σχετικής υγρασίας στα κτηνοτροφικά κτίρια γίνεται με τη χρησιμοποίηση μόνωσης και του αερισμού. Εάν η σχετική υγρασία του αέρα είναι υψηλή (βροχερή μέρα), τότε με τον αερισμό πρέπει να συνδυάζεται και θέρμανση. Εάν η σχετική υγρασία αποτελεί μόνιμο πρόβλημα, πρέπει οι ανεμιστήρες να παίρνουν εντολή και από υγροστάτη.

2.2.3. Χημικό περιβάλλον

Τα συστατικά του χημικού περιβάλλοντος σε μια σταβλική εγκατάσταση προέρχονται από τη σκόνη των συστημάτων τροφής, τους υδρατμούς από τη λειτουργία της αναπνοής και τα δηλητηριώδη αέρια από τη βιολογική αποσύνθεση της οργανικής ουσίας (κοπριά, ούρα κλπ). Τα βασικά χαρακτηριστικά των αερίων που ανιχνεύτηκαν στα κτηνοτροφικά κτίρια είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), το μεθάνιο (CH_4), η αμμωνία (NH_3), το υδρόθειο (H_2S) και το διοξείδιο του θείου (SO_2). Για τα αέρια που έχουν βρεθεί στα κτηνοτροφικά κτίρια, έχουν καθοριστεί οριακές τιμές, πάνω από τις οποίες η συγκέντρωση τους είναι επικίνδυνη. Ο καθορισμός αυτός δεν έγινε για τα ζώα ή τους ανθρώπους που εργάζονται στα κτηνοτροφικά κτίρια, αλλά για τους εργάτες της βιομηχανίας. Στον Πίνακα 1 δίνονται οι μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές συγκέντρωσης των τοξικών αερίων.

Το χημικό περιβάλλον έχει βρεθεί ερευνητικά ότι μειώνει τις αποδόσεις της ζωικής παραγωγής, αλλά μπορεί και να είναι θανατηφόρο για πολλά ζώα. Επομένως ο αερισμός φυσικός ή τεχνητός είναι απαραίτητος σε μια κτηνοτροφική κατασκευή.

Πίνακας 1. Μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή συγκέντρωσης τοξικών αερίων [6]

Αέριο	Μέγιστη τιμή (p.p.m)	Όρια ευφλεκτικότητας % του όγκου	
		Κατώτερο όριο	Ανώτερο όριο
Διοξείδιο του άνθρακα	5000		
Μεθάνιο		5.0	15.0
Αμμωνία	100	15.5	26.6
Υδρόθειο	20	4.3	45.6
Διοξείδιο του θείου	5		

2.2.4. Αερισμός

Ο βασικός λόγος του αερισμού είναι αφενός ο έλεγχος της θερμοκρασίας και της υγρασίας μέσα στο στάβλο και αφετέρου η ανανέωση της φυσικής σύνθεσης του αέρα. Με την αναπνοή των ζώων καταναλίσκεται το οξυγόνο του αέρα, ενώ ταυτόχρονα συσσωρεύονται επικίνδυνα ποσοστά διοξειδίου του άνθρακα, αμμωνίας, υδρατμών, μικροοργανισμών και σκόνης, μ' όλα τα γνωστά δυσάρεστα επακόλουθα. Ο αερισμός είναι ένας από τους βασικούς παράγοντες για τον έλεγχο του περιβάλλοντος των κτηνοτροφικών κτισμάτων. Μια σταβλική εγκατάσταση δεν μπορεί να θεωρηθεί πλήρης, χωρίς ελεγχόμενο αερισμό, γιατί η δημιουργία των κατάλληλων βιοκλιματολογικών συνθηκών του περιβάλλοντος έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση των αποδόσεων των ζώων και την οικονομικότητα της επιχείρησης.

Υπάρχουν δύο συστήματα αερισμού, ο φυσικός και ο τεχνητός αερισμός. Ο φυσικός αερισμός γίνεται από τα παράθυρα. Έτσι δεν απαιτεί ενέργεια, ούτε δαπανηρά μηχανήματα. Είναι όμως ικανοποιητικός μόνο για μικρές εκμεταλλεύσεις, ενώ είναι ανεπαρκής για μεγάλες και εντατικές. Επίσης δεν μπορεί να θεωρηθεί φθηνός, γιατί απαιτεί συνεχή παρακολούθηση και εργατικά χέρια, για το άνοιγμα και κλείσιμο των παραθύρων. Ο τεχνητός αερισμός είναι περισσότερο αποτελεσματικός, γιατί παρέχει τη δυνατότητα του συστηματικού ελέγχου του όγκου του εισερχόμενου αέρα.

Ανεξάρτητα από το σύστημα αερισμού, πρέπει πάντα να υπάρχει ένα ρεύμα εισόδου αέρα και αντίστοιχα ένα ρεύμα εξόδου. Το βασικό πρόβλημα είναι ο τρόπος εισόδου του αέρα, γιατί δεν πρέπει να δημιουργούνται ρεύματα. Ιδιαίτερα επικίνδυνος είναι ο αέρας όταν έχει χαμηλή θερμοκρασία και μεγάλη ταχύτητα. Σε αυτήν την περίπτωση πρέπει να αποφεύγεται η πτώση του πάνω στα ζώα. Προκειμένου ο εισερχόμενος αέρας ν' αποκτήσει τη θερμοκρασία του στάβλου, πρέπει να αναμιγνύεται σταδιακά. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση μικρών ανοιγμάτων εισόδου κι εκτροπής του εισερχόμενου αέρα προς την οροφή.

Τα ανοίγματα εξόδου μπορούν να τοποθετούνται οπουδήποτε χωρίς να επηρεάζουν το κλίμα του στάβλου, αλλά σε περιοχές με δυνατούς ανέμους, προτιμούνται οι υπήνεμες πλευρές ή η οροφή.

Στον τεχνητό αερισμό υπάρχουν τρία βασικά συστήματα, που είναι τα εξής: α) αερισμός υποπίεσης, β) αερισμός ουδέτερος και γ) αερισμός υπερπίεσης [5].

2.3. Βέλτιστες κλιματικές συνθήκες βουστασίων

2.3.1. Θερμοκρασία περιβάλλοντος βουστασίων

Η κρίσιμη θερμοκρασία για τα βοοειδή είναι πολύ χαμηλή σε σχέση με τους χοίρους και τις όρνιθες. Έτσι στη χώρα μας δεν έχουμε πρόβλημα με τις χαμηλές θερμοκρασίες του χειμώνα. Πρόβλημα μπορεί να υπάρξει μόνο όταν οι χαμηλές θερμοκρασίες συνδυάζονται με ισχυρά ρεύματα αέρα. Αντίθετα, οι υψηλές θερμοκρασίες του θέρους και συγκεκριμένα θερμοκρασίες υψηλότερες από 25^{o}C, μπορεί να επηρεάσουν δυσμενώς την απόδοση των ζώων. Πειραματικές εργασίες, που έχουν γίνει σε διάφορα μέρη του κόσμου, έχουν καταλήξει στο συμπέρασμα ότι τα βοοειδή δεν επηρεάζονται τόσο από τις χαμηλές όσο και από τις υψηλές θερμοκρασίες.

Στις γαλακτοπαραγωγικές αγελάδες υπάρχουν τρεις ζώνες θερμοκρασίας, που επηρεάζουν ανάλογα την παραγωγή του γάλακτος: α) *η ζώνη χαμηλών θερμοκρασιών*, που επηρεάζει δυσμενώς την παραγωγή, βρίσκεται κάτω από τους 0ºC για τη φυλή Jersey και τους -12ºC για τις φυλές Holstein και Brown Swiss, β) *η ζώνη με τις άριστες θερμοκρασίες* που είναι περίπου από 0 – 24ºC για όλα τα είδη και γ) *η ζώνη των υψηλών θερμοκρασιών* στην οποία αρχίζει η μείωση της παραγωγής, και βρίσκεται πάνω από τους 24ºC. Στον Πίνακα 2 δίνεται η απαιτούμενη για τα βοοειδή θερμοκρασία.

Πίνακας 2. Απαιτούμενη θερμοκρασία βοοειδών.

Είδος	Εύρος θερμοκρασίας ºC
Αγελάδα γαλακτοπαραγωγής	Άριστη: 10 – 20ºC, αλλά θερμοκρασία από 6 – 25ºC ελάχιστα επηρεάζει την παραγωγή
Αγελάδα κρεοπαραγωγής	'Αριστη: -6 έως 25ºC
Μόσχοι	10 – 15ºC κατά τη γέννηση. Η θερμοκρασία αυτή μειώνεται διαδοχικά με το χρόνο. Για μόσχους κρεοπαραγωγής προτιμάται θερμοκρασία 15 – 22ºC

Στις αγελάδες κρεοπαραγωγής η ζώνη με τις άριστες θερμοκρασίες είναι μεγαλύτερη. Στις αγελάδες κρεοπαραγωγής η «άνω κρίσιμη θερμοκρασία» είναι περίπου 25ºC για τις ευρωπαϊκές φυλές και 35ºC για τις τροπικές, ενώ το εύρος της κατάλληλης θερμοκρασίας είναι -7 έως 15ºC και 10 έως 26ºC, αντίστοιχα.

Στους μόσχους, ιδιαίτερα δυσμενή επίδραση, έχουν οι απότομες αλλαγές της θερμοκρασίας. Η πιο κατάλληλη θερμοκρασία γι αυτούς είναι 10ºC, και το εύρος της θερμοκρασίας που ανέχονται είναι από 4 – 29ºC [7], αλλά σε στεγνό περιβάλλον, απαλλαγμένο από ρεύματα.

2.3.2. Υγρασία περιβάλλοντος βουστασίων

Η υψηλή σχετική υγρασία δεν επηρεάζει την παραγωγή γάλακτος των γαλακτοπαραγωγικών αγελάδων, όταν η θερμοκρασία κυμαίνεται από -8º έως 24ºC. Όταν όμως η θερμοκρασία υπερβαίνει τους 24ºC, υψηλή σχετική υγρασία ενισχύει τις δυσμενείς επιδράσεις της υψηλής θερμοκρασίας [8].

2.4. Βέλτιστες κλιματικές συνθήκες χοιροστασίων

2.4.1. Θερμοκρασία περιβάλλοντος χοιροστασίων

Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος επηρεάζει άμεσα την απώλεια θερμότητας από το σώμα του χοίρου. Η θερμοκρασία του σώματος του είναι 39ºC και ζει σ' ένα περιβάλλον κατά πολύ ψυχρότερο από τη θερμοκρασία αυτή. Έτσι χάνει συνεχώς θερμότητα με αγωγή, ακτινοβολία, συναγωγή και εξάτμιση. Η θερμική απώλεια αυξάνεται όσο μεγαλώνει η διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας του σώματος και της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος, με βάση τους νόμους της θερμοδυναμικής.

Πίνακας 3. Κρίσιμη θερμοκρασία μικρών χοιριδίων (ταχύτητα αέρα: 15 cm.s^{-1})

Βάρος χοίρου (kg)	Κρίσιμη θερμοκρασία (ºC)
Νεογέννητος	35
4	29
10	24

Ο χοίρος, κάτω από οποιεσδήποτε συνθήκες παράγει θερμότητα σαν αναπόφευκτη συνέπεια του μεταβολισμού η οποία είναι αρκετή για να διατηρήσει σταθερή τη θερμοκρασία του σώματος του, όταν η θερμοκρασία του περιβάλλοντος είναι πολύ κοντά στην κρίσιμη θερμοκρασία. Εάν η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι χαμηλότερη από την κρίσιμη ο χοίρος πρέπει ν' αυξήσει την παραγωγή της θερμότητας, ενώ αν είναι υψηλότερη, τότε πρέπει ν' απομακρύνει ένα μέρος της παραγόμενης θερμότητας. Την αύξηση της παραγωγής θερμότητας την πετυχαίνει με την αύξηση της προσλαμβανόμενης τροφής, ενώ τη μείωση με την αύξηση της εξάτμισης. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο χοίρος δεν έχει ιδρωτοποιούς αδένες. Στον Πίνακα 3 δίνεται η κρίσιμη θερμοκρασία για μικρά

χοιρίδια και στον Πίνακα 4 δίνονται οι απαιτούμενες θερμοκρασίες για την εξασφάλιση στα ζώα κατάλληλων συνθηκών περιβάλλοντος [5].

Πίνακας 4. Απαιτούμενες θερμοκρασίες από χοίρους κάθε ηλικίας

Κατηγορίες χοίρων	Απαιτούμενη θερμοκρασία, ºC
Χοιρίδια μιας εβδομάδας	30-32
Χοιρίδια 2 εβδομάδων	28
Χοιρίδια 3 εβδομάδων	24
Χοιρίδια 4 εβδομάδων	22
Χοιρομητέρες σε περίοδο εγκυμοσύνης	12 -20
Χοιρομητέρες σε περίοδο θηλασμού	16 -20
Κάπροι	10 -20
Παχυνόμενοι χοίροι	
Ζωντανό βάρος 30 -65 kg	20 άριστη
Ζωντανό βάρος 65 -100kg	18 άριστη

Η κρίσιμη θερμοκρασία για ένα νεογέννητο είναι 35ºC. Έτσι, κατά κανόνα, χρησιμοποιούνται λαμπτήρες θέρμανσης, που προσφέρουν στα μικρά την αναγκαία γι' αυτά θερμότητα. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος επηρεάζει ακόμη τη μετατρεψιμότητα της τροφής σε βάρος (μονάδες τροφής ανά μονάδα προστιθέμενου βάρους) καθώς και την ποιότητα του κρέατος.

Εκτός από τις χαμηλές θερμοκρασίες και οι υψηλές θερμοκρασίες, πάνω από τα επιτρεπτά επίπεδα, έχουν δυσμενή επίδραση στη χοιροτροφία. Σε πολλές περιοχές του κόσμου με υψηλές θερμοκρασίες, η ανάπτυξη και η αποδοτικότητα των χοίρων περιορίζεται σε σοβαρό βαθμό. Στις περιπτώσεις αυτές, πρέπει τα χοιροστάσια να διαθέτουν κατάλληλο εξοπλισμό για την πτώση της θερμοκρασίας στα κανονικά επίπεδα, π.χ. λεκάνες νερού στο έδαφος για να κυλιούνται οι χοίροι μέσα σ' αυτές, ψεκαστήρες νερού, σκίαση, υπόστεγα και τέλος, μηχανικά ψυχώμενα σχαρωτά δάπεδα από σκυρόδεμα.

2.4.2. Υγρασία περιβάλλοντος χοιροστασίων

Εάν το χοιροστάσιο διατηρεί την απαιτούμενη θερμοκρασία, η υγρασία του αέρα δεν έχει συνήθως άμεση επίδραση στους χοίρους, εφόσον κυμαίνεται από 45 -95% [9]. Όταν όμως η θερμοκρασία ξεπεράσει τα επιτρεπτά επίπεδα, τότε η αυξανόμενη υγρασία μειώνει το κέρδος βάρους σημαντικά και προοδευτικά. Στον Πίνακα 5 αναφέρονται οι ενδεικτικές σχετικές υγρασίες για όλες τις κατηγορίες χοίρων.

Πίνακας 5. Κατάλληλη υγρασία για χοίρους κάθε κατηγορίας

Κατηγορίες χοίρων	Σχετική υγρασία %
Κάπροι	70
Χοιρομητέρες	60 -70
Χοιρομητέρες με χοιρίδια	60
Παχυνόμενοι χοίροι ζωντανού βάρους 20 -50 kg	60 -70
Παχυνόμενοι χοίροι ζωντανού βάρους 50-100 kg	70 -80

2.5. Βέλτιστες κλιματικές συνθήκες προβατοστασίων

2.5.1. Θερμοκρασία περιβάλλοντος προβατοστασίων

Μέσα σ' ένα κτίριο υπάρχει η δυνατότητα διατήρησης της θερμοκρασίας σ' ένα εύρος από 5 – 25ºC, που θεωρούνται τα όρια της ζώνης άνεσης, ενώ παράλληλα προστατεύονται τα ζώα από τη βροχή, τον άνεμο και τον ήλιο. Είναι πολύ βασικό η θερμοκρασία να διατηρείται μέσα στα όρια αυτά και

κυρίως να μην πέφτει κάτω από το «κρίσιμο σημείο», γιατί τότε η παρεχόμενη τροφή χρησιμοποιείται για τη διατήρηση της θερμοκρασίας του σώματος και κατά συνέπεια μειώνεται ο βαθμός απόδοσης.

Το τρίχωμα κατέχει τη θέση ενός προστατευτικού μονωτικού καλύμματος και σε ειδικές συνθήκες μπορεί να επηρεάσει την απόδοση του γάλακτος για τις ίδιες ποσότητες τροφής. Η κρίσιμη θερμοκρασία ποικίλλει και βασικά εξαρτάται από το επίπεδο τροφής και τις μονωτικές ιδιότητες του τριχώματος. Η μονωτική ιδιότητα του τριχώματος καθορίζεται από την κατασκευή του τριχώματος, την ταχύτητα του ανέμου και από το βαθμό ύγρανσής του. Η προσαρμοστικότητα λοιπόν του ζώου σ' ένα περιβάλλον εξαρτάται κατά ένα μεγάλο βαθμό από το τρίχωμα του. Γενικά και για τα διάφορα φυσιολογικά στάδια, κατάλληλες θερμοκρασίες μπορεί να θεωρηθούν αυτές που κυμαίνονται από -3^{o}C έως 31^{o}C.

2.5.2. Υγρασία περιβάλλοντος προβατοστασίων

Εκτός από τη θερμοκρασία ελέγχεται και η υγρασία η οποία δεν πρέπει να ξεπερνά το 80%. Όταν αυξηθεί περισσότερο, επηρεάζει δυσμενώς το περιβάλλον. Υψηλή υγρασία συνδυαζόμενη με χαμηλή θερμοκρασία έχει αρνητική επίδραση στα αναπνευστικά όργανα του προβάτου. Υψηλή υγρασία και υψηλή θερμοκρασία έχουν μια πιο έμμεση αλλά όχι λιγότερο επικίνδυνη επίδραση, καθώς ευνοούν την ανάπτυξη όλων των ειδών των παθογόνων οργανισμών και παρασίτων. Ο κίνδυνος είναι μεγάλος επειδή το πρόβατο συνήθως ζει στη στρωμνή που μπορεί να μετατραπεί σε πηγή μόλυνσης. Όταν η επιφάνεια αρχίζει να γίνεται ιδιαίτερα υγρή, πρέπει να προστίθενται καινούργια στρωμνή και υπερφωσφορικά άλατα. Αυτό εξασφαλίζει συνθήκες υγιεινής και προλαμβάνει το μαλάκωμα των οπλών και τις περαιτέρω δυσμενείς συνέπειες, όπως είναι οι λοιμώξεις (ποδοδερματίτιδα κλπ). Στον Πίνακα 6 δίνονται η κατάλληλη θερμοκρασία και υγρασία για τις διάφορες κατηγορίες προβάτου.

