

ΓΕΩΘΕΡΜΙΑ - ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΕΣ ΑΝΤΛΙΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΤΡΟΠΩΝ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΥΣ ΣΤΗ ΣΑΝΤΟΡΙΝΗ

Μ. Παπαχρήστου^{1*}, Ε. Νικολαΐδου¹, Μ. Φυτίκας¹, Ν. Ανδρίτσος², Ν. Κολιός³

¹Τμήμα Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 541 24 Θεσσαλονίκη,
e-mail: mariap@geo.auth.gr

²Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

³Ινστιτούτο Γεωλογικών & Μεταλλευτικών Ερευνών & Μελετών

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία αναφέρεται στα αποτελέσματα ενός ερευνητικού προγράμματος που διεξάγεται στη Σαντορίνη και αφορά την αξιολόγηση των γεωθερμικών πόρων του νησιού και τις δυνατότητες αξιοποίησής τους. Το νησιώτικο συγκρότημα Σαντορίνης ανήκει στο ενεργό ηφαιστειακό τόξο του Νοτίου Αιγαίου και θεωρείται ευνοημένο από γεωθερμική άποψη. Η γεωλογική, τεκτονική και ηφαιστειολογική δομή του νησιού φαίνεται ότι δημιουργούν κατάλληλες συνθήκες για την ανάπτυξη πολύ αξιόλογου γεωθερμικού δυναμικού όλων των κατηγοριών. Ρευστά υψηλής ενθαλπίας εντοπίζονται στο κεντρικό και ενεργό τμήμα του ηφαιστείου (καλδέρα), τα οποία όμως είναι σχεδόν αδύνατο να αξιοποιηθούν λόγω των ειδικών συνθηκών που διαμορφώνονται στο χώρο αυτό. Ρευστά μέσης ενθαλπίας (130°–150°C) φαίνεται ότι υπάρχουν σε περιοχές της κεντρικής-νότιας Θήρας, όπως βάσιμα συνάγεται από την αυξημένη γεωθερμική βαθμίδα, τα γεωφυσικά δεδομένα και τη χημική γεωθερμομετρία. Υδροφόροι χαμηλής ενθαλπίας έχουν εντοπισθεί σε γεωτρήσεις βάθους ως 300 m και με θερμοκρασίες μέχρι 65 °C. Μεγάλο δυναμικό αβαθούς γεωθερμίας προκύπτει από την έρευνα σε πολύ μικρά βάθη. Βρέθηκαν σε πολλές περιοχές υφάλμυρα νερά, των οποίων η θερμοκρασία είναι σχετικά αυξημένη (20°C – 25°C), όπως προέκυψε από μετρήσεις στην κεφαλή γεωτρήσεων και σε πηγάδια. Στο πλαίσιο ερευνητικού προγράμματος βρίσκεται σε εξέλιξη λεπτομερής υπαίθρια αναζήτηση, προσδιορισμός και καταγραφή γεωθερμικών χαρακτηριστικών (θερμοκρασία, δυναμικό των υδροφορέων, χημισμός των νερών). Το γεωθερμικό δυναμικό της Σαντορίνης μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες εφαρμογές προσαρμοσμένες στον τουριστικό και αγροτικό χαρακτήρα του νησιού.

Λέξεις Κλειδιά: γεωθερμική έρευνα, καταγραφή γεωτρήσεων, εφαρμογές γεωθερμίας

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το νησιωτικό συγκρότημα Σαντορίνης (ή Θήρας) εκτείνεται περίπου 120 km βόρεια της Κρήτης και βρίσκεται στο νοτιότερο τμήμα του ενεργού ηφαιστειακού τόξου του Νοτίου Αιγαίου. Το νησί της Σαντορίνης είναι μέλος του ηφαιστειακού νησιωτικού συμπλέγματος Θήρας, Θηρασίας, Ασπρονήσιου, Παλαιάς και Νέας Καμένης, αποτελώντας κατά τους πολύ πρόσφατους γεωλογικούς αλλά και ιστορικούς χρόνους, το πιο ενεργό ηφαιστειακό κέντρο του Αιγαίου και ένα από τα πιο βίαια ηφαίστεια στον κόσμο.

Οι ευνοϊκές συνθήκες για την ανάπτυξη σημαντικών γεωθερμικών συστημάτων στη Σαντορίνη συνδέονται με αυτήν ακριβώς την ενεργή ηφαιστειότητα της περιοχής και την ύπαρξη μάγματος πολύ υψηλής θερμοκρασίας σε σχετικά μικρό βάθος στις δύο καλδέρες (Σαντορίνης και Κολούμπου). Ενδιαφέρουσες γεωθερμικά περιοχές έχουν εντοπιστεί και πάνω στο νησί της Σαντορίνης, όπου κατά τις γεωθερμικές έρευνες του ΙΓΜΕ στα τέλη της δεκαετίας του 1970 μετρήθηκαν αξιόλογες θερμοκρασίες και γεωθερμική βαθμίδα πολλαπλάσια της μέσης γήινης ($\approx 3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$).