Πίνακας 6. Κατάλληλη θερμοκρασία και υγρασία για τις διάφορες κατηγορίες προβάτου.

Κατηγορία προβάτου	Θερμοκρασία optimum (^{o}C)	Σχετική υγρασία (%)
Πρόβατο	10-17	60-80
Κριός, προβατίνα, παχύ πρόβατο	8-17	60-80

2.6. Βέλτιστες κλιματικές συνθήκες πτηνοτροφείων

Οι βασικοί παράμετροι του περιβάλλοντος για τα πτηνά είναι η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία, η σύνθεση του αέρα και ο φωτισμός

2.6.1. Βέλτιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος πτηνοτροφείων

Τα πτηνά δεν διαθέτουν μηχανισμό άμυνας κατά των υψηλών θερμοκρασιών, αλλά και κατά των χαμηλών όταν είναι σε μικρή ηλικία. Οι ακραίες θερμοκρασίες επηρεάζουν την παραγωγή αυγών, την εκμετάλλευση της τροφής και την ποιότητα των αυγών. Θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 20 -28^{o}C επιδρούν δυσμενώς στο πάχος του κελύφους των αυγών.

Οι ενήλικες όρνιθες όμως δεν καταπονούνται κάτω από ευρεία όρια θερμοκρασίας του περιβάλλοντος. Η ουδέτερη θερμική ζώνη της όρνιθας βρίσκεται μεταξύ 16.5^{o}C και 27^{o}C, αλλά και στο εύρος θερμοκρασιών από 7.2^{o}C μέχρι και 32.2^{o}C κατορθώνουν και επιβιώνουν χωρίς αισθητή καταπόνηση. Το ευνοϊκότερο εύρος θερμοκρασιών για υψηλότερη αυγοπαραγωγή είναι εκείνο των 13^{o}C μέχρι 24^{o}C, με άριστη θερμοκρασία τους 24^{o}C.

2.6.2. Υγρασία περιβάλλοντος πτηνοτροφείων

Η σχετική υγρασία για όρνιθες αυγοπαραγωγής δεν πρέπει να κατέρχεται κάτω από 40%, γιατί ευνοεί τη δημιουργία σκόνης στο περιβάλλον τους, η οποία προκαλεί ερεθισμούς στους βλεννογόνους και προδιαθέτει την αναπνευστική χώρα σε μικροβιακές μολύνσεις. Κάτω από ευνοϊκές θερμοκρασίες του περιβάλλοντος συνιστώνται οι σχετικές υγρασίες: α) 75 – 80% για εκτροφή σε δάπεδο, β) 80% για εκτροφή σε κλωβούς.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα συστήματα ελέγχου περιβάλλοντος κατά τον σταβλισμό παραγωγικών ζώων τα οποία θα πρέπει να μελετώνται καθώς επηρεάζουν την μελέτη της κατασκευής της πρότυπης μονάδας θερμοκηπιακού τύπου με σύστημα αφαλάτωσης στην οροφή είναι το σύστημα αερισμού και το σύστημα δροσισμού.

Αυτό βέβαια με την προϋπόθεση ότι η πρότυπη μονάδα συμπεριλαμβάνει θερμομόνωση (παθητικό σύστημα) που είναι απαραίτητη και για την διαδικασία της ηλιακής αφαλάτωσης. Το σύστημα θέρμανσης καθώς και το σύστημα φωτισμού μπορούν να εγκατασταθούν συμπληρωματικά της αρχικής κατασκευής ανάλογα με τις απαιτήσεις 'optimum' θερμοκρασιών, και έντασης φωτός για την φωτοπερίοδο των παραγωγικών ζώων.

Σε περίπτωση ανάγκης τεχνητής θέρμανσης ο υπολογισμός για την ισχύ της γίνεται σύμφωνα με την εξίσωση της θερμικής ισορροπίας (ενεργειακό ισοζύγιο) [5]:

$q_ζ + q_{τΘ} = q_k + q_α$ (3)

όπου: $q_ζ$: θερμότητα που παράγεται από τα ζώα

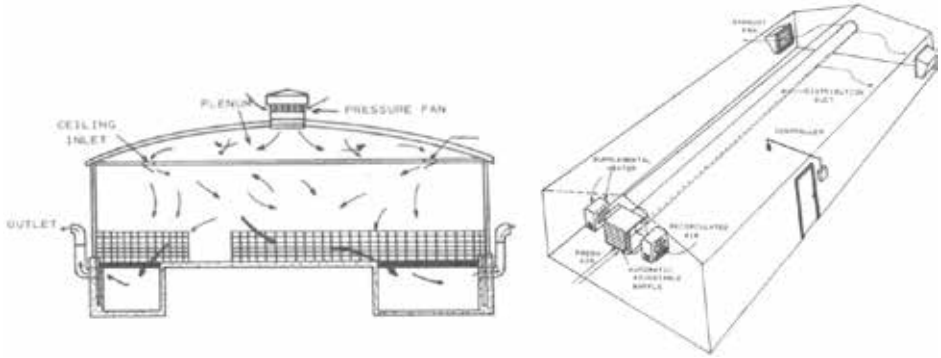
$q_{τΘ}$: θερμότητα που προστίθεται με τεχνητή θέρμανση

q_k : θερμότητα που χάνεται από την κατασκευή προς το εξωτερικό περιβάλλον

$q_α$: θερμότητα που χάνεται με τον αερισμό

Στα ***βουστάσια, χοιροστάσια και προβατοστάσια*** ο φυσικός αερισμός είναι επαρκής, εκτός από τα χοιροστάσια που βρίσκονται σε περιοχές με υψηλή θερμοκρασία όπου σε κάποιες περιπτώσεις απαιτείται και τεχνητός αερισμός. Ο φυσικός αερισμός πραγματοποιείται με πλευρικά παράθυρα και για τις θερμοκηπιακού τύπου κατασκευές, υποχρεωτικά με άνοιγμα οροφής, πλάτους τουλάχιστον 30 cm (Εικόνα 2). Σε όλες τις περιπτώσεις το ποσοστό των ανοιγμάτων αερισμού (Εικόνα 2) πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το 25 % της επιφάνειας κάτοψης της σταβλικής εγκατάστασης. Κατά τη διάρκεια του θέρους για τη μείωση της θερμοκρασίας στα προβατοστάσια, ο αέρας πρέπει να αλλάζει περίπου 4 φορές την ώρα.

Εικόνα 2. Πλευρικά ανοίγματα και άνοιγμα οροφής αερισμού σε θερμοκηπιακού τύπου κτηνοτροφική κατασκευή [10].



Εικόνα 3. Εξαγωγή αέρα από το σύστημα αποχέτευσης (αριστερά) και σύστημα αερισμού με ανακύκλωση αέρα (δεξιά) [11].

Στην περίπτωση δε των ***χοιροστασίων*** όπου απαιτείται τεχνητός αερισμός, αυτός μπορεί να επιτευχθεί είτε με τον παραδοσιακό τρόπο αερισμού, δηλαδή με ανοίγματα τύπου καπνοδόχου με εξαεριστήρα και ταυτόχρονη εισαγωγή αέρα από ανοίγματα περιφερειακά στους τοίχους είτε με άλλα εναλλακτικά συστήματα αερισμού όπως: α) εξαγωγή αέρα από τον εξωτερικό τοίχο του διαδρόμου κυκλοφορίας, β) εξαγωγή αέρα από το σύστημα αποχέτευσης (Εικόνα 3), γ) αερισμός με σύστημα υπερπίεσης και δ)

σύστημα αερισμού με ανακύκλωση αέρα (Εικόνα 3) [5]. Στον φυσικό αερισμό η επιφάνεια εξαγωγέα πρέπει να είναι 70mm^2 για κάθε kg ζωντανού βάρους, ενώ στον τεχνητό αερισμό η μέγιστη τιμή αερισμού είναι 0,9-1,9m^{3}h^{-1}kg^{-1}. Η επιφάνεια εισόδου του αέρα είναι περίπου τριπλάσια της επιφάνειας εξόδου προς αποφυγή δημιουργίας ρευμάτων.

Ο αερισμός των <u>*πτηνοτροφείων*</u> και μάλιστα δυναμικός είναι απαραίτητος διότι οι όρνιθες με την αναπνοή και την αποσύνθεση της κοπριάς τους εμπλουτίζουν τον αέρα με επιβλαβή αέρια όπως CO_2, NH_3 και H_2S και ελαττώνουν την περιεκτικότητα σε O_2. Από τα παραπάνω αέρια ενδιαφέρει κυρίως η αμμωνία που δεν πρέπει να ξεπερνά τα 40 ppm αν και από τα 20 ppm ερεθίζονται τα αναπνευστικά όργανα.

Με τον αερισμό επιδιώκεται η διατήρηση του αέρα στη φυσική του σύνθεση ενώ παράλληλα ελέγχεται και η θερμοκρασία και η υγρασία. Ο δυναμικός αερισμός στα πτηνοτροφεία θα πρέπει να συνδυάζεται και με κυψέλες δροσισμού (panels) (Εικόνα 4). Ενδεικτικά οι μέγιστες ανάγκες αερισμού ανά πτηνό είναι για πουλάδες από 0.110 – 0.170 m^3/min και για όρνιθες από 0,90 kg έως 3,60 kg οι αντίστοιχες τιμές είναι από 0,170 έως 0.225 m^3/min.

Εικόνα 4. Ανεμιστήρες πτηνοτροφικών θαλάμων, κωνικοί ανεμιστήρες και σύστημα ψύξης πτηνοτροφείων [10].

Ο αερισμός περιορίζεται στο ελάχιστο, όταν οι εξωτερικές θερμοκρασίες είναι χαμηλές. Οι επιτρεπόμενες ταχύτητες αέρα είναι [12]:

α. Στο ύψος του δαπέδου ή ανάμεσα στους κλωβούς
- Για νεοσσούς ηλικίας μιας ημέρας και σε θερμοκρασία 32°C Vmax = 12 m/min
- Για ώριμα πτηνά σε 7°C Vmax = 12 m/min
- Για ώριμα πτηνά σε 13°C Vmax = 18 m/min
- Για ώριμα πτηνά σε 18 °C Vmax = 36 m/min
- Για ώριμα πτηνά σε 24°C Vmax = 60 m/min

β. Στις εισόδους του αέρα μέσα στο χώρο
- Για πτηνά μικρής ηλικίας Vmax = 60 m/min

<u>*Ένταση του φωτός*</u>: Η ένταση του φωτός εκφράζεται συνήθως σε Lux και έχει επίδραση τόσο στην ανάπτυξη των πτηνών, όσο και στην παραγωγή των αυγών, και όχι τόσο στις άλλες κατηγορίες παραγωγικών ζώων. Συγκεκριμένα δίνονται οι παρακάτω εντάσεις:

- Πουλάδες αντικατάστασης: 10 Lux τις πρώτες ημέρες και 1-2 Lux στη συνέχεια
- Όρνιθες σε ηλικία παραγωγής: 10-25 Lux στο ύψος του δαπέδου ή στο μέτωπο των κλωβών

Η φωτοπερίοδος μπορεί να διακριθεί σ 'εκείνη που η διάρκεια του φωτός είναι σταθερή στο 24ωρο και σ' εκείνη που μεταβάλλεται με την πάροδο της περιόδου αυγοπαραγωγής. Έτσι διακρίνονται δύο κατηγορίες φωτοπεριοδισμού. Φωτοπερίοδος με σταθερή διάρκεια φωτός και φωτοπερίοδος με μεταβαλλόμενη διάρκεια φωτός. Όσον αφοράν την αναπαραγωγή, το πρόβλημα είναι πολυπλοκότερο. Επίσης υπάρχουν χώροι ανάπτυξης και παραγωγής αυγών χωρίς παράθυρα (ολοκληρωτικός έλεγχος φωτισμού και αντίστοιχοι χώροι με παράθυρα).

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι εγκαταστάσεις αφαλάτωσης έχουν αποδειχθεί ιδιαίτερα ενεργοβόρες αυξάνοντας αρκετά και το λειτουργικό κόστος. Η ηλιακή αφαλάτωση είναι μια σημαντικά καλή εναλλακτική τεχνολογία, ειδικά όσον αφορά την παραγωγή νερού για χρήση στον αγροτικό τομέα (άρδευση). Η ενσωμάτωση ενός συστήματος ηλιακής αφαλάτωσης σε κατασκευή θερμοκηπιακού τύπου προσφέρει παράλληλα τη

δυνατότητα για συνδυασμένη χρήση του χώρου για στέγαση παραγωγικών ζώων ή καλλιέργεια ή αποθήκευση.

Όσον αφορά τα παραγωγικά ζώα λόγω των ειδικών συνθηκών που απαιτούνται για τη σωστή ανάπτυξη τους προκειμένου να επιτυγχάνονται οι μέγιστες αποδόσεις με παράλληλο ικανοποιητικό επίπεδο ευζωίας, η θερμοκηπιακού τύπου κατασκευή με το σύστημα ηλιακής αφαλάτωσης θα πρέπει να προσαρμόζεται ανάλογα. Τα συστήματα ελέγχου περιβάλλοντος που επηρεάζουν την αρχική μελέτη και τον σχεδιασμό της κατασκευής είναι κυρίως αυτά του αερισμού και του δροσισμού, ενώ τα συστήματα θέρμανσης και φωτισμού μπορούν να εγκατασταθούν συμπληρωματικά στην υφιστάμενη κατασκευή. Λαμβάνοντας λοιπόν υπόψη τις ιδανικές κλιματικές συνθήκες (θερμοκρασία, υγρασία, αερισμό, ταχύτητα αέρα, χημικό περιβάλλον, φωτισμό) για κάθε είδους παραγωγικό ζώο προκειμένου να τροποποιείται η κατασκευή ανάλογα (ποσοστό ανοιγμάτων αερισμού, τεχνητός αερισμός, δροσισμός), η χρήση του εσωτερικού χώρου της κατασκευής είναι δυνατή.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία υλοποιήθηκε στο πλαίσιο της Δράσης ΕΡΕΥΝΩ – ΔΗΜΙΟΥΡΓΩ – ΚΑΙΝΟΤΟΜΩ συγχρηματοδοτήθηκε από το Ευρωπαϊκό Ταμείο Περιφερειακής Ανάπτυξης (ΕΤΠΑ) της Ευρωπαϊκής Ένωσης και εθνικούς πόρους μέσω του Ε.Π. Ανταγωνιστικότητα, Επιχειρηματικότητα & Καινοτομία (ΕΠΑνΕΚ) (κωδικός έργου: Τ1ΕΔΚ-00100–IRISS).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] EEA (European Environment Agency), 2012, “Towards efficient use of water resources in Europe”, EEA Report, No 1/2012.

[2] WWAP (United Nations World Water Assessment Programme), 2014, “The United Nations World Water Development Report 2014: Water and Energy” Paris, UNESCO.

[3] Scott, N.R., DeShazer, J.A. and Roller, W.L., 1983. “Chapter 7: Effects of the thermal and gaseous environment on livestock”, In Ventilation of Agricultural Structures, ASAE Monograph No. 6. M. Hellickson and J. Walker, eds. St. Joseph, Mich.: ASAE, pp. 121-165.

[4] Mount, L.E., 1974, “The concept of thermal neutrality”, In: Montieth JL, Mount LE (eds) Heat loss from animals and man. Butterworths, London, pp. 426–439.

[5] Νικήτα-Μαρτζοπούλου, Χ., 2006, “Κτηνοτροφικές Κατασκευές”, Εκδόσεις Γιαχούδη, Θεσσαλονίκη.

[6] Institution of Heating and Ventilating Engineers, 1965, I.H.V.E. Guide 1965, sect. 4, The Institution of Heating and Ventilating Engineers, London, pp. 111-126.

[7] Sainsbury, D. and Sainsbury, P., 1979, “Livestock Health and Housing”,Baillière Tindall, London.

[8] Yeck, R.G. and Stewart, R.E., 1959, “A ten year summary of the psychroenergetic laboratory dairy cattle research at the University of Missouri, Trans. ASAE, 2(1), pp. 71-77.

[9] Morrison, S.R., Bond, T.E. and Heitman, H., 1968, “Effect of humidity on swine at high temperature”, Trans. ASAE, 11, pp. 526-528.

[10] Γεωθερμική ΑΕ, Θερμοκηπιακού Τύπου (Τούνελ), Ανεμιστήρες -Πάνελ ψύξης. https://www.geotherm.gr/

[11] Hellickson, M.A., Driggers, L.B. and Muehling, A.J., 1983. “Chapter 9: Ventilation systems for livestock structures”, In Ventilation of Agricultural Structures, ASAE Monograph No. 6. M. Hellickson and J. Walker, eds. St. Joseph, Mich.: ASAE, pp. 193-214.

[12] Κυρίτσης, Σ., 1986, “Πτηνοτροφεία. Αγροτική Οικοδομική”, Εκδόσεις Σταμούλης, Αθήνα.

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΜΙΑΣ ΜΙΚΡΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΠΑΘΗΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΗΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΡΟΗΣ

Χαράλαμπος Παπαδόπουλος[1,5*], Παύλος Καπαρός-Τσάφος[1,5], Γιώργος Ιατρού[2], Ζήνων Βλαχοστέργιος[1,3], Δημήτριος Μισηρλής[1,4], Κύρος Υάκινθος[1,5]

[1*] Εργαστήριο Μηχανικής Ρευστών και Στροβιλομηχανών, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης,54124, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα,
[2] Carbon Fiber Technologies, 61100, Κιλκίς, Ελλάδα,
[3] Εργαστήριο Ρευστομηχανικής και Υδροδυναμικών Μηχανών, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, 67100, Ξάνθη, Ελλάδα,
[4] Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος, Τέρμα Μαγνησίας, 62124 Σέρρες, Ελλάδα,
[5] UAV integrated Research Center (UAV-iRC), Κέντρο Διεπιστημονικής Έρευνας και Καινοτομίας (ΚΕΔΕΚ), Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 57001, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα
e-mail: charalpi@auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

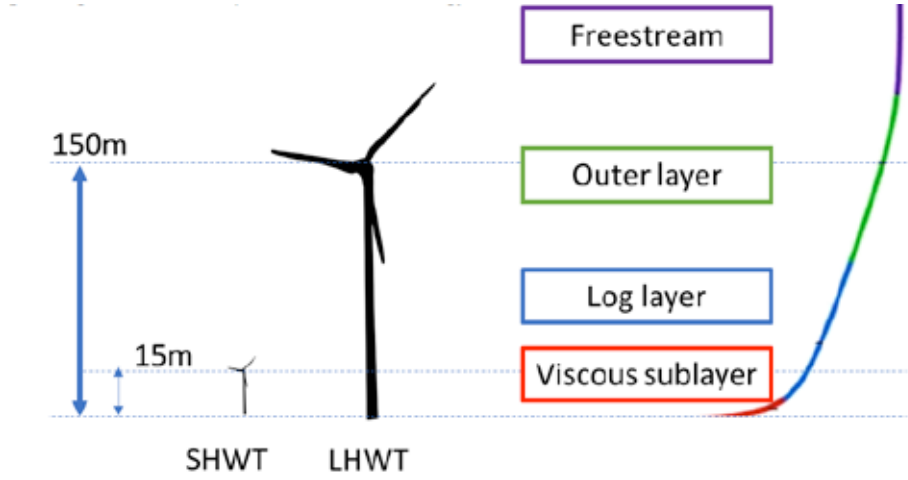
Σε αυτήν την εργασία παρουσιάζεται η βελτιστοποίηση της απόδοσης μιας μικρής ανεμογεννήτριας. Οι μικρές ανεμογεννήτριες έχουν συνήθως διάμετρο από 1.5 έως 3.5 μέτρα και ύψος 15 μέτρα. Αυτού του είδους οι ανεμογεννήτριες λειτουργούν σε χαμηλούς αριθμούς Reynolds (μέχρι $1.5x10^6$) και βρίσκονται εγκατεστημένες εντός του οριακού στρώματος της γης. Το περιβάλλον αυτό χαρακτηρίζεται από την έντονη αστάθεια του αέρα, καθιστώντας τη ροή πάνω από τα πτερύγια, επιρρεπή σε αποκολλήσεις. Οι τεχνικές ελέγχου της ροής που θα μελετηθούν, έχουν ως στόχο να εμποδίσουν την εμφάνιση αποκολλήσεων και έτσι να αυξηθεί η απόδοση της ανεμογεννήτριας. Οι τεχνικές αυτές διαχωρίζονται σε παθητικές και ενεργητικές, ανάλογα με το αν χρειάζονται επιπλέον ενέργεια για να ενεργοποιηθούν, ή βρίσκονται μόνιμα σε λειτουργία. Τρεις μέθοδοι παθητικού ελέγχου και μια μέθοδος ενεργητικού ελέγχου ροής θα μελετηθούν. Οι παθητικές μέθοδοι αποτελούνται από γεννήτριες τύρβης (Vortex Generators), αρθρωτά ογκίδια (tubercles) και ακροπτερύγια (winglets). Οι γεννήτριες τύρβης αναφέρονται σε μεταλλικά στοιχεία τοποθετημένα κάθετα στην επιφάνεια του πτερυγίου. Τα αρθρωτά ογκίδια είναι μια καινοτόμα τεχνολογία εμπνευσμένη από τα χαρακτηριστικά της μεγάπτερης φάλαινας (Megaptera Novaeangliae). Τέλος, τα ακροπτερύγια πρόκειται ουσιαστικά για έναν φράκτη στο άκρο του πτερυγίου, μια τεχνική με ευρεία χρήση στην αεροναυτική, αλλά σχετικά περιορισμένη στις ανεμογεννήτριες. Σχετικά με τη μέθοδο ενεργού ελέγχου ροής, θα μελετηθεί η επίδραση ενός ενεργοποιητή πλάσματος (Plasma Actuator). Η τεχνική αυτή, εισάγει ορμή στην τοπική ροή κοντά στην επιφάνεια του πτερυγίου, ιονίζοντας τον αέρα. Η επίδραση που έχει κάθε μια από τις τεχνολογίες αυτές μελετήθηκε και θα παρουσιαστεί στην παρούσα εργασία. Από τα αποτελέσματα της διαδικασίας προκύπτει ότι υπάρχει μεγάλο περιθώριο βελτίωσης της αεροδυναμικής, και άρα της συνολικής, απόδοσης μιας μικρής ανεμογεννήτριας, αυξάνοντας λόγου χάριν τον λόγο αεροδυναμικής άντωσης προς αεροδυναμική αντίσταση (Lift to Drag ratio, L/D).

Λέξεις Κλειδιά: Ανεμογεννήτριες, έλεγχος ροής, CFD, Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τις τελευταίες δεκαετίες, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) αντικαθιστούν όλο και περισσότερο τη χρήση υδρογονανθράκων. Οι ανεμογεννήτριες είναι από τους πιο σημαντικούς παράγοντες σε αυτήν την προσπάθεια, καθώς αποτελούν το ένα τρίτο της παραγόμενης ενέργειας από ΑΠΕ [1]. Για παράδειγμα, το 2016 εγκαταστάθηκαν ανεμογεννήτριες ικανές να παράγουν 54GW ηλεκτρικής ενέργειας [2]. Η τάση που υπάρχει να αυξάνεται διαρκώς το ύψος του στύλου και η διάμετρος του ρότορα μιας ανεμογεννήτριας, οδηγεί στην κατασκευή μεγάλων θαλάσσιων ενεργειακών πάρκων. Ως συνέπεια όμως, δημιουργείται μια ανισοκατανομή στις περιοχές που παράγεται και καταναλώνεται η ηλεκτρική ενέργεια, που για να αντιμετωπιστεί οδηγεί σε επενδύσεις δικτύου μεγάλου κόστους και απωλειών. Στην αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου μπορούν να συνεισφέρουν οι μικρές ανεμογεννήτριες (Small Horizontal Wind Turbines, SHWT). Οι ανεμογεννήτριες αυτές, χαρακτηρίζονται από μέση ακτίνα ρότορα 1-2m και την ικανότητα να παράγουν 1-10kW ενέργειας, λειτουργώντας σε χαμηλά εύρη αριθμού Reynolds (200,00-450,000).

Οι αεροτομές που χρησιμοποιούνται στις πτέρυγες των SHWT είναι όμοιες με αυτές που χρησιμοποιούνται σε υψηλότερους αριθμούς Reynolds. Έτσι, τα χαρακτηριστικά του στρωτού οριακού στρώματος της γης που σχετίζονται με ροϊκές αστάθειες και αποκολλήσεις δεν λαμβάνονται υπόψιν, κάτι που οδηγεί σε αποκλίσεις έως και 10% σε σχέση με την ονομαστική παραγωγή ενέργειας [3]. Η αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου μπορεί να γίνει με τη χρήση τεχνικών παθητικού ή ενεργού ελέγχου ροής.

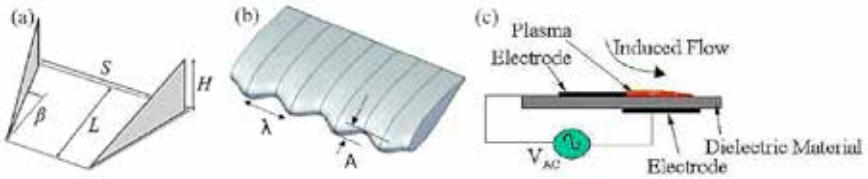


Εικόνα 1: Απεικόνιση μιας μεγάλης και μιας μικρής ανεμογεννήτριας μέσα στο οριακό στρώμα της γης

Η πιο συνηθισμένη μορφή ελέγχου ροής σε ανεμογεννήτριες ως τώρα είναι τα ακροπτερύγια (winglets). Τα ακροπτερύγια είναι μια τεχνική με ευρεία χρήση στην αεροναυτική, καθώς μειώνει την ένταση και το μέγεθος της δίνης ακροπτερυγίου, άρα και το συντελεστή αεροδυναμικής αντίστασης, και έτσι αυξάνει τη συνολική απόδοση του συστήματος. Η προσέγγιση της βιομηχανίας σε σχέση με τα ακροπτερύγια σε ανεμογεννήτριες είναι περιορισμένη και αφορά κυρίως τις μεγάλες ανεμογεννήτριες. Οι Gupta και Amano [4] απέδειξαν με τη χρήση υπολογιστικής ρευστομηχανικής ότι η προσθήκη ακροπτερυγίου γωνίας Cant 45° και ύψους 4.5% του εκπετάσματος σε ανεμογεννήτρια ακτίνας 20m, οδήγησε σε αύξηση της παραγόμενης ισχύος κατά 20% σε σχέση με την απλή διαμόρφωση. Η χρήση ακροπτερυγίων με γωνία Cant 90° οδήγησε σε μικρή μόνο βελτίωση. Οι Elfarra et al. [5] μελέτησαν την προσθήκη ακροπτερυγίου σε ανεμογεννήτρια με ακτίνα πτερυγίου 5 m με το μοντέλο τύρβης k-e. Σύμφωνα με την έρευνά τους τα ακροπτερύγια με κατεύθυνση προς την πλευρά αναρρόφησης παράγουν περισσότερη ενέργεια σε σχέση με τα ακροπτερύγια που έχουν κατεύθυνση προς την πλευρά πίεσης. Αν και υπάρχουν κάποιες βιβλιογραφικές μελέτες, κυρίως για μεγάλες ανεμογεννήτριες, δεν είναι ξεκάθαρη η μεθοδολογία διαστασιολόγησης ενός ακροπτερυγίου μικρής ανεμογεννήτριας. Η μεγαλύτερη περιστροφική ταχύτητα και η έντονα τυρβώδης και ασταθής ελεύθερη

ροή στην οποία λειτουργούν, δημιουργούν σημαντικές διαφορές στο ροϊκό πεδίο, που η επίδραση τους στην αποτελεσματικότητα της μεθοδολογίας σχεδιασμού δεν έχουν εξακριβωθεί.

Μια εναλλακτική τεχνική παθητικού ελέγχου της ροής είναι οι γεννήτριες τύρβης (Vortex Generators, VGs). Οι γεννήτριες αυτές είναι μικρά ελάσματα, τοποθετημένα κάθετα στην επιφάνεια παραγωγής άντωσης και υπό γωνία ως προς τη φορά της ροής (Εικόνα 2). Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται κυρίως σε αεροσκάφη και επομένως σε υψηλότερους αριθμούς Reynolds. Λειτουργούν δημιουργώντας δίνες που με τη σειρά τους καθυστερούν την απώλεια στήριξης, παρέχοντας ενέργεια στο οριακό στρώμα. Σύμφωνα με κάποιους ερευνητές [6,7] η χρήση γεννητριών τύρβης έχει θετικό αντίκτυπο σε γωνίες μεγαλύτερες από 10° για αριθμούς Reynolds $3x10^6$. Οι Mueller-Wahl et al. [8] απέδειξαν ότι για αριθμό Reynolds $1x10^6$ οι γεννήτριες τύρβης μπορούν να αυξήσουν την αποδοτικότητα (λόγος άντωσης προς αεροδυναμική αντίσταση, Lift to Drag, L/D) για γωνίες προσβολής μεγαλύτερες των 8°.



Εικόνα 2: Τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά των (a) VGs (b) Tubercles και (c) DBD PA

Ένας άλλος τρόπος ελέγχου της ροής είναι η χρήση αρθρωτών ογκιδίων (tubercles), δηλαδή μια ημιτονοειδής ακμή προσβολής, κάτι που σαν ιδέα πηγάζει από το πτερύγιο της μεγάπτερης φάλαινας (Megaptera Novaeangliae). Τα ογκίδια αυτά προσφέρουν στη φάλαινα σημαντική ευελιξία κινήσεων [9]. Κάθε ογκίδιο εισάγει ένα ζεύγος αντίρροπων δινών που ενεργοποιεί το οριακό στρώμα και καθυστερεί την αποκόλληση και άρα την εμφάνιση απώλειας στήριξης. Η ευρείας μελέτης αεροτομή NACA0021 επιλέχθηκε ως αεροτομή αναφοράς καθώς έχει το ίδιο ποσοστό πάχους με την αεροτομή που χρησιμοποιείται στην εργασία αυτή. Για τον αριθμό Reynolds 120,000 οι Hansen et al. [10] και Skillen et al. [11], απέδειξαν ότι κάποιες διαμορφώσεις αρθρωτών ογκιδίων μπορούν να αυξήσουν την αποδοτικότητα του πτερυγίου σε γωνίες προσβολής 5°-20°. Επιπλέον, μια μελέτη υπολογιστικής ρευστομηχανικής για μικρές ανεμογεννήτριες από τους Abate και Mavris [12] έδειξε ότι η χρήση αρθρωτών ογκιδίων θα μπορούσε να βελτιώσει τη συνολική απόδοση.

Τέλος, μια ενεργή μέθοδος ελέγχου ροής είναι ο ενεργοποιητής πλάσματος τύπου DBD (Dielectric Barrier Discharge). Το σύστημα αυτό αποτελείται από δυο ηλεκτρόδια που χωρίζονται από ένα διηλεκτρικό υλικό. Το ρεύμα που διαπερνάει το ένα ηλεκτρόδιο, ιονίζει τον αέρα και εφαρμόζει έτσι μια δύναμη στο ρευστό [13]. Οι Kurz et al. [14] παρουσίασαν πειραματικά και αριθμητικά αποτελέσματα όπου επιτυγχάνεται έλεγχος του οριακού στρώματος μιας αεροτομής ONERA-D με τη χρήση DBD. Η επίδραση του πλάσματος μοντελοποιείται με την επίλυση δύο επιπλέον εξισώσεων μεταφοράς, που μοντελοποιούν το ηλεκτρικό δυναμικό και την πυκνότητα των φορτισμένων σωματιδίων (ιόντων), οι οποίες συνθέτουν έναν επιπλέον όρο πηγής που προστίθεται στις εξισώσεις μεταφοράς ορμής [13,15].

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η εργασία αυτή χωρίζεται σε δύο βασικά σκέλη. Το άκρο του πτερυγίου (περίπου 3.7m από τον άξονα περιστροφής) και το μέσον του πτερυγίου (περίπου 2.67m από τον άξονα περιστροφής) επιλέχθηκαν ως οι δυο περιοχές ενδιαφέροντος. Προκειμένου να εξεταστεί το ακροπτερύγιο μελετήθηκε το σύνολο της ανεμογεννήτριας, ενώ για τις άλλες τρεις τεχνικές ελέγχου εξετάστηκε μόνο ένα τμήμα του πτερυγίου. Η μελέτη και στις δυο περιπτώσεις έγινε με τη χρήση υπολογιστικής ρευστομηχανικής. Σε κάθε περίπτωση, οι γεωμετρίες σχεδιάστηκαν λαμβάνοντας υπόψιν και τη μελλοντική κατασκευή τους από ανθρακονήματα ή υαλονήματα.

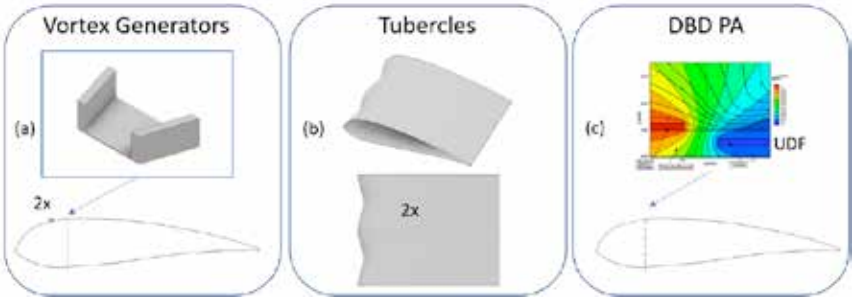
2.1. Μέσον πτερυγίου

Το εύρος λειτουργίας μιας μικρής ανεμογεννήτριας αντιστοιχεί σε αριθμούς Reynolds που κυμαίνονται από 200,000-450,000, αν υπολογιστεί στο μέσο του πτερυγίου, όπου το μήκος της χορδής είναι περίπου 0.4m. Επιλέχτηκε να γίνει διερεύνηση για τη μέση τιμή (300,000) αλλά και την τιμή εκκίνησης

λειτουργίας (200,000) της ανεμογεννήτριας, με ταχύτητες ανέμου 9.74 m/s και 14.61m/s αντίστοιχα. Για κάθε περίπτωση μελετήθηκαν οι γωνίες προσβολής -2° με 10°.

2.1.1. Γεννήτριες τύρβης

Ακολουθώντας το μέσο όρο των διαθέσιμων βιβλιογραφικών τιμών που αφορούν σε γεννήτριες τύρβης που χρησιμοποιούνται σε χαμηλα εύρη αριθμών Reynolds, δημιουργήθηκε μια καινούρια γεωμετρία γεννητριών τύρβης. Η προτεινόμενη διαμόρφωση τοποθετήθηκε στο 15% της χορδής, λίγο πριν το σημείο μέγιστου πάχους της αεροτομής, σύμφωνα με τις συστάσεις της βιβλιογραφίας [6,7]. Η διαμόρφωση έχει ύψος H ίσο με 1% της χορδής, μέγιστη μεταξύ τους απόσταση Z ίση με 5H, συνολικό μήκος L ίσο με 2% της χορδής, γωνία εκτροπής ως προς τη διεύθυνση της ροής β ίση με 18° και απόσταση S ίση με 4% της χορδής (Εικόνες 2 και 3a). Δύο ζεύγη γεννητριών τοποθετήθηκαν στο τμήμα της γεωμετρίας ώστε να ληφθούν υπόψιν τα περισσότερα από τα τρισδιάστατα φαινόμενα.



Εικόνα 3: Γεωμετρία και διαμόρφωση των (a) Γεννητριών τύρβης (b) Αρθρωτών ογκιδίων και (c) Ενεργοποιητή πλάσματος DBD

2.1.2. Αρθρωτά ογκίδια

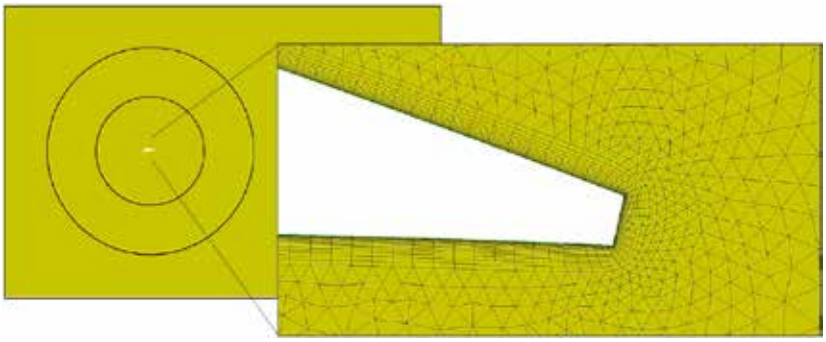
Η έλλειψη βιβλιογραφικών αναφορών σχετικά με την εφαρμογή αρθρωτών ογκιδίων σε μικρές ανεμογεννήτριες περιόρισε τις σχεδιαστικές επιλογές. Χρησιμοποιώντας για αναφορά βιβλιογραφικές έρευνες που αφορούν πτέρυγες με αρθρωτά ογκίδια σε χαμηλά εύρη αριθμού Reynolds, ένας μέσος όρος στις διαθέσιμες διαστάσεις οδήγησε τους συγγραφείς στην τελική σχεδίαση. Ως αποτέλεσμα, η γεωμετρία χαρακτηρίζεται από μια τιμή λ ίση με 20% της χορδής και εύρος A ίσο με 2% της χορδής (Εικόνα 3b).