Από τη γεωφυσική, γεωχημική και γεωτρητική έρευνα, προέκυψε ότι είναι πολύ πιθανή η ανάπτυξη γεωθερμικών συστημάτων μέσης ενθαλπίας (με θερμοκρασίες $90\text{-}150^{\circ}\text{C}$) και σε εκμεταλλεύσιμα βάθη (π.χ. 1000m) στη Νότια Θήρα. Σε βάθη μικρότερα των 500 m έχουν ήδη βρεθεί ρευστά χαμηλής ενθαλπίας με θερμοκρασίες έως 65°C .

Σε όλες σχεδόν τις περιοχές της Σαντορίνης υπάρχουν ρηχοί υδροφόροι με θερμοκρασίες $20\text{-}25^{\circ}\text{C}$ (αβραθής γεωθερμιά) που έχουν επίσης σημαντικό πρακτικό ενδιαφέρον, τόσο για θέρμανση όσο και δροσισμό, με τη χρήση γεωθερμικών αντλιών θερμότητας.

2. ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ – ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΣΑΝΤΟΡΙΝΗΣ

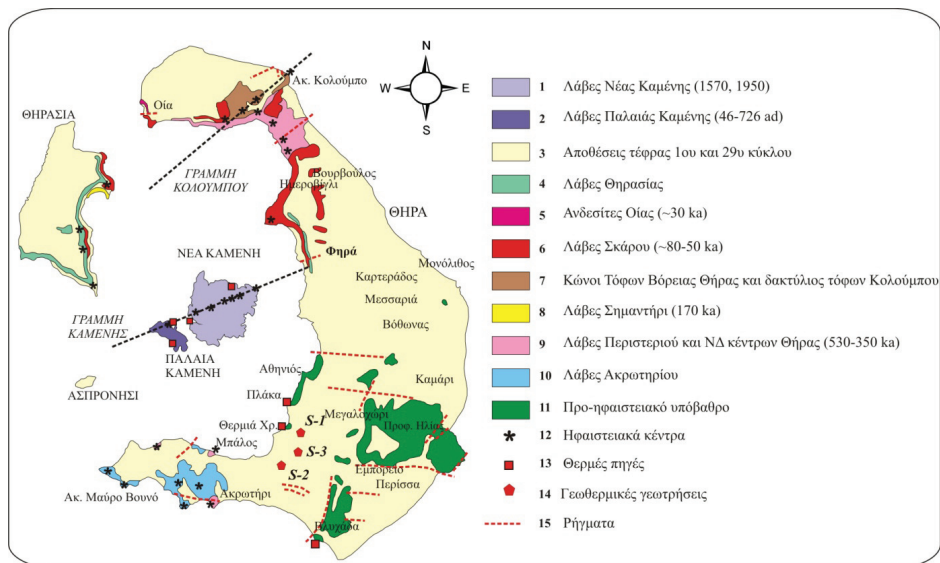
Η Σαντορίνη δομείται σχεδόν αποκλειστικά από Πλειοκαινικά έως πολύ πρόσφατα πυροκλαστικά υλικά και λάβες, ως αποτέλεσμα πολλών διαδοχικών ηφαιστειακών εκρήξεων σε μια περίοδο που διήρκεσε περίπου 0,7 εκ. έτη.

Το προ-ηφαιστειακό γεωλογικό υπόβαθρο του νησιού ανήκει στην Απτικοκυκλαδική Μάζα [1,2] και εμφανίζεται επιφανειακά στο ΝΑ τμήμα της Σαντορίνης (Προφήτη Ηλία, Πύργο, Γαβρήλο και ευρύτερη περιοχή Αθηνιού) (Εικόνα 1). Συνίσταται κυρίως σε μεταμορφωμένες φυλλιτικές σειρές [2,3] και μεγάλου πάχους επανακρυσταλλωμένους ασβεστόλιθους [2,4,5] Οι γλαυκοφανικοί σχιστόλιθοι που βρίσκονται στις περιοχές Αθηνιού και Θερμιών επηρεάστηκαν μερικώς από θερμομεταμόρφωση επαφής λόγω μιας νεότερης (7 εκ. ετών) γρανιτικής διεύθυνσης [6] που βρέθηκε και σε μερικές ερευνητικές γεωτρήσεις του ΙΓΜΕ.