2.1.3. Ενεργοποιητής πλάσματος

Με βάση τη διαθέσιμη βιβλιογραφία, χρησιμοποιήθηκε η μεθοδολογία που παρουσιάζεται στην εργασία των Vlahostergios et al. [13], ώστε να συμπεριληφθεί το πλάσμα τύπου DBD στην υπολογιστική προσομοίωση. Σύμφωνα με τη μεθοδολογία αυτή, προστίθεται ένας επιπλέον όρος πηγής στις εξισώσεις Reynolds Averaged Navier Stokes που προσομοιώνει την επίδραση του ηλεκτρικού δυναμικού τάσης 30kV στη ροή του αέρα (Εικόνα 3c). Αυτός ο όρος πηγής, μεταβάλει τα χαρακτηριστικά του οριακού στρώματος επηρεάζοντας με ελεγχόμενο τρόπο την εξέλιξη του πεδίου ροής.

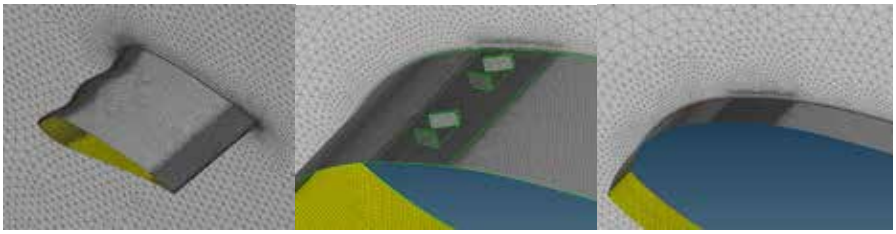
2.1.4. Υπολογιστική Ρευστομηχανική

Το υπολογιστικό πλέγμα (Εικόνα 4) κατασκευάστηκε στο λογισμικό BETA CAE Systems ANSA. Το πλέγμα αποτελείται από 1,500,000 υπολογιστικούς κόμβους και είναι αποτέλεσμα μελέτης ανεξαρτησίας πλέγματος έως ότου επιτεύχθηκε διαφορά μικρότερη του 2% στην τιμή του συντελεστή αεροδυναμικής αντίστασης (Coefficient of drag, C_D). Για τη μοντελοποίηση του οριακού στρώματος χρησιμοποιήθηκαν 18 δομημένα (structured-like) κελιά, ενώ το ύψος του πρώτου κελιού ορίστηκε ως $1.6x10^{-5}$m εξασφαλίζοντας έτσι μια τιμή του y+ μικρότερη της μονάδας, εξασφαλίζοντας την επίλυση του οριακού στρώματος έως το τοίχωμα, όπως απαιτείται από τα μοντέλα τύρβης χαμηλού αριθμού Reynolds.



Εικόνα 4: Ο όγκος ελέγχου και η ποιότητα πλέγματος για τις μελέτες στο μέσον του πτερυγίου

Προκειμένου οι διάφορες ιδιαιτερότητες της γεωμετρίας και της ροής που προκύπτουν από τις εκάστοτε γεωμετρίες να μοντελοποιηθούν με ακρίβεια, το πλέγμα πυκνώθηκε τοπικά στις περιοχές ενδιαφέροντος (Εικόνα 5). Έτσι, για την περίπτωση των αρθρωτών ογκιδίων, η πύκνωση εμφανίστηκε στην ακμή προσβολής, για τις δίνες γεννητριών η πύκνωση εμφανίστηκε στο σημείο τοποθέτησης των γεννητριών, ενώ τέλος για τον ενεργοποιητή πλάσματος, η πύκνωση του πλέγματος εμφανίστηκε στο σημείο της τοποθέτησης των δύο ηλεκτροδίων.



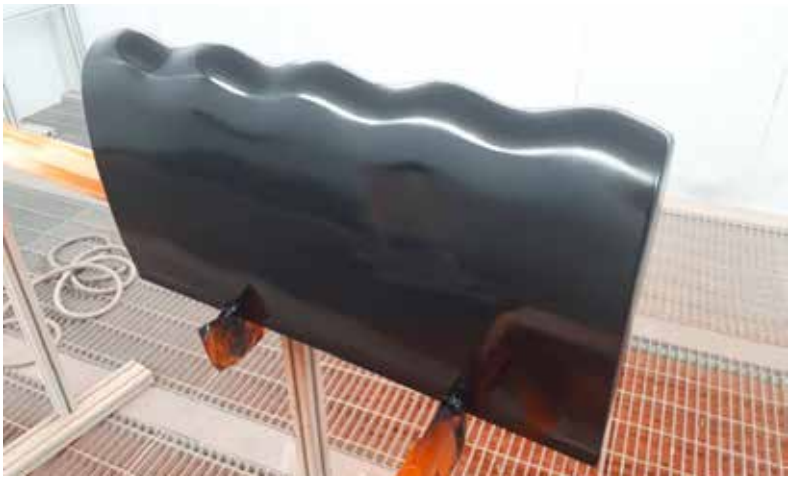
Εικόνα 5: Οι τοπικές πυκνώσεις στα πλέγματα για τα αρθρωτά ογκίδια (αριστερά), τις γεννήτριες τύρβης (κέντρο) και ενεργοποιητή πλάσματος (δεξιά)

Για τη μοντελοποίηση της ροής χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Ansys Fluent (ANSYS @ Scientific Research, Release 18.2). Ως μοντέλο τύρβης επιλέχθηκε το SST k-ω 4 εξισώσεων του Menter [16], καθώς προηγούμενες μελέτες έχουν δείξει ότι μπορεί να αναπαράγει με ικανοποιητική ακρίβεια πειραματικά δεδομένα στους μεταβατικούς αριθμούς Reynolds σε σχέση με άλλα μοντέλα τύρβης [17]. Η ένταση της τύρβης στην είσοδο του όγκου ελέγχου ορίστηκε ως 7% και το χαρακτηριστικός μήκος 0.06m, τιμές που προέρχονται από προηγούμενη εμπειρία των συγγραφέων σε πειραματικές διατάξεις.

2.1.5. Κατασκευή δοκιμίου πτερυγίου

Για την επιβεβαίωση των υπολογιστικών αποτελεσμάτων, κατασκευάστηκε μια πτέρυγα με αρθρωτά ογκίδια, ώστε να μελετηθεί σε αεροσήραγγα κλειστού τύπου (Εικόνα 6). Η επιβεβαίωση αυτή θα αποτελέσει ένα ακόμα βήμα στην ανάπτυξη μηχανισμών παθητικού ελέγου ροής για τα πτερύγια μιας μικρής ανεμογεννήτριας.

Η πτέρυγα κατασκευάστηκε από ανθρακονήματα, κάτι που συνεισέφερε στην εξαιρετική απόδοση της γεωμετρίας που σχεδιάστηκε, με μικρό βάρος δομής. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των πτερύγων των ανεμογεννητριών είναι προεμποτισμένα υφάσματα ανθρακονήματος και πυρήνας ROHACELL 4mm. Τα υλικά επιστρώθηκαν σε καλούπια φτιαγμένα από εποξικό αφρό υψηλής πυκνότητας τα οποία κατεργάστηκαν σε προγραμματιζόμενες εργαλειομηχανές και αποτυπώνουν πλήρως τη σχεδιασμένη γεωμετρία του πτερυγίου. Κατά τη μέθοδο με προεμποτισμένα υφάσματα (prepreg), τα υλικά τοποθετούνται σε καλούπι το οποίο εισάγεται σε αυτόκλειστο φούρνο όπου σε συγκεκριμένες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης λαμβάνει χώρα ο πολυμερισμός της ρητίνης και προκύπτει το τελικό κομμάτι.



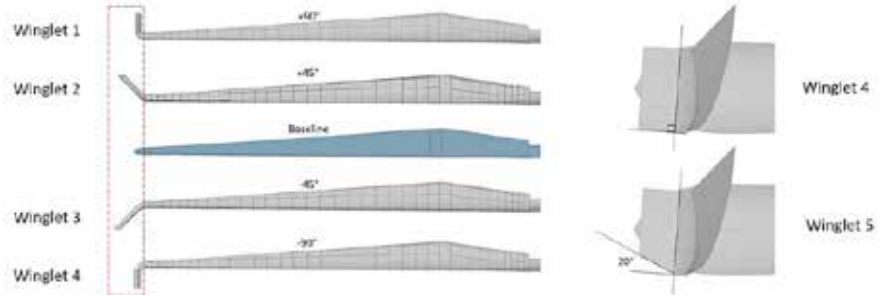
Εικόνα 6: Το δοκίμιο από ανθρακονήματα που κατασκευάστηκε για τη μελέτη των αρθρωτών ογκιδίων σε αεροσήραγγα κλειστού τύπου

2.2. Άκρο πτερυγίου

Στην περίπτωση του ακροπτερυγίου, επιλέχθηκε η μέση ταχύτητα των 9.74 m/s. Συνολικά εξετάστηκαν 5 ακροπτερύγια, όπου το 5^{ο} είναι μια παραλλαγή του 4^{ου}. Ο λόγος της εφαπτομενικής ταχύτητας προς την ταχύτητα της ελεύθερης ροής λ (tip speed ratio) ορίστηκε ως 5, μετά από αντίστοιχη μελέτη.

2.2.1. Γεωμετρία ακροπτερυγίου

Τα ακροπτερύγια 1 ως 4, έχουν γωνία Cant 90°, +45°,-45° and -90°, ενώ το ακροπτερύγιο 5 έχει και αυτό γωνία Cant -90° (Εικόνα 7). Ο λόγος εγκλεισμού (taper ratio) για τα ακροπτερύγια 1-4 είναι 1, ενώ για το ακροπτερύγιο 5 είναι 0.83 ώστε να εξεταστεί η επίδραση της οπισθόκλισης. Οι γωνίες twist και toe καθώς σύμφωνα με τη διαθέσιμη βιβλιογραφία έχουν μικρή επίδραση στη συνολική απόδοση του συστήματος. Το ύψος των ακροπτερυγίων τέθηκε ίσο με 5% της ακτίνας του πτερυγίου.



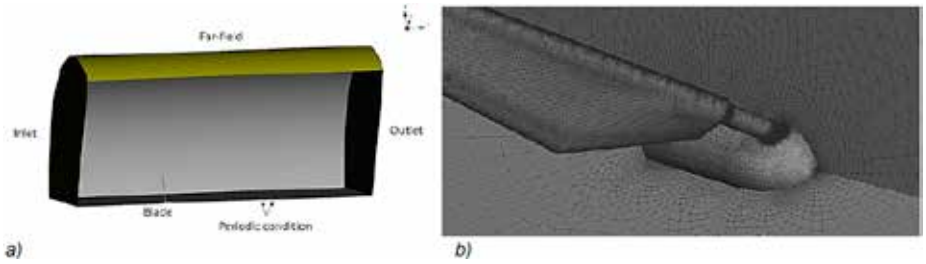
Εικόνα 7: Τα ακροπτερύγια υπό μελέτη σε σχέση με την αρχική απλή γεωμετρία (baseline)

2.2.2. Υπολογιστική Ρευστομηχανική

Ο όγκος ελέγχου που χρησιμοποιήθηκε αποτελεί το ένα τρίτο του συνόλου, καθώς το πλαίσιο θεωρείται περιστρεφόμενο σε σχέση με το πτερύγιο (Εικόνα 8). Ο όγκος ελέγχου έχει 1.5 διαμέτρους μπροστά από την ανεμογεννήτρια, 3.5 στον απόρρου και 2.5 στην ακτινική διεύθυνση.

Το πλέγμα είναι δομημένο και αποτελείται από 4,700,000 υπολογιστικούς κόμβους. Όπως και προηγουμένως, χρησιμοποιήθηκαν 18 δομημένα (structured-like) κελιά, εξασφαλίζοντας έτσι μια τιμή y+ μικρότερη του 1. Ως μοντέλο τύρβης επιλέχθηκε το SST k-ω, το οποίο επιλύθηκε στο λογισμικό

Ansys Fluent (ANSYS @ Scientific Research, Release 18.2). Τέλος, η ένταση της τύρβης ορίστηκε στο 5%, μια χαρακτηριστική τιμή για τη λειτουργία ανεμογεννητριών.



Εικόνα 8: Ο όγκος ελέγχου (a) και εικόνα του πλέγματος στο πτερύγιο της ανεμογεννήτριας (b)

2.2.3. Κατασκευή πρωτοτύπου ακροπτερυγίου

Με στόχο την καλύτερη αξιολόγηση της γεωμετρίας που σχεδιάστηκε, το ακροπτερύγιο Winglet 3, επιλέχτηκε να κατασκευαστεί ώστε να δοκιμαστεί σε πραγματικές συνθήκες, τοποθετημένο σε μια μικρή ανεμογεννήτρια. Ύστερα από μελέτη εφαρμοσιμότητας και αντοχής, το ακροπτερύγιο κατασκευάστηκε από στρώσεις ανθρακονήματος που συνδιάζουν μικρό βάρος και στιβαρή δομή (Εικόνα 9).

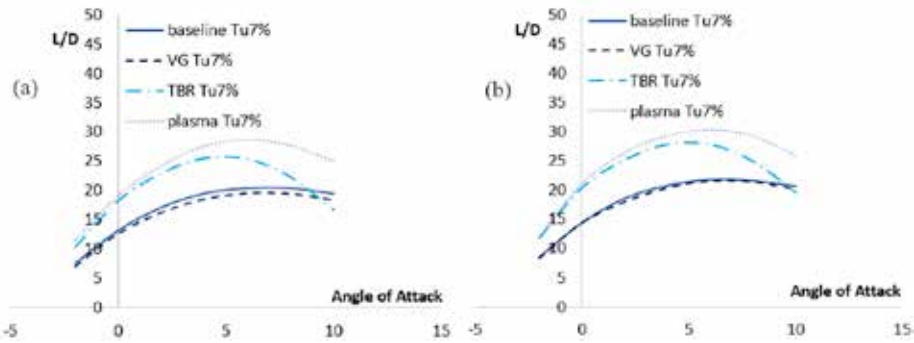
Εικόνα 9: Η σχεδιασμένη γεωμετρία του ακροπτερυγίου (αριστερά) το καλούπι (κέντρο) και το τελικό αποτέλεσμα (δεξιά)

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Σκοπός αυτής της εργασίας είναι να δοκιμαστεί η ικανότητα διαφόρων μεθόδων ελέγχου ροής να βελτιώσουν τη συνολική απόδοση της ανεμογεννήτριας.

3.1. Μέσο πτερυγίου

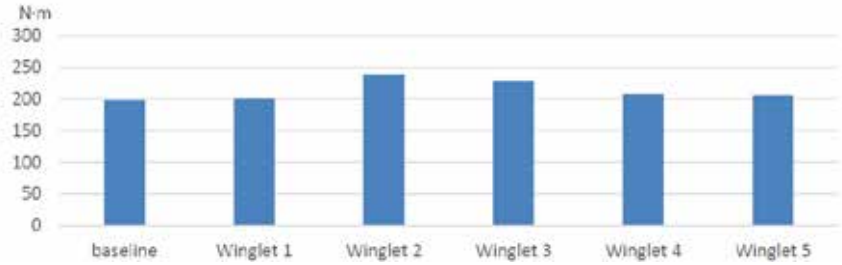
Για το μέσο του πτερυγίου, το βασικό κριτήριο είναι η μέγιστη τιμή του λόγου δύναμης άντωσης προς οπισθέλκουσα (λόγος L/D). Σύμφωνα με την Εικόνα 10, μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι ο ενεργοποιητής πλάσματος (plasma) και τα αρθρωτά ογκίδια (tubercles, TBR) οδηγούν σχεδόν σε διπλάσια τιμή λόγου L/D σε σχέση με την απλή αεροτομή (baseline) του πτερυγίου. Εξαίρεση αποτελούν οι μεγάλες γωνίες προσβολής, όπου λόγω αδυναμίας του μοντέλου τύρβης να προβλέψει ικανοποιητικά τα ζεύγη δινών που αποκολλώνται από τα αρθρωτά ογκίδια, παρουσιάζεται μια σημαντική αύξηση στο συντελεστή αντίστασης. Οι γεννήτριες τύρβης (vortex generators, VG) παρουσίασαν παρόμοια τιμή L/D με την απλή αεροτομή.



Εικόνα 10: Λόγος L/D για την περίπτωση του αριθμού Reynolds 200,000 (a) και 300,000 (b)

3.2. Άκρο πτερυγίου

Στην Εικόνα 11 παρουσιάζεται η ροπή που παράγει το πτερύγιο σε κάθε περίπτωση. Μεγαλύτερη ροπή οδηγεί σε μεγαλύτερο συντελεστή ισχύος (Coefficient of Power, C_p), δηλαδή καλύτερη εκμετάλλευση της ενέργειας της ελεύθερης ροής. Ακροπτερύγια με γωνία Cant 45° φαίνεται να είναι τα πιο αποτελεσματικά.



Εικόνα 11: Παραγόμενη ροπή για τα ακροπτερύγια που σχεδιάστηκαν

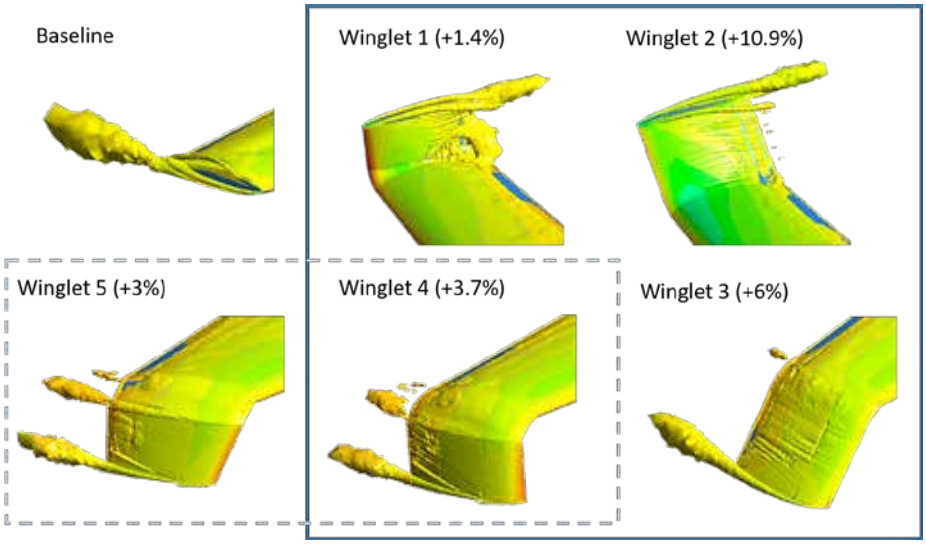
Η ανεμογεννήτρια χωρίς κάποιο ακροπτερύγιο χαρακτηρίζεται από C_p ίσο με 0.3579, ενώ η χρήση ακροπτερυγίων μπορεί να αυξήσει το συντελεστή αυτό ως και 11%, όπως φαίνεται στον Πίνακα 1. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει πως η αύξηση της ροπής δεν οφείλεται μόνο στην αντίστοιχη αύξηση του μήκος του πτερυγίου, αλλά και τη σαφή βελτίωση των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών, καθώς στον υπολογισμό του συντελεστή, η ροπή αδιαστατοποιείται με την επιφάνεια που καταλαμβάνει ο δίσκος των πτερυγίων.

Πίνακας 1: Τα ακροπτερύγια υπό μελέτη και η αποδοτικότητά τους

Ακροπτερύγιο	Γωνία Cant	Οπισθόκλιση	Αύξηση	Αύξηση % του $C_{p_baseline}$
Winglet 1	+90°	0°	0.005	1.4
Winglet 2	+45°	0°	0.042	10.9
Winglet 3	-45°	0°	0.022	6
Winglet 4	-90°	0°	0.013	3.7
Winglet 5	-90°	20°	0.010	3

Η οπτικοποίηση της ροής κοντά στο ακροπτερύγιο στην Εικόνα 12, βοηθάει την καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων του Πίνακα 1. Γίνεται εμφανές, ότι η απώλεια ακροπτερυγίου δημιουργεί ένα

μεγάλο και πολύπλοκο απόρρου. Αντίθετα, τα ακροπτερύγια 2 και 3 φαίνεται να έχουν τον μικρότερο και ηπιότερο απόρρου, κάτι που συμφωνεί με τα αριθμητικά αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν νωρίτερα.



Εικόνα 12: Κατανομή πίεσης στον απόρρου των ακροπτερυγίων με τη χρήση μεθόδου Q criterion με τιμή 26,490 s^{-2}

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή παρουσιάστηκε η μελέτη ενεργών και παθητικών μεθόδων ελέγχου της ροής, με στόχο τη βελτιστοποίηση της απόδοσης μιας μικρής ανεμογεννήτριες. Οι μέθοδοι αυτές εξετάστηκαν τμηματικά στο άκρο ή στο μέσον του πτερυγίου. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η προσθήκη ακροπτερυγίου βελτιώνει σε κάθε περίπτωση την παραγόμενη ροπή και την ώση. Τα ακροπτερύγια με γωνία Cant ±45° παρουσιάζουν τα καλύτερα αποτελέσματα. Όσον αφορά το μέσον του πτερυγίου, τα αρθρωτά ογκίδια και ο ενεργοποιητής πλάσματος φαίνεται να αυξάνουν σημαντικά την αεροδυναμική αποδοτικότητα. Αντίθετα, ο τύπος γεννητριών τύρβης που μελετήθηκε σε αυτή την εργασία δε φαίνεται να έχει σημαντική επίδραση στην αεροδυναμική αποδοτικότητα. Για τις γεωμετρίες που αναδυκνείονται ως οι καλύτερες θα σχεδιαστούν και θα κατασκευαστούν δοκίμια από ανθρακονήματα ή υαλονήματα ώστε να μελετηθούν σε πειραματικές διατάξεις και να επαληθευτεί έτσι η υπολογισμένη απόδοσή τους.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η έρευνα αυτή εντάσσεται στο πλαίσιο του προγράμματος “ADVENTUS-Advanced Small Wind Turbines” το οποίο χρηματοδοτείται από το Ευρωπαϊκό Ταμείο Περιφερειακής Ανάπτυξης, Εταιρικό Σύμφωνο για το Πλαίσιο Ανάπτυξης (2014-2020), συγχρηματοδοτούμενο από το Ελληνικό κράτος και την Ευρωπαϊκή Ένωση στο πλαίσιο ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ: “Ανταγωνιστικότητα, Επιχειρηματικότητα και Καινοτομία 2014-2020 (ΕΠΑνΕΚ)”, Nationwide Action: “Bilateral and Multilateral R&D Cooperations”.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Thé, J. and Yu, H., 2017, “A critical review on the simulations of wind turbine aerodynamics focusing on hybrid RANS-LES,” methods, Energy, 138, pp. 257-289.

[2] Pfaffel, S., Faulstich, S. and Rohrig, K., 2017, “Performance and reliability of wind turbines: A review,” energies, 10(11), p.1904.

[3] Ren, Z., Jiang, Z., Skjetne, R. and Gao, Z., 2018, “Development and application of a simulator for offshore wind turbine blades installation,” Ocean Engineering, 166, pp.380-395.

[4] Gupta, A. and Amano, R.S., 2012, August, “CFD analysis of wind turbine blade with winglets,” In International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (Vol. 45042, pp. 843-849). American Society of Mechanical Engineers.

[5] Elfarra M.A., Sezer Uzol N., Akmandor İ.S., 2015, “Investigations on blade tip tilting for HAWT rotor blades using CFD,” International Journal of Green Energy, 1, 12(2), 125-138.

[6] Miller, G.E., 1984, “Comparative performance tests on the Mod-2, 2.5-MW wind turbine with and without vortex generators,” NASA TM, (95), p.27978.

[7] Gao, L., Zhang, H., Liu, Y. and Han, S., 2015, “Effects of vortex generators on a blunt trailing-edge airfoil for wind turbines,” Renewable Energy, 76, pp.303-311.

[8] Mueller-Vahl, H., Pechlivanoglou, G., Nayeri, C.N. and Paschereit, C.O., 2012, June, “Vortex generators for wind turbine blades: A combined wind tunnel and wind turbine parametric study,” In Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air (Vol. 44724, pp. 899-914). American Society of Mechanical Engineers.

[9] Aftab, S.M.A., Razak, N.A., Rafie, A.M. and Ahmad, K.A., 2016. Mimicking the humpback whale: An aerodynamic perspective. Progress in Aerospace Sciences, 84, pp.48-69.

[10] Hansen, K.L., Kelso, R.M. and Dally, B.B., 2011, “Performance variations of leading-edge tubercles for distinct airfoil profiles,” AIAA journal, 49(1), pp.185-194.

[11] Skillen, A., Revell, A., Favier, J., Pinelli, A. and Piomelli, U., 2013, “Investigation of wing stall delay effect due to an undulating leading edge: An LES study,” In Eighth International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena. Begel House Inc..

[12] Abate, G. and Mavris, D.N., 2017, “Cfd analysis of leading edge tubercle effects on wind turbine performance,” In 15th international energy conversion engineering conference (p. 4626).

[13] Vlahostergios, Z., Kaparos, P. and Yakinthos, K., 2019, “By-pass transition control with a DBD plasma actuator model coupled with a laminar kinetic energy turbulence model,” Progress in Computational Fluid Dynamics, an International Journal, 19(3), pp.137-159.

[14] Kurz, A., Grundmann, S., Tropea, C., Forte, M., Seraudie, A., Vermeersch, O., Arnal, D., Goldin, R. and King, R., 2013, “Boundary layer transition control using DBD plasma actuators,” AerospaceLab, (6), pp.p-1.

[15] Grundmann, S., Barckmann, K., Maden, I., Kriegseis, J., Jakirlic, S.Z., Tropea, C.D. and Grundmann, S., 2014, “Evaluating force field induced by a plasma actuator using the Reynolds-Averaged Navier Stokes equation,” In 52nd Aerospace Sciences Meeting (p. 0326).

[16] Menter, F.R., Langtry, R.B., Likki, S.R., Suzen, Y.B., Huang, P.G. and Volker, S., 2004, January, “A correlation-based transition model using local variables: Part I—model formulation,” In Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air (Vol. 41693, pp. 57-67).

[17] Papadopoulos, C., Kaparos, P., Vlahostergios, Z., Misirlis, D. and Yakinthos, K., 2021, “2D optimization of a Small Horizontal Axis Wind Turbine blade using flow control techniques,” In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 1024, No. 1, p. 012041). IOP Publishing.

Η ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΩΝ ΗΠΙΩΝ ΜΟΡΦΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΛΕΙΨΥΔΡΙΑΣ ΤΩΝ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΝΗΣΙΩΝ. Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΝΙΣΥΡΟΥ

Π. Τριανταφύλλου[1], Αγγ. Καλδέλλης[1], Π. Κολλάς[2],

Χρ. Κορωναίος[3], Ι.Κ. Καλδέλλης[1*]

[1] Εργαστήριο Ήπιων Μορφών Ενέργειας & Προστασίας Περιβάλλοντος, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής, 12201 Αθήνα
[2] UNISCRAP PBC, 1000 NW Street, Wilmington, Delaware, USA,
[3] Δήμος Νισύρου, 85303 Νίσυρος, Τ.Θ. 41046
**Corresponding author: jkald@uniwa.gr*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια η ραγδαία ανάπτυξη της τουριστικής κίνησης και η έλλειψη σχεδίου αποτελεσματικής και ορθολογικής διαχείρισης των διαθέσιμων υδάτινων πόρων, σε συνδυασμό με τα συνήθως χαμηλά επίπεδα βροχοπτώσεων στα νησιά του Αιγαίου, έχουν οδηγήσει τα περισσότερα μικρά νησιά του Αρχιπελάγους σε έντονα προβλήματα λειψυδρίας. Σε μια προσπάθεια να περιοριστεί η περιβαλλοντικά και οικονομικά προβληματική μεταφορά πόσιμου νερού στα νησιά αυτά είτε από την ενδοχώρα ή από μεγαλύτερα γειτονικά νησιά, έχει εγκατασταθεί τα τελευταία χρόνια σημαντικός αριθμός μονάδων αφαλάτωσης, βασισμένων κυρίως στη μέθοδο της αντίστροφης ώσμωσης.

Ωστόσο, η απρόσκοπτη λειτουργία των εν λόγω μονάδων είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την κατανάλωση σημαντικών ποσών ηλεκτρικής ενέργειας, που κατά κανόνα παράγεται στους υφιστάμενους αυτόνομους θερμικούς σταθμούς των νησιών. Η λειτουργία των εν λόγω σταθμών βασίζεται σε εισαγόμενο πετρέλαιο, με αποτέλεσμα τόσο την οικονομική, όσο και την περιβαλλοντική επιβάρυνση της τοπικής κοινωνίας, καθώς επίσης και του συνόλου των καταναλωτών ηλεκτρικής ενέργειας της χώρας μας μέσω των τιμολογιακών πολιτικών (ΥΚΩ) που έχουν υιοθετηθεί.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα ενός ελληνικού νησιού μικρού μεγέθους, στο οποίο το πρόβλημα έλλειψης υδάτινων πόρων επιτείνεται και από το ηφαιστειακό του ιστορικό, είναι η Νίσυρος. Επί του παρόντος, η Νίσυρος διαθέτει σε λειτουργία τρεις μονάδες αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης, συνολικής δυναμικότητας 1.000 m^3/day, η ετήσια λειτουργία των οποίων θεωρείται υπεύθυνη για το 25 % της συνολικής (περίπου 6000 MWh_e) ηλεκτρικής κατανάλωσης του νησιού.

Στο πλαίσιο αυτό, η παρούσα εργασία διερευνά τους οικονομικά αποδεκτούς και λειτουργικά βέλτιστους τρόπους αξιοποίησης του ενεργειακού δυναμικού των Ήπιων-Ανανεώσιμων Μορφών Ενέργειας της Νισύρου, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η κατανάλωση πετρελαίου για την παραγωγή αφαλατωμένου νερού. Για το σκοπό αυτό, σε συνεργασία με τις δημοτικές αρχές, οι οποίες στηρίζουν έμπρακτα την ερευνητική αυτή προσπάθεια, επιχειρείται και η χωροθέτηση μονάδων αξιοποίησης του ηλιακού δυναμικού του νησιού για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, με τη δημιουργία των απαραίτητων φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων. Τα πρώτα αποτελέσματα της πρωτοποριακής αυτής προσπάθειας είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντικά ως προς τα οφέλη που η τοπική κοινωνία δύναται να αποκομίσει και ενισχύουν περαιτέρω την απόφαση των συνεργαζόμενων μερών για στοχευμένες συμπληρωματικές δράσεις προς επίτευξη της μέγιστης ενεργειακής αυτονομίας της Νισύρου, βασισμένες στην αξιοποίηση των διαθέσιμων Ήπιων Μορφών Ενέργειας.

Λέξεις Κλειδιά: *Αφαλάτωση, Ηλεκτρική Ενέργεια, Φωτοβολταϊκά Πλαίσια, Αιολική Ενέργεια, Γεωθερμία*

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σύμφωνα με επίσημα δεδομένα [1], ένας εκτεταμένος αριθμός νησιών (υπερβαίνει τα 2500) βρίσκονται διάσπαρτα στο Αιγαίο πέλαγος. Σημαντικός αριθμός (περίπου 7%) από αυτά είναι κατοικημένα. Το ημιάνυδρο κλίμα [2], η χρήση συμβατικών πηγών ενέργειας καθώς και η σχετικά μεγάλη απόσταση από την ηπειρωτική χώρα [3] αποτελούν τα βασικά κοινά τους χαρακτηριστικά. Απόρροια του προαναφερθέντος τύπου κλίματος αποτελεί η σημαντική έλλειψη υδάτινων πόρων, η οποία δυσχεραίνει τόσο τις οικιακές όσο και τις γεωργικές δραστηριότητες της μεγάλης πλειοψηφίας των μικρών και μικρομεσαίων ελληνικών νησιών κι επιβαρύνει κατ' αυτόν τον τρόπο την ποιότητα ζωής των κατοίκων, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού [4]. Προς επιβεβαίωση των προαναφερθέντων, στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται η φθίνουσα τάση που καταγράφουν οι ετήσιες βροχοπτώσεις κατά τη διάρκεια των τελευταίων 40 ετών. Για την υπό εξέταση περιοχή η συνολική μείωση των ετήσιων βροχοπτώσεων τη συγκεκριμένη περίοδο υπολογίζεται στα επίπεδα των 22 mm [5].

Η κατάσταση σε ορισμένα νησιά είναι ακόμα δυσμενέστερη, αν αναλογιστεί κανείς το ήδη επιβαρυμένο υπέδαφος εξαιτίας των διαφόρων λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων που χρησιμοποιούνται στις αγροτικές δραστηριότητες, τη μόλυνση του νερού που προέρχεται από τα θειούχα ηφαιστειακά πετρώματα και ορυκτά και τη διείσδυση αλάτων στους υδροφόρους ορίζοντες [6]. Επιπρόσθετα, η μέση ζήτηση νερού κατά τους καλοκαιρινούς μήνες δύναται ακόμη και να τριπλασιαστεί σε σχέση με τη μέση ετήσια τιμή της, γεγονός που μπορεί να αποδοθεί στην αύξηση του τουρισμού και κατ' επέκταση στον ενεργό πληθυσμό των νησιών [5], [7]. Η συγκεκριμένη κατάσταση θέτει σε κίνδυνο την οικονομική ανάπτυξη των απομακρυσμένων περιοχών, καθώς σε πλανητικό επίπεδο τόσο η ποιότητα όσο και η διαθεσιμότητα των υδάτινων πόρων είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την οικονομική τους ευημερία [8].

Προκειμένου να αντιμετωπίσει την υφιστάμενη κατάσταση, το ελληνικό κράτος σε συνεργασία με τις τοπικές αρχές έχει υιοθετήσει την επιζήμια κι αμφιβόλου ποιότητας πολιτική της μεταφοράς πόσιμου νερού από άλλες περιοχές χρησιμοποιώντας δεξαμενόπλοια [9]. Δυστυχώς, το κόστος στη συγκεκριμένη περίπτωση μπορεί να ανέλθει ακόμη και σε 10 €/m^3 νερού [7]. Υπό αυτό το πρίσμα και ως εναλλακτική στην προαναφερθείσα πολιτική, έχει πραγματοποιηθεί εκτεταμένη έρευνα στη διερεύνηση των τεχνικών αφαλάτωσης νερού [10], [11]. Αναμεσά τους, οι τεχνικές αφαλάτωσης νερού βασισμένες στην αντίστροφη ώσμωση είναι οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες στα νησιά, εξαιτίας της ευελιξίας και των υψηλών τους αποδόσεων [12]. Άμεσο συνεπακόλουθο της εφαρμογής τους αποτελεί η αύξηση της τοπικής ηλεκτρικής ζήτησης, η οποία κυμαίνεται στο εύρος 2.5-10 kWh/m^3 νερού [5], [13].

Για να αντιμετωπιστεί η συγκεκριμένη κατάσταση, ιδιαίτερα κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, και λαμβάνοντας υπόψη τις τεχνικές προκλήσεις που παρουσιάζουν οι υποδομές των δικτύων διανομής, έχουν ενισχυθεί οι τοπικοί αυτόνομοι (ΑΣΠ) σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής. Η λειτουργία των ΑΣΠ βασίζεται σε εισαγόμενο πετρέλαιο, με αποτέλεσμα τόσο την οικονομική, όσο και την περιβαλλοντική επιβάρυνση της τοπικής κοινωνίας, καθώς επίσης και του συνόλου των καταναλωτών ηλεκτρικής ενέργειας της χώρας μας μέσω των τιμολογιακών πολιτικών (ΥΚΩ) που έχουν υιοθετηθεί.

Από την άλλη πλευρά, η διαφοροποίηση του ενεργειακού μίγματος θεωρείται ως προ-απαιτούμενο για τη μελλοντική βιωσιμότητα του ενεργειακού τομέα [14]. Είναι χαρακτηριστικό ότι τα περισσότερα νησιά του Αρχιπελάγους χαρακτηρίζονται από πλούσιο δυναμικό σε Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) [12]. Στο πλαίσιο αυτό, η εγκατάσταση μονάδων αφαλάτωσης νερού με αντίστροφη ώσμωση, οι οποίες τροφοδοτούνται από ΑΠΕ, μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένα κόστη λειτουργίας καθώς επίσης να περιορίσει την περιβαλλοντική επιβάρυνση που σχετίζεται με τη χρήση των ορυκτών καυσίμων. Ως εκ τούτου, θεωρείται εξαιρετικά σημαντικό να σχεδιασθούν και να υλοποιηθούν βιώσιμες εναλλακτικές στρατηγικές ηλεκτροδότησης των συγκεκριμένων εφαρμογών στα απομακρυσμένα νησιά του Αιγαίου έτσι ώστε να μειωθεί η εξάρτησή τους από τη χρήση ορυκτών καυσίμων [15], [16].

Μεταξύ των ΑΠΕ η Ηλιακή και η Αιολική ενέργεια παρουσιάζουν τις υψηλότερες προοπτικές αξιοποίησης [5], [12]. Στο πλαίσιο αυτό, η παρούσα μελέτη διερευνά τις βιώσιμες λύσεις ηλεκτροδότησης των μονάδων αφαλάτωσης που έχουν εγκατασταθεί στη Νίσυρο με ενέργεια προερχόμενη από τοπικούς Φωτοβολταϊκούς (Φ/Β) σταθμούς. Πιο συγκεκριμένα, η Ενότητα 2 εξετάζει τις υποδομές του νησιού και την τρέχουσα ενεργειακή του κατάσταση, διερευνώντας τις ενεργειακές ανάγκες κάθε τομέα οικονομικής δραστηριότητας. Επιπλέον, καταγράφονται τόσο η έλλειψη υδάτινων πόρων όσο και η στρατηγική που έχει υιοθετηθεί από τις τοπικές αρχές για την αντιμετώπισή της. Η Ενότητα 3 παρουσιάζει συνοπτικά το δυναμικό σε ΑΠΕ του νησιού βασισμένη σε δεδομένα του τοπικού μετεωρολογικού σταθμού και υπάρχουσες βιβλιογραφικές πηγές. Ακολούθως, στην Ενότητα 4 εξετάζεται η προτεινόμενη λύση. Η εργασία ολοκληρώνεται με την παράθεση ουσιαστικών συμπερασμάτων στην Ενότητα 5.

Σχήμα 1: Χωρική κατανομή της μείωσης του επιπέδου βροχοπτώσεων στην Ελλάδα [5].

2. Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΝΙΣΥΡΟΥ

2.1. Γενικές πληροφορίες για τη Νίσυρο

Η Νίσυρος είναι ένα ηφαιστειογενές ελληνικό νησί που βρίσκεται μεταξύ της Κω και της Τήλου στο κέντρο του Δωδεκανησιακού συμπλέγματος στο νοτιοανατολικό (ΝΑ) Αιγαίο (Σχήμα 2). Απέχει 58 ναυτικά μίλια από τη Ρόδο, ενώ περιτριγυρίζεται από 5 νησίδες, η μεγαλύτερη εκ των οποίων είναι το Γυαλί, ενώ ακολουθούν η Πυργούσα (ή Περγούσα), η Παχιά, η Στρογγυλή και η Κανδελέουσα (ή Φανάρι) [17]. Αποτελεί το δέκατο μεγαλύτερο σε έκταση νησί, με τη συνολική του επιφάνεια να είναι ίση με 41.2 km^2, ενώ το σχήμα του μοιάζει με αυτό ενός κόλουρου κώνου, με διάμετρο βάσης 8 km [18].

Το Σχήμα 3 απεικονίζει τη δημογραφική εξέλιξη της Νισύρου. Σύμφωνα με τις σχετικές καταγραφές της Εθνικής Στατιστικής Αρχής κατά την περίοδο 1951-2011 [19], πραγματοποιήθηκε μία συνεχόμενη μείωση του πληθυσμού μέχρι το 1981, όταν κι ο πληθυσμός σταθεροποιήθηκε στα σημερινά επίπεδα, παρουσιάζοντας μάλιστα έκτοτε και μία μικρή αυξητική τάση. Το 2011, ο πληθυσμός του νησιού ξεπερνούσε οριακά τους 1000 κατοίκους. Λαμβάνοντας υπόψη τον ετήσιο αριθμό τουριστών, ο μέσος ανηγμένος ετήσιος πληθυσμός πλησιάζει τους 2000 κατοίκους κι αποτελεί τη βάση αναφοράς στην οποία θα πρέπει να στηριχθεί ο σχεδιασμός νέων έργων υποδομής στον ενεργειακό τομέα του νησιού.

Σχήμα 2: Χάρτης Δωδεκανήσων στο ΝΑ Αιγαίο.

Σχήμα 3: Διαχρονική εξέλιξη πληθυσμού της Νισύρου (Δεδομένα από [19]).

2.2. Η ενεργειακή κατάσταση της Νισύρου

Το Σχήμα 4 παρουσιάζει τα διασυνδεδεμένα και μη ελληνικά νησιά. Έως σήμερα, πρόσθετα έργα διασύνδεσης έχουν πραγματοποιηθεί κατά τη διάρκεια των τελευταίων δύο ετών στα νησιά της Μυκόνου, της Νάξου, της Πάρου και της Σύρου, τα οποία ανήκουν στις Κυκλάδες, ενώ κανένα σχετικό έργο δεν έχει υλοποιηθεί στο Δωδεκανησιακό Σύμπλεγμα [20].

Η Νίσυρος καλύπτει τις ηλεκτρικές της ανάγκες ως μέρος του μικροδικτύου «Κως-Κάλυμνος», που αποτελείται από εννέα νησιά. Δύο πετρελαϊκοί σταθμοί (ο πρώτος με ονομαστική ισχύ 102 MW είναι εγκατεστημένος στην Κω, ενώ ο δεύτερος με ονομαστική ισχύ 18 MW είναι εγκατεστημένος στην Κάλυμνο) τροφοδοτούν με ηλεκτρική ενέργεια το συγκεκριμένο μικροδίκτυο. Πιο συγκεκριμένα, η

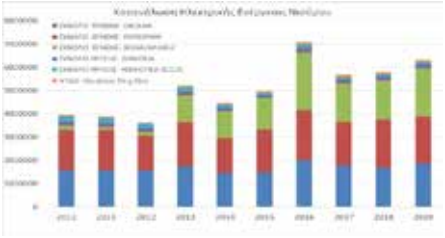
Νίσυρος τροφοδοτείται με ηλεκτρική ενέργεια μέσω δύο υποθαλάσσιων καλωδίων που ξεκινούν από την Κω και καταλήγουν στο βόρειο μέρος του νησιού (πλησίον του Μανδρακίου) μέσω της νήσου Γυαλί. Ακολούθως, η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας διοχετεύεται στο νότιο άκρο του μικροδικτύου στην Τήλο, από το νότιο μέρος του νησιού (περιοχή Αυλάκι) (Σχήμα 5).

Σχήμα 4: Διασυνδεδεμένα και μη ελληνικά νησιά.

Σχήμα 5: Απεικόνιση του αυτόνομου ηλεκτρικού μικροδικτύου "Κως-Κάλυμνος".

Η ανάλυση των ενεργειακών αναγκών του νησιού ανά τομέα οικονομικής δραστηριότητας θεωρείται κρίσιμη, καθώς δύναται να καταδείξει τους τομείς όπου μπορούν να υλοποιηθούν στοχευμένες παρεμβάσεις. Το Σχήμα 6 παρουσιάζει την ανά οικονομικό τομέα συνολική ενεργειακή κατανάλωση της Νισύρου κατά τη δεκαετία 2010 – 2019, οπότε μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

• Σημαντική διακύμανση, η οποία εξομαλύνεται κατά τη διάρκεια της τριετίας 2017-2019, χαρακτηρίζει τη συνολική κατανάλωση ενέργειας του νησιού, με την τελευταία καταγεγραμμένη τιμή να υπερβαίνει τις 6200 MWh_e. Διερευνάται η περίπτωση να μην καταγράφονται επαρκώς τα στοιχεία από το Διαχειριστή του Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΔΕΔΔΗΕ).
• Ο οικιακός, ο εμπορικός κι ο βιομηχανικός τομέας αποτελούν τους κύριους κλάδους οικονομικής δραστηριότητας, που συνεισφέρουν σημαντικά στην ηλεκτρική ζήτηση του νησιού (οι τιμές συγκεντρώνονται στον Πίνακα 1), εν αντιθέσει με τα δημόσια κτίρια, το δημοτικό φωτισμό και τα Ν.Π.Δ.Δ., των οποίων οι ενεργειακές ανάγκες περιορίζονται σε ποσοστό 6-7% περίπου της συνολικής.
• Οι ενεργειακές ανάγκες του βιομηχανικού τομέα παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς έχουν σημειώσει σημαντική αύξηση, γεγονός που μπορεί να αποδοθεί στη λειτουργία των τοπικών μονάδων αφαλάτωσης νερού (εγκατεστημένων στα προάστια της πρωτεύουσας) κι αντιστοιχούν στο 90% περίπου των ενεργειακών αναγκών όλου του βιομηχανικού τομέα. Στο πλαίσιο αυτό, αξίζει να αναφερθεί ότι χαρακτηριστικό της λειτουργίας των μονάδων αφαλάτωσης νερού με την τεχνική της αντίστροφης ώσμωσης αποτελεί η συνεχής ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος καθόλη τη διάρκεια του 24-ώρου των εργασίμων ημερών, καθώς είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τις σταθερές ανάγκες τροφοδοσίας των κατοίκων σε πόσιμο νερό. Κατ' αυτόν τον τρόπο, η λειτουργία των μονάδων αφαλάτωσης δεν επηρεάζει τη μέγιστη ζήτηση ισχύος του νησιού, η οποία εκτιμάται στα επίπεδα των 1.5 με 1.7 MW.



Σχήμα 6: Συνολική ενεργειακή κατανάλωση της Νισύρου ανά τομέα οικονομικής δραστηριότητας την περίοδο 2010-2019 (Δεδομένα από [21]).

Πίνακας 1: Ετήσιες ενεργειακές ανάγκες (τομέα οικονομικής δραστηριότητας για τ Νίσυρο.

Τομέας οικονομικής δραστηριότητας	Ετήσιες ενεργειακές ανάγκες (M
Οικιακός	1500-1600
Εμπορικός	2200
Βιομηχανικός	2000
Άλλοι τομείς (Δημόσια κτίρια, δημοτικός φωτισμός, Ν.Π.Δ.Δ.)	400-500
Σύνολο	**6200**

2.3. Υδάτινοι πόροι της Νισύρου

Η ιδιομορφία της Νισύρου έγκειται στη γεωλογική της δομή που προκαλεί επιβάρυνση των υπόγειων αλλά πολλές φορές και επιφανειακών νερών, λόγω της ύπαρξης θειούχων ηφαιστειακών πετρωμάτων και ορυκτών. Επιπρόσθετα, η χρήση πηγαδιών στο σύνολο της έκτασης του νησιού έχει εγκαταλειφθεί από τους κατοίκους λόγω της αμφιβόλου ποιότητας υδάτων. Από την άλλη πλευρά, τα περισσότερα νοικοκυριά διαθέτουν δεξαμενές συλλογής βρόχινου νερού (χωρητικότητας ίσης με 5-15 m^3) για να ικανοποιήσουν αρδευτικές ανάγκες [4], οι οποίες τροφοδοτούνται επίσης σε εβδομαδιαία προγραμματισμένη βάση κι από τις μονάδες αφαλάτωσης νερού του νησιού.

Μία δημοτική δεξαμενή χωρητικότητας ίσης με 1000 m^3 καλύπτει τις ανάγκες σε νερό των κατοίκων της πρωτεύουσας του νησιού (Μανδράκι). Αντίστοιχη δεξαμενή χωρητικότητας περίπου ίσης με 500 m^3 υπάρχει και στους Πάλους για την τροφοδοσία του εν λόγω οικισμού. Για τις περιπτώσεις της Νικιάς και του Εμπορειού, κάθε οικισμός διαθέτει δεξαμενές νερού (χωρητικότητας ίσης με 500 m^3 και 300 m^3 αντίστοιχα) που τροφοδοτούνται προς το παρόν από υδροφόρες του Δήμου με αφαλατωμένο νερό.

Γίνεται επομένως κατανοητό από την προηγούμενη ανάλυση ότι η Νίσυρος έχει σοβαρά προβλήματα επάρκειας υδάτινων πόρων, ενώ αξίζει να αναφερθεί ότι η οικονομική δραστηριότητα των κατοίκων στηρίζεται σχεδόν αποκλειστικά στη διαθεσιμότητά τους. Το γεγονός αυτό οδήγησε τις δημοτικές αρχές να προχωρήσουν σταδιακά στην εγκατάσταση τριών μονάδων αφαλάτωσης. Οι δύο πρώτες μονάδες με δυναμικότητα ίση με 350 m^3/day εγκαταστάθηκαν το 2013 και το 2016 αντιστοίχως, οδηγώντας σε σχετική αύξηση της ετήσιας ενεργειακής κατανάλωσης μετά την έναρξη λειτουργίας των. Τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν κατά τη λειτουργία των εν λόγω μονάδων τα επόμενα δύο έτη έθεσαν σε κίνδυνο την επάρκεια των υδάτινων πόρων του νησιού. Ως εκ τούτου, το 2019 λήφθηκε η απόφαση για την εγκατάσταση μία τρίτης μονάδας αφαλάτωσης νερού με δυναμικότητα ίση με 300 m^3/day.

Η πλήρης λειτουργία των εν λόγω μονάδων δύναται να παραγάγει συνολικά 1000 m^3 πόσιμου νερού ημερησίως [22]. Πιο συγκεκριμένα, για τις ανάγκες των κατοίκων απαιτούνται περίπου 500-600 m^3/day, οι οποίες ικανοποιούνται από την 24-ωρη λειτουργία των μονάδων κατά τη διάρκεια των εργασίμων ημερών (Δευτέρα-Παρασκευή) της καλοκαιρινής περιόδου, ενώ παράλληλα ένα ποσό της τάξης των 1000 m^3 μπορεί να αποθηκευτεί για να αξιοποιηθεί τα Σαββατοκύριακα. Η μειωμένη ζήτηση νερού κατά τη διάρκεια του χειμώνα (περίπου 350 m^3/day) οφείλεται στην έλλειψη της τουριστικής κίνησης. Συνεπώς, κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου η λειτουργία μόνο μίας εκ των τριών μονάδων θεωρείται επαρκής για την κάλυψη των αναγκών των μονίμων κατοίκων.

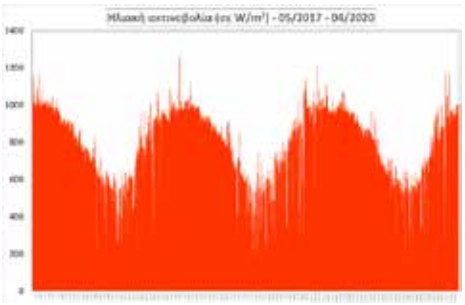
Ως απόρροια της προαναφερθείσας ανάλυσης, η μέση ημερήσια παραγωγή πόσιμου νερού από τις μονάδες αφαλάτωσης εκτιμάται σε 300-400 m^3 σε ετήσια βάση, ή ισοδύναμα, η συνολική ετήσια παραγωγή υπολογίζεται στο εύρος 100,000-150,000 m^3. Βάσει των ανωτέρω, λαμβάνοντας υπόψη και τις ενεργειακές ανάγκες των βοηθητικών συστημάτων των μονάδων αφαλάτωσης νερού, η ανά m^3 πόσιμου νερού ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας εκτιμάται στο εύρος 10-12 kWh_e.

3. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΑΠΕ ΤΗΣ ΝΙΣΥΡΟΥ

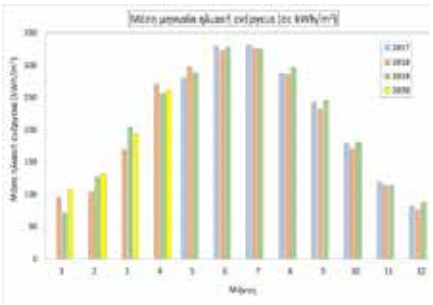
Για την αξιόπιστη καταγραφή κι αποτύπωση του ηλιακού και αιολικού δυναμικού που χαρακτηρίζει τη Νίσυρο αξιοποιείται ο μετεωρολογικός σταθμός του νησιού. Ο συγκεκριμένος μετεωρολογικός σταθμός είναι εγκατεστημένος σε οροφή δημοτικού κτιρίου στο Μανδράκι σε ύψος 5 m και λειτουργεί σε συνεργασία με το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών (Ε.Α.Α.) από τον Μάϊο του 2017 [23] με τις σχετικές μετρήσεις που καταγράφονται να μεταφέρονται στη βάση δεδομένων του Ε.Α.Α. ανά δέκα λεπτά. Μετά από στατιστική επεξεργασία των εν λόγω μετρήσεων, το ηλιακό δυναμικό του νησιού μπορεί να αναλυθεί, ενώ χρήσιμες ενδείξεις μπορούν να εξαχθούν για το διαθέσιμο αιολικό δυναμικό. Επιπλέον, ένας αξιόπιστος προσδιορισμός του γεωθερμικού δυναμικού του νησιού μπορεί πραγματοποιηθεί βάσει διαθέσιμων επιστημονικών μελετών.

3.1. Ηλιακό Δυναμικό της Νισύρου

Ο περιοδικός χαρακτήρας του ηλιακού δυναμικού της Νισύρου απεικονίζεται στο Σχήμα 7, το οποίο αποτυπώνει τη διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας του νησιού την περίοδο Μάϊος 2017 – Απρίλιος 2020. Επίσης, το Σχήμα 8 παραθέτει τη διακύμανση της μέσης μηνιαίας ηλιακής ενέργειας για την προαναφερθείσα τριετή περίοδο, η οποία παρουσιάζει μια πλήρως ομοιόμορφη διαχρονική κατανομή.



Σχήμα 7: Διακύμανση ηλιακής ακτινοβολίας (σε W/m²) σε οριζόντιο επίπεδο την περίοδο Μάϊος 2017 – Απρίλιος 2020 (Δεδομένα από [23]).

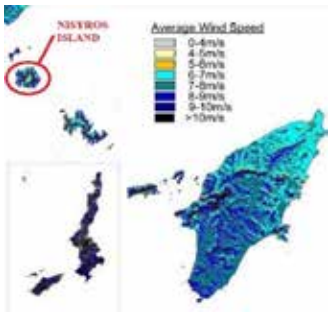


Σχήμα 8: Μέση μηνιαία ηλιακή ενέργεια (σε kWh/ σε οριζόντιο επίπεδο την περίοδο Μάϊος 2017 - Απρίλιος 2020 (Δεδομένα από [23]).

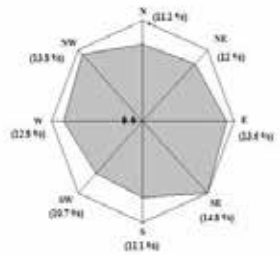
Οι συνολικές ετήσιες τιμές ηλιακής ενέργειας στη Νίσυρο σε οριζόντιο επίπεδο για το 2018 και 2019, σύμφωνα με τα διαθέσιμα στοιχεία, ήταν ίσες με 2460 kWh/m² και 2520 kWh/m² αντίστοιχα. Η μικρή διαφορά μεταξύ των δύο τιμών υποδηλώνει το εξαιρετικό Ηλιακό Δυναμικό του νησιού. Συνεπώς, η συγκεκριμένη ομοιομορφία των δεδομένων ηλιακής ακτινοβολίας δικαιολογεί τεκμηριωμένα την αξιοποίηση της με σκοπό τη διαστασιολόγηση εγκατάστασης Φ/Β συστημάτων για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών των μονάδων αφαλάτωσης του νησιού.

3.2. Αιολικό Δυναμικό της Νισύρου

Στο Σχήμα 9 παρουσιάζεται το αιολικό δυναμικό της Νισύρου. Επιπλέον, οι κατευθύνσεις ανέμων οι οποίες παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες πιθανότητες είναι η νοτιοδυτική (ΝΔ) και η βορειοανατολική (ΒΑ), όπως παρουσιάζονται στο σχετικό ροδόγραμμα ανέμου στο Σχήμα 10 [24]. Σε γενικές γραμμές, σχεδόν όλες οι κατευθύνσεις ανέμων παρουσιάζουν αξιοσημείωτες συχνότητες εμφάνισης και μια σχετικά ομοιόμορφη κατανομή. Το Σχήμα 11 παρουσιάζει τη διακύμανση ταχύτητας ανέμου (εκφρασμένη σε m/s) κατά την περίοδο Μάϊος 2017 – Απρίλιος 2020.



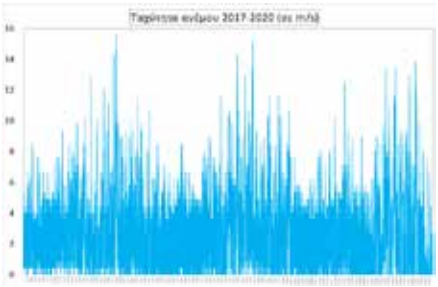
Σχήμα 9: Αιολικό Δυναμικό της Νισύρου (προσαρμοσμένο από [25]).



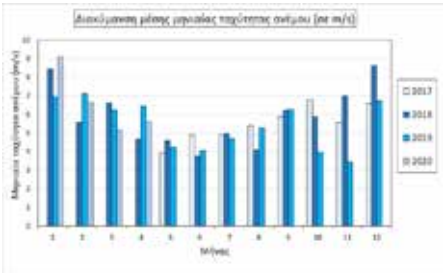
Σχήμα 10: Ροδόγραμμα ανέμου της Νισύρου (προσαρμοσμένο από [24]).

Το ύψος των πύργων των σύγχρονων ανεμογεννητριών (Α/Γ), οι οποίες συναντώνται σε απομακρυσμένες νησιωτικές περιοχές κυμαίνεται μεταξύ 35-70 m πάνω από το έδαφος, σε αντίθεση με το ανεμόμετρο του τοπικού μετεωρολογικού σταθμού, το οποίο είναι εγκατεστημένο σε υψόμετρο 5 m και στα όρια της αστικής περιοχής. Από την πλευρά του, ο μελετητής κάθε έργου καθορίζει το ακριβές ύψος του πύργου των Α/Γ μετά από ανάλυση της τοπικής τοπογραφίας, του διαθέσιμου αιολικού δυναμικού και των υφιστάμενων υποδομών του ηλεκτρικού και οδικού δικτύου. Επιπροσθέτως, υφίσταται μία εκθετική σχέση μεταξύ της ταχύτητας του ανέμου που συναντάται στο ύψος πλήμνης των Α/Γ και της τραχύτητας της επιφάνειας του εδάφους λόγω του φαινομένου κάθετης διάτμησης του ανέμου. Με αυτόν τον τρόπο, προσομοιώνοντας μετρήσεις ενός ανεμομέτρου εγκατεστημένου σε υψόμετρο 70 m πάνω από το έδαφος, μπορούν να προσδιοριστούν αντίστοιχες ενδεικτικές τιμές ταχύτητας του ανέμου. Στο πλαίσιο αυτό, το Σχήμα 12 παρουσιάζει την αντίστοιχη διακύμανση μέσης

μηνιαίας ταχύτητας του ανέμου (σε m/s) σε υψόμετρο 70 m πάνω από το έδαφος κατά την περίοδο Μάϊος 2017 – Απρίλιος 2020, μετά από στατιστική επεξεργασία των διαθέσιμων μετρήσεων από τον τοπικό μετεωρολογικό σταθμό.



Σχήμα 11: Διακύμανση της ταχύτητας του ανέμου (σε m/s) την περίοδο Μάϊος 2017 – Απρίλιος 2020 (Δεδομένα από [23]).



Σχήμα 12: Διακύμανση της μέσης μηνιαίας ταχύτητας του ανέμου (σε m/s) την περίοδο Μάϊος 2017 – Απρίλιος 2020 (Δεδομένα από [23]).

Όπως έχει προαναφερθεί, η τιμή της ταχύτητας του ανέμου επηρεάζει ουσιωδώς την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μιας Α/Γ. Από το Σχήμα 12 μπορεί να συναχθεί ότι η μέση ετήσια τιμή της ταχύτητας του ανέμου στο νησί της Νισύρου υπερβαίνει τα 6.5 m/s. Επομένως, το συγκεκριμένο συμπέρασμα αναμένεται να διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο στη διαστασιολόγηση που λαμβάνει χώρα κατά το σχεδιασμό του πιθανού έργου, όπως επίσης και στην οικονομική του αξιολόγηση.

3.3. Γεωθερμικό Πεδίο της Νισύρου

Η Νίσυρος βρίσκεται στο νότιο άκρο του ηφαιστειακού τόξου του Αιγαίου πελάγους, διαθέτοντας το δεύτερο μεγαλύτερο επιβεβαιωμένο γεωθερμικό πεδίο στην Ελλάδα δυναμικότητας ίσης με 50 MW_e [26], ενώ παράλληλα υπάρχουν στην εδαφική της επικράτεια πολυάριθμες θερμοκρασιακές διαβαθμίσεις. Το συγκεκριμένο γεωθερμικό πεδίο διαθέτει αναμενόμενη πίεση στην κορυφή της γεώτρησης άνω των 40 bar, ενώ η θερμοκρασία του υπερβαίνει τους 350 °C [27].

Το Σχήμα 13 απεικονίζει τις εστίες (πηγές) γεωθερμικών πεδίων χαμηλής ενθαλπίας, οι οποίες είναι διασκορπισμένες σε όλη την έκταση του νησιού, παρουσιάζουν δε ένα θερμοκρασιακό εύρος 25-95 ^oC και αναδύονται από υδροθερμικά αποθέματα βάθους 30-120 m. Ως εκ τούτου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως θερμές πηγές, καθώς μπορούν να αξιοποιηθούν σε εφαρμογές όπως θέρμανση κτηρίων (μέσω τηλεθέρμανσης), θερμοκηπίων, ιχθυοκαλλιεργειών και ξήρανσης φρούτων [28].

Κατά την περίοδο 1982-1983 η Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (Δ.Ε.Η.) της Ελλάδας πραγματοποίησε δύο γεωτρήσεις στην περιοχή του Ράμμου (Σχήμα 14). Οι συγκεκριμένες γεωτρήσεις καθώς και ακουστο-μαγνητοτελλουρικές (ΑΜΤ) μετρήσεις, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν στην επιφάνεια της καλδέρας του ηφαιστείου του νησιού, ταυτοποίησαν το γεωθερμικό του πεδίο, το υπέδαφός του καθώς και το είδος των πετρωμάτων που βρίσκονται διάσπαρτα στην επιφάνειά του. Η πρώτη γεώτρηση (με την ένδειξη Ν1 στο Σχήμα 14), πραγματοποιήθηκε σε βάθος 1816 m κι αποκάλυψε θερμοκρασίες στο εύρος 350-400 ^oC, ενώ η δεύτερη γεώτρηση (με την ένδειξη Ν2 στο Σχήμα 14) αποκάλυψε θερμοκρασίες στο εύρος 300 ^oC έως 350 ^oC σε βάθος 1547 m. Αξίζει να αναφερθεί ότι η δεύτερη γεώτρηση (Ν2) πραγματοποιήθηκε σε απόσταση 700 m βορειοδυτικά (ΒΔ) της πρώτης (Ν1) και σε ύψος 170 m από την επιφάνεια της θάλασσας.

Συνοψίζοντας, η Νίσυρος διαθέτει πλούσιο ηλιακό δυναμικό, ενώ αντίστοιχα το αιολικό της δυναμικό μπορεί να χαρακτηριστεί ως μεσαίας ποιότητας. Επιπρόσθετα, στο νησί υπάρχει γεωθερμικό πεδίο υψηλής ενθαλπίας. Εντούτοις, η αξιοποίησή του συναντά σημαντικές αντιδράσεις από την τοπική κοινωνία εξαιτίας του πιθανού περιβαλλοντικού της αποτυπώματος και της αναφερόμενης διαταραχής της φυσικής ισορροπίας [29]. Κατ' επέκταση, μόνο προτάσεις εκμετάλλευσης της γεωθερμίας μέσης και χαμηλής ενθαλπίας μπορούν να θεωρηθούν αποδεκτές από την τοπική κοινωνία. Τέλος, το τοπικό δυναμικό βιομάζας δεν θεωρείται επαρκές για εκμετάλλευση με σκοπό την ηλεκτροπαραγωγή [30].

Σχήμα 13: Χάρτης απεικόνισης της κατανομής των θέσεων των θερμών πηγών και ατμών στη Νίσυρο. Με κόκκινο χρώμα αποτυπώνονται οι θερμές πηγές, ενώ με μπλε οι θερμοί ατμοί [31].

Σχήμα 14: Χάρτης οριοθέτησης βεβαιωμένου γεωθερμικού πεδίου υψηλής ενθαλπίας και ερευνητικών γεωτρήσεων (N1, N2) στο νησί της Νισύρου [32].

4. ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΛΥΣΗ ΠΡΟΣ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ

4.1. Υπολογισμός του Συντελεστή Αξιοποίησης (Capacity Factor - CF)

Βασιζόμενοι στην ανάλυση των προηγούμενων Ενοτήτων, η αξιοποίηση του ηλιακού δυναμικού της Νισύρου αποτελεί μία βιώσιμη λύση για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών των μονάδων αφαλάτωσης του νησιού. Στο πλαίσιο αυτό, θα πρέπει να εφαρμοστεί μία επιμελώς σχεδιασμένη μεθοδολογία για την εγκατάσταση Φ/Β σταθμών ηλεκτροπαραγωγής, κατά τη διάρκεια της οποίας πρωτογενή δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας θα εισαχθούν σε κατάλληλα εργαλεία προσομοίωσης για την εκτίμηση του τελικώς αξιοποιήσιμου ηλιακού δυναμικού. Για τη συλλογή πρωτογενών δεδομένων έχει αξιοποιηθεί ο τοπικός μετεωρολογικός σταθμός [23]. Κατ' αυτόν τον τρόπο, εφαρμόζοντας τεχνικές στατιστικής επεξεργασίας και χρησιμοποιώντας τυπικές χαρακτηριστικές καμπύλες I-U καθώς και τα αντίστοιχα τεχνικά χαρακτηριστικά εμπορικά διαθέσιμων Φ/Β πλαισίων, καθίσταται δυνατή η εκτίμηση (προκαταρκτική, αλλά με ικανοποιητική ακρίβεια) της αναμενόμενης ενεργειακής παραγωγής καθώς και της μηνιαίας-ετήσιας τιμής του συντελεστή αξιοποίησης της εγκατάστασης (Capacity Factor-CF).

Ο Πίνακας 2 παρουσιάζει συνοπτικά τα αποτελέσματα σχετικής προσομοίωσης που πραγματοποιήθηκε εισάγοντας τα δεδομένα σε αλγόριθμο που αναπτύχθηκε από το Εργαστήριο Η.Μ.Ε. και ΠΡΟ.ΠΕ. του Πα.Δ.Α. [11]. Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων προσομοίωσης μπορεί να ελεγχθεί κατόπιν σύγκρισης με τα αποτελέσματα αντίστοιχης προσομοίωσης με το "online" υπολογιστικό εμπορικό εργαλείο "PVGIS".

Πίνακας 2: Αποτελέσματα προσομοίωσης για προτεινόμενη εγκατάσταση Φ/Β συστήματος ονομαστικής ισχύος 1MW$_p$ για τη Νίσυρο.

Μήνες	Μέση προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε Φ/Β σύστημα υπό γωνία κλίσης 30° (σε kWh/m²)	Μέση παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το Φ/Β σύστημα (MWh$_e$)	CF
Ιανουάριος	89.9	74.8	11.6 %
Φεβρουάριος	107	89.2	15.3 %
Μάρτιος	166.7	137.4	21.3 %
Απρίλιος	195.3	157.4	25.2 %
Μάϊος	215.4	169.1	26.2 %
Ιούνιος	224.4	173.2	27.7 %
Ιούλιος	238.3	183.1	28.4 %
Αύγουστος	235.6	180.1	27.9 %
Σεπτέμβριος	206.1	160.1	25.6 %
Οκτώβριος	161.3	129.1	19.9 %
Νοέμβριος	114.9	93.3	14.9 %
Δεκέμβριος	87.2	72.1	11.1 %
Μέσες ετήσιες τιμές	**2042.1**	**1618.9**	**21.3 %**

Αξίζει να αναφερθεί ότι, με βάση το εξαιρετικό ηλιακό δυναμικό όλου του νησιού, οι υπό εξέταση ενεργειακές ανάγκες μπορούν να ικανοποιηθούν με την εγκατάσταση Φ/Β συστημάτων εγκατεστημένων διάσπαρτα σε όλη την επικράτεια του νησιού (διανεμημένη παραγωγή) κι όχι μόνο από ένα Φ/Β σύστημα

αποτελούμενο από Φ/Β πλαίσια συγκεντρωμένα σε συγκεκριμένη τοποθεσία. Ως εκ τούτου, ο Πίνακας 2 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της ανά MW_p προσομοίωσης ενός Φ/Β συστήματος. Τα αποτελέσματα που παράχθηκαν για τις τιμές του CF είναι αντιπροσωπευτικά μιας αξιόλογης Φ/Β εγκατάστασης της οποίας οι αντίστοιχες τιμές κυμαίνονται στο εύρος 10-25% [33]. Πιο συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών, υπολογίστηκαν τιμές του CF στο εύρος 22-25%, ενώ αντίστοιχα κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών, οι τιμές του CF υπολογίστηκαν στο εύρος 10-15%.

4.2. Διαστασιολόγηση της προτεινόμενης λύσης

Σύμφωνα με την ανάλυση της Ενότητας 2, οι ετήσιες ενεργειακές ανάγκες του βιομηχανικού τομέα της Νισύρου προσεγγίζουν τις 2000 MWh_e, εκ των οποίων το 90% (ήτοι περίπου 1800 MWh_e) αντιστοιχούν στη λειτουργία των μονάδων αφαλάτωσης νερού.

Η ενεργειακή παραγωγή ενός Φ/Β σταθμού $\boldsymbol{E_{PV}}$ μπορεί να υπολογιστεί με βάση την εξίσωση (1):

$$\boldsymbol{E_{PV} = CF * P_{PV} * \Delta t} \quad \textbf{(1)}$$

όπου $\boldsymbol{P_{PV}}$ είναι η ονομαστική ισχύς του Φ/Β σταθμού και $\boldsymbol{\Delta t}$ είναι η εξεταζόμενη χρονική περίοδος.

Λαμβάνοντας υπόψη τυπικές τιμές για τους συντελεστές που χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια (Πίνακας 3), η απαιτούμενη ονομαστική AC ισχύς του Φ/Β σταθμού θα είναι ίση με:

$$\boldsymbol{P_{PV,AC} = 970\ kW} \quad \textbf{(2)}$$

ενώ θεωρώντας «Αναλογία Απόδοσης» ίση με PR=0.85, η αντίστοιχη DC ισχύς υπολογίζεται ίση με:

$$\boldsymbol{P_{PV,DC} = \frac{P_{PV,AC}}{PR} = 1140\ kW_p} \quad \textbf{(3)}$$

Συμπερασματικά, απαιτείται η εγκατάσταση ενός Φ/Β συστήματος με ονομαστική ισχύ ίση με 1140 kW_p για την επίτευξη της «πράσινης» ηλεκτροδότησης των μονάδων αφαλάτωσης νερού της Νισύρου.

Πίνακας 3: Τυπικές τιμές για τις παραμέτρους που λήφθηκαν υπόψη κατά τον υπολογισμό της ονομαστικής ισχύος του Φ/Β συστήματος [34], [35].

Παράμετρος	Τυπική τιμή
PV modules nominal efficiency	16%
PV inverter energy losses derate factor η_{PV_inv}	96.5%
DC and AC wiring losses derate factor η_{wiring}	98%
Heterogeneity losses derate factor $\eta_{heterogeneity}$	99%
Diodes energy losses derate factor η_{diodes}	99%
Shading energy losses derate factor $\eta_{shading}$	95%
Temperature losses derate factor $\eta_{temperature}$	96%

4.3. Απαιτήσεις σε έκταση γης

Για την υλοποίηση της εγκατάστασης θεωρείται εξαιρετικά σημαντικός ο προσδιορισμός των κατάλληλων εκτάσεων γης κι ο έλεγχος των τίτλων ιδιοκτησίας καθώς και η διαθεσιμότητά τους. Στο πλαίσιο αυτό θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν οι διαθέσιμες βάσεις δεδομένων για τις χρήσεις γης, όπως π.χ. η αντίστοιχη που βασίζεται στα αποτελέσματα του Ευρωπαϊκού προγράμματος “CORINE” [36].

Η ανά kW_p απαιτούμενη έκταση γης σχετίζεται έντονα με την τεχνολογία που θα επιλεγεί για την κατασκευή των Φ/Β πλαισίων (μονοκρυσταλλικό, πολυκρυσταλλικό πυρίτιο, λεπτού υμένα, κ.ά.) καθώς και τη γωνία κλίσης των πλαισίων [37]. Τυπικές τιμές που μπορούν να αναζητηθούν στη βιβλιογραφία κυμαίνονται στο εύρος 10–14 m^2/kW_p. Επομένως, λαμβάνοντας υπόψη το κατώτερο προαναφερθέν όριο, οι απαιτήσεις σε έκταση γης $\boldsymbol{S_{PV}}$ για την εγκατάσταση ενός Φ/Β συστήματος ικανού να καλύψει την «πράσινη» ηλεκτροδότηση των μονάδων αφαλάτωσης νερού της Νισύρου θα είναι ίσες με:

$$\boldsymbol{S_{PV} = 10\frac{m^2}{kW_p} * 1140\ kW_p = 11400\ m^2 = 11.4\ στρέμματα} \quad \textbf{(4)}$$

Μία εκ των πιθανών θέσεων εγκατάστασης μπορεί να θεωρηθεί και η περιοχή εγκατάστασης των μονάδων αφαλάτωσης (Σχήμα 15), ώστε να περιορίζονται και οι απώλειες μεταφοράς ενέργειας.

Σχήμα 15: Πανοραμική άποψη των μονάδων αφαλάτωσης νερού της Νισύρου. Η περιεγραμμένη με κόκκινο χρώμα περιοχή προσδιορίζει τη θέση των μονάδων αφαλάτωσης νερού, ενώ η περιεγραμμένη με πράσινο χρώμα περιοχή παρουσιάζει μία ενδεικτική θέση για την εγκατάσταση του Φ/Β σταθμού.

4.4. Εκτίμηση κόστους εγκατάστασης

Ο Πίνακας 4 παρουσιάζει τις ανά kW_p DC εγκατεστημένης ισχύος οικονομικές παραμέτρους που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για έναν προκαταρκτικό υπολογισμό κόστους της προτεινόμενης λύσης ηλεκτροδότησης των μονάδων αφαλάτωσης νερού της Νισύρου [11], [38]. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι συγκεκριμένες τιμές αποτελούν εκτιμήσεις, καθώς ο τελικός τους υπολογισμός επηρεάζεται από πληθώρα άλλων παραμέτρων. Κατ' επέκταση για τη συγκεκριμένη οικονομική ανάλυση μπορούν να θεωρηθούν ως τελικά κόστη εγκατάστασης ("turnkey" τιμές).

Πίνακας 4: Οικονομικές παράμετροι για την τεχνο-οικονομική προσομοίωση του Φ/Β συστήματος.

Οικονομική παράμετρος	Κόστος (€/kW_p)
Ανηγμένη τιμή προμήθειας Φ/Β πλαισίων	550-700
Ανηγμένη τιμή προμήθειας Ηλεκτρονικών Ισχύος*	250-300
Ανηγμένη τιμή κατασκευής έργων υποδομής	400-600

** Οι απώλειες AC και DC καλωδίωσης όπως επίσης και το κόστος οποιουδήποτε επιπρόσθετου ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού λήφθηκαν υπόψη στον υπολογισμό αυτής της παραμέτρου.*

Αθροίζοντας τις προαναφερθείσες συνιστώσες των οικονομικών παραμέτρων, το συνολικό τελικό κόστος εγκατάστασης υπολογίζεται ότι προσεγγίζει τα 1200-1600 €/kW_p. Με δεδομένο ότι η DC εγκατεστημένη ισχύς του Φ/Β σταθμού υπολογίστηκε ίση με 1140 kW_p, η εκτίμηση για το κόστος εγκατάστασης ανέρχεται στα 1.4 έως 1.8 Μ€ περίπου. Το προαναφερθέν κόστος δε θεωρείται απαγορευτικό, εφόσον μπορεί εύκολα να γίνει η αντιπαραβολή του με τα κεφάλαια που δαπανώνται από τις δημοτικές αρχές για την ηλεκτροδότηση των μονάδων αφαλάτωσης νερού (περίπου 150-200 χιλιάδες ευρώ ετησίως). Αυτός είναι κι ο πρωταρχικός λόγος που έχει ωθήσει τις δημοτικές αρχές σε κινήσεις εφαρμογής της συγκεκριμένης ερευνητικής προσπάθειας τόσο μέσω της αξιοποίησης ιδίων κεφαλαίων όσο και μέσω της υποβολής προτάσεων σε διάφορα Εθνικά και Ευρωπαϊκά προγράμματα χρηματοδότησης, που στοχεύουν στην πράσινη ανάπτυξη των Ευρωπαϊκών νησιών. Αξίζει να σημειωθεί ότι, κατόπιν προκαταρκτικών υπολογισμών, ο μελλοντικός επενδυτής μπορεί να εξασφαλίσει περίοδο απόσβεσης μικρότερη των εφτά έως εννέα ετών [38]. Στην περίπτωση δε εξωτερικής χρηματοδότησης η οικονομική ωφέλεια για την τοπική κοινωνία είναι προφανής.

Τέλος, για την πληρότητα της παρούσας ανάλυσης, θα πρέπει να εξεταστεί το σχετικό περιβαλλοντικό όφελος που προκύπτει από τη λειτουργία του εν λόγω Φ/Β συστήματος. Λαμβάνοντας υπόψη ότι εκλύονται περίπου 700-800 kg ισοδυνάμου διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) ανά MWh_e που προέρχεται από πετρελαϊκούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής [39], το σχετικό ετήσιο ποσό εκλυόμενης ποσότητας ισοδυνάμου CO_2 που μπορεί να αποφευχθεί ανέρχεται σε 1250-1450 τόνους.

Από αντίστοιχη μελέτη για την αναλυτική διερεύνηση των τεχνικά αποδεκτών λύσεων, το αναμενόμενο μέσο οριακό κόστος ηλεκτροπαραγωγής για την προτεινόμενη Φ/Β εγκατάσταση έχει υπολογιστεί ότι μεταβάλλεται ανάμεσα στα 40 €/MWh_e και 45 €/MWh_e, το οποίο εάν συγκριθεί με το κόστος προμήθειας ηλεκτρικής ενέργειας από το ηλεκτρικό δίκτυο του ΔΕΔΔΗΕ (περίπου 80 €/MWh_e έως 100 €/MWh_e) παρουσιάζει ένα ιδιαίτερα σημαντικό περιθώριο κέρδους για το μελλοντικό επενδυτή [40].

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα πλαίσια της παρούσας ερευνητικής - επιστημονικής ανάλυσης υλοποιήθηκε συστηματική καταγραφή και διερεύνηση των ενεργειακών καταναλώσεων της Νισύρου για ένα ευρύ χρονικό διάστημα για το οποίο συλλέχθηκαν μακροχρόνια δεδομένα. Παράλληλα, οριοθετήθηκαν και καταγράφηκαν οι ενεργειακές ανάγκες των μονάδων αφαλάτωσης που έχουν εγκατασταθεί στη Νίσυρο για την αντιμετώπιση των προβλημάτων λειψυδρίας που επιβαρύνουν τους κατοίκους του νησιού.

Ακολούθησε διεξοδική ανάλυση του πλούσιου δυναμικού του νησιού σε Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας προκειμένου να αιτιολογηθεί ο βιώσιμος χαρακτήρας της προτεινόμενης λύσης. Προς την κατεύθυνση αυτή συνετέλεσε και η αναλυτική παρουσίαση του ηλιακού και αιολικού δυναμικού της Νισύρου αξιοποιώντας διαθέσιμες μετρήσεις της προηγούμενης τριετίας από τον τοπικό μετεωρολογικό σταθμό, όπως επίσης και η ανάλυση του πλούσιου γεωθερμικού πεδίου μέσω της παράθεσης καταξιωμένων διεθνώς επιστημονικών μελετών. Επιπρόσθετα, πραγματοποιήθηκε μια πρώτη προσέγγιση της προτεινόμενης τεχνικής λύσης, οριοθετώντας παράλληλα τις απαιτούμενες εκτάσεις γης όπως επίσης και το αρχικό επενδυτικό κόστος για την υλοποίηση της εγκατάστασης.

Το προτεινόμενο σύστημα καθαρής ηλεκτροπαραγωγής είναι αρθρωτό (modular) και μπορεί να εγκατασταθεί σταδιακά, μειώνοντας βέβαια στην περίπτωση αυτή τις τυχόν ωφέλειες από οικονομίες κλίμακας που θα μπορούσαν να εφαρμοστούν. Επίσης, θα πρέπει να τονιστεί ότι η προτεινόμενη λύση δεν είναι η μοναδική επιλογή. Για την ακρίβεια, προκρίθηκε λόγω των σχετικών περιβαλλοντικών ωφελειών και των ελαχίστων επιπτώσεων καθώς και της ευρύτερης αποδοχής από την τοπική κοινωνία αναφορικά με την εν λόγω καθαρή μορφή ενέργειας (ελαχίστου αποτυπώματος άνθρακα). Φυσικά, κατόπιν διαβούλευσης μεταξύ όλων των εμπλεκόμενων φορέων, έτσι ώστε να διασφαλιστεί η έγκαιρη πληροφόρηση και η συναίνεση της τοπικής κοινωνίας, θα μπορούσαν να εξεταστούν κι άλλες συμπληρωματικές λύσεις, όπως για παράδειγμα η δημιουργία υβριδικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής. Παράλληλα, η ενσωμάτωση ηλεκτρονικών ισχύος, τεχνολογιών αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας και τεχνικών διαχείρισης της ηλεκτρικής ζήτησης (Demand Side Management) θα μπορούσε να αποτελέσει μία επιπρόσθετη αναβάθμιση, ενισχύοντας περαιτέρω την ενεργειακή ανεξαρτησία του νησιού από παράγωγα του πετρελαίου, το οποίο και αποτελεί τον επόμενο στόχο της τοπικής κοινωνίας. Προϋπόθεση για την υλοποίηση των ανωτέρω αποτελεί μία ολοκληρωμένη τεχνο-οικονομική ανάλυση έτσι ώστε να διερευνηθούν όλες οι επιμέρους συνιστώσες του προβλήματος.

Συνοψίζοντας, η παρούσα ερευνητική προσπάθεια παρουσίασε τους άξονες στους οποίους πρέπει να κινηθεί ο ενεργειακός σχεδιασμός έτσι ώστε να καταστεί δυνατή η «πράσινη» ηλεκτροδότηση των μονάδων αφαλάτωσης της Νισύρου. Ο βιώσιμος χαρακτήρας της προτεινόμενης λύσης, η οποία χαίρει της έμπρακτης υποστήριξης της τοπικής κοινωνίας και των δημοτικών αρχών, αποδεικνύει και την εφαρμοσιμότητα/επαναληψιμότητα που μπορεί να επιτευχθεί (με κατάλληλες προσαρμογές) και σε πολλά άλλα -αντιστοίχων χαρακτηριστικών- νησιά, όχι μόνο του Νοτίου Αιγαίου αλλά γενικότερα της ευρύτερης περιοχής της Μεσογείου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Hellenic Statistic Authority, 2018, “Greece in numbers”. Available from: https://www.statistics.gr (Accessed at 16th September 2020).

[2] Pnevmatikos, J.D. and Katsoulis, B.D., 2006, “The changing rainfall regime in Greece and its impact on climatological means”, Meteorological Applications, Vol. 13(4), pp. 331 – 345.

[3] Kaldellis, J.K., Gkikaki, A., Kaldelli, E. and Kapsali, M., 2012, “Investigating the energy autonomy of very small non-interconnected islands. A case study: Agathonisi, Greece”, Energy for Sustainable Development, Vol. 16, pp. 476-485.

[4] Bertsiou, M., Feloni, E., Karpouzos, D. and Baltas, E., 2018, “Water management and electricity output of a Hybrid Renewable Energy System (HRES) in Fournoi island in Aegean Sea”, Renewable Energy, Vol. 118, pp. 790-798.

[5] Kaldellis, J.K., Kavadias, K.A. and Kondili, E., 2004, “Renewable energy desalination plants for the Greek islands-technical and economic considerations”, Desalination, Vol. 170, pp. 187-203.

[6] Daskalaki, P. and Voudouris, K., 2008, “Groundwater quality of porous aquifers in Greece: a synoptic review”, Environmental Geology, Vol. 54, pp. 505-513.

[7] Karvounis, P., 2017, “A Review of Desalination Potential in Greek Islands Using Renewable Energy Sources, a Life Cycle Assessment of Different Units”, European Journal of Sustainable Development, Vol. 6(2), pp. 19-32.
[8] Distefano, T. and Kelly, S., 2017, “Are we in deep water? Water scarcity and its limits to economic growth”, Ecological Economics, Vol. 142, pp. 130-147.
[9] Kondili, E., Kaldellis, J.K. and Paidousi, M., 2013, ”A multicriteria analysis for the optimal desalination-RES system. Special focus: the small Greek islands”, Journal of Desalination and Water Treatment, Vol. 51(4-6), pp. 1205-1218.
[10] Bognar, K., Blechinger, P. and Behrendt, F., 2012, “Seawater desalination in micro grids: An integrated planning approach”, Energy, Sustainability and Society, Vol. 2(14), pp. 1-12.
[11] Kaldellis, J.K., 2004, “Optimum techno-economic energy-autonomous photovoltaic solution for remote consumers throughout Greece”, Journal of Energy Conversion and Management, Vol. 45(17), pp. 2745-2760.
[12] Mentis, D., Karalis, G., Zervos, A., Howells, M., Taliotis, C., Bazilian, M., Rogner, H., 2016, “Desalination using renewable energy sources on the arid islands of South Aegean Sea”, Energy, Vol. 94, pp. 262-272.
[13] Ghaffour, N., Lattemann, S., Missimer, T., Choon Ng, K., Sinha, S. and Amy, G., 2014, “Renewable energy-driven innovative energy-efficient desalination technologies”, Applied Energy, Vol. 136, pp. 1155-1165.
[14] Ioannidis, A., Chalvatzis, K.J., Li, X., Notton, G. and Stephanides, P., 2019, “The case for islands’ energy vulnerability: Electricity supply diversity in 44 global islands”, Renewable Energy, Vol. 143, pp. 440-452.
[15] Kougias, I, Szabó, S., Nikitas, A. and Theodossiou, N., 2019, “Sustainable energy modelling of non-interconnected Mediterranean islands”, Renewable Energy, Vol. 133, pp. 930-940.
[16] Koroneos, C., Dompros, A. and Roumbas, G., 2007, “Renewable energy driven desalination systems modelling”, Journal of Cleaner Production, Vol. 15(5), pp. 449-464.
[17] Municipality of Nisyros, 2020, “Yali-Strongyli_Agios Antonios-Pachia-Pergoussa and Kandeleoussa” (available in Greek), Available from: https://nisyros.gr (Accessed at 26th November 2020).
[18] Management Organizational Unit (MOU) of Development Programs, 2018, “Strategic and organizational plan for the implementation of an integrated interventions program in Nisyros (prepared in collaboration with Municipality of Nisyros)”.
[19] Hellenic Statistic Authority (HSA), 2011, “2011 Population-Housing Census”. Piraeus, Greece, Available from: https://www.statistics.gr (Accessed at 16th September 2020).
[20] Kaldellis, J.K. and Zafirakis, D., 2020, “Prospects and challenges for clean energy in European islands. The TILOS paradigm”, Renewable Energy, Vol. 145, pp. 2489-2502.
[21] Hellenic Electricity Distribution Network Operator (HEDNO), 2020, [Online], Available from: https://www.deddie.gr/ (Accessed at 10th October 2020).
[22] Municipality of Nisyros, 2019, “Press Release 20/5/2019: Installation of new desalination unit at Municipality of Nisyros” (available in Greek), Available from: https://nisyros.gr (Accessed at 21st September 2020).
[23] National Observatory of Athens, 2020, [Online], Available from: https://www.meteo.noa.gr (Accessed at 1st August 2020).
[24] University of Patras, Geology Department, 2011, “Sustainable development of Nisyros volcano and new volcanic data for the wider area with the contribution of remote sensing” (available in Greek), Dimitrios Zouzias, PhD Thesis.
[25] Zafirakis, D. and Kaldellis, J.K., 2019, “Early-operation evidence from the first-ever battery-based hybrid power station in Greece on the island of Tilos”. 4th International Hybrid Power Systems Workshop, 22-23 May 2019, Crete, Greece.
[26] Dietrich, V.J. and Lagios, E., 2017, “Nisyros volcano: The Kos - Yali - Nisyros Volcanic Field”, Springer International Publishing, New York City, United States.

[27] Koroneos, C., Polyzakis, A., Xydis, G., Stylos, N. and Nanaki, E., 2017, "Exergy analysis for a proposed binary geothermal power plant in Nisyros Island, Greece", Geothermics, Vol. 70, pp. 38–46.
[28] Andritsos, N., Dalambakis, P., Arvanitis, A., Papachristou, M. and Fytikas, M., 2015, "Geothermal developments in Greece–Country update 2010-2014", World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia, pp. 19–25.
[29] Marouli Chr. and Kaldellis J.K., 2001, "Risk in the Greek electricity production sector", 7th International Conference on Environmental Science and Technology (CEST), Vol. C, pp. 305-314, University of Aegean, Global-NEST, Syros, Greece.
[30] Christou, M., 2017, "Biomass potential in Greece and prospects". Building Green Expo 2017, Athens Metropolitan Expo, 07 April 2017, Athens, Greece.
[31] Arcgis, 2020, "Geo-cultural environment of Nisyros volcano". [Online], Available from: https://www.arcgis.com (Accessed at 18th July 2020).
[32] Kanellopoulos, C. and Xirokostas, N., 2016, "Mudpots at Stefanos hydrothermal crater of Nisyros volcano: An insight at the hydrothermal process of an active volcano". Bulletin of the Geological Society of Greece, 50(4), pp. 1838-1848.
[33] U.S. Energy Information Administration (EIA), 2011, "Electric Power Annual 2009", Available from: https://www.nrc.gov (Accessed at 21st August 2020).
[34] International Finance Corporation, 2015. "Utility-Scale Solar Photovoltaic Power Plants: A Project developer's guide", Available from: https://www.ifc.org (Accessed at 21st August 2020).
[35] Kaldellis, J.K., Kapsali, M. and Kavadias, A.K, 2014, "Temperature and wind speed impact on the efficiency of PV installations. Experience obtained from outdoor measurements in Greece". Renewable Energy, Vol. 66, pp. 612-624.
[36] Geospatial information infrastructure, Ministry of Environment and Energy, 2018, "Corine Land Cover 2018", Available from: http://mapsportal.ypen.gr (Accessed at 20th July 2020)
[37] Sustainable Energy Authority of Ireland, 2020, "Best practice guide: Photovoltaics", Available from: https://www.seai.ie (Accessed at 10th September 2020).
[38] Kaldellis, J.K., Zafirakis, D. and Kondili, E., 2010, "Energy pay-back period analysis of stand-alone photovoltaic systems", Renewable Energy, Vol. 35(7), pp. 1444-1454.
[39] Kaldellis, J.K., 2010, "Feasibility assessment for stand-alone and hybrid wind energy systems", In Stand-Alone and Hybrid Wind Energy Systems. Technology, Energy Storage and Applications, Sawston: Woodhead Publishing Limited, pp. 102–161.
[40] Kaldellis, J.K., Triantafyllou, P., Kaldellis, A. and Ktenides, P., 2020. "Energy Design Plan for Nisyros Island. Towards a Totally Green Energy Island", Soft Energy Applications & Environmental Protection Laboratory, University of West Attica.