Η μετα-αλπική ηφαιστειακή δραστηριότητα στην ευρύτερη περιοχή χρονολογείται από το Κατώτερο Τεταρτογενές (πριν από 1,6-2,0 εκ. έτη). Ξεκίνησε στα νησιά των Χριστιανών (20 km ΝΔ της Σαντορίνης) και συνεχίστηκε βορειότερα. Η πιο γνωστή και πρόσφατη μεγάλη έκρηξη στη Σαντορίνη είναι η λεγόμενη «Μινωική» που έγινε πριν περίπου 3600 χρόνια (≈ 1613 π.Χ.), κατά την ύστερη εποχή του Χαλκού. Η τελευταία έκρηξη στο νησί ήταν το 1950, ενώ η τελευταία κατάρρευση της καλδέρας συνδέεται με την καταστροφική Μινωική έκρηξη, υπολείμματα της οποίας αποτελούν η Θήρα, η Θηρασία και το Ασπρονήσι. Η Παλαιά και Νέα Καμένη σχηματίστηκαν κατά τη διάρκεια της μετα-καλδερικής ηφαιστειακής δραστηριότητας που ξεκίνησε γύρω στο 197 π.Χ. [7] και συνεχίζεται μέχρι σήμερα.

Η τεκτονική δομή της Σαντορίνης είναι πολύπλοκη και αντανάκλα τις πολλές και διαδοχικές φάσεις κατάρρευσης της καλδέρας [2]. Κυριαρχούν τα ΒΑ-ΝΔ ρήγματα, τα οποία ακολουθούν το ενεργό εφελκυστικό καθεστώς του κεντρικού Αιγαίου και έχουν προκαλέσει μετατόπιση και επαναδραστηριοποίηση των παλιότερων ρηγμάτων Α-Δ και Β-Ν διεύθυνσης^[11]. Το κύριο τεκτονικό στοιχείο που καθορίζει τη θέση των ηφαιστειακών κέντρων της περιοχής είναι μια τεκτονική τάφρος με διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ στην περιοχή του Μεγαλοχωρίου. Η καλδέρα της Σαντορίνης με τις Καμένες, ο κρατήρας του Κολούμπου και τα Χριστιανά ακολουθούν δύο νοητές ευθείες ΒΑ-ΝΔ διεύθυνσης, γνωστών αντίστοιχως «γραμμής Καμένης» και «γραμμής

Κολούμπου» (Εικόνα 1), που χαρακτηρίζονται από σεισμική και έντονη τεκτονική και ηφαιστειακή δραστηριότητα [11,12].



Εικόνα 1: Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης του νησιωτικού συμπλέγματος της Σαντορίνης (πηγές: [7], [8]; [9]; [10])

Σύμφωνα με στοιχεία που προέκυψαν από τη γεωφυσική έρευνα στην περιοχή, μεταξύ Μεγαλοχωρίου και Βλυχάδας υπάρχει ένα τεκτονικό βύθισμα (graben) με διεύθυνση Β-Ν που επηρεάζει τους παλαιότερους σχηματισμούς του υποβάθρου και συνδέεται άμεσα με τη σημαντική θετική γεωθερμική ανωμαλία σε αυτό το τμήμα του νησιού[1].

3. ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Οι γεωτεκτονικές και μαγματικές συνθήκες που επικρατούν στη Σαντορίνη έχουν δημιουργήσει ευνοϊκές προϋποθέσεις για σημαντική γεωθερμική/υδροθερμική δραστηριότητα, η οποία αποδεικνύεται από την ύπαρξη μαγματικών θαλάμων σε μικρά βάθη (3-4 km κάτω από την καλδέρα) και αρκετών παράκτιων και υποθαλάσσιων θερμών πηγών[1]. Πάνω στη Σαντορίνη, οι επιφανειακές εκδηλώσεις της γεωθερμίας συνίστανται στις θερμές πηγές αναβλύζουν κατά θέσεις στο εσωτερικό μέρος της καλδέρας, κατά μήκος ρηγμάτων και ρωγμών στον προ-ηφαιστειακό υπόβαθρο, καθώς και στο εξωτερικό μέρος του νησιού, μέσα από τα πετρώματα του υποβάθρου. Οι κυριότερες πηγές είναι νότια του Αθηνιού στη θέση Πλάκα (33,6°C), στα πρανή της καλδέρας, στο Αθέρμι Χριστού (56°C) και στην Βλυχάδα (32°C) στο νοτιότερο άκρο του νησιού. Η απουσία εντυπωσιακών επιφανειακών γεωθερμικών εκδηλώσεων σε ένα τόσο ενεργό ηφαιστειακό νησί (π.χ. υδροθερμικοί κρατήρες) οφείλεται πιθανώς στην ύπαρξη επιφανειακών πολύ πρόσφατων ηφαιστειακών στρωμάτων, τα οποία είναι πολύ υδροθερατά και επιτρέπουν τη μαζική διείσδυση θαλασσινού νερού που επηρεάζει αρνητικά τη θερμοκρασία και το χημισμό των ανερχόμενων προς την επιφάνεια θερμών ρευστών.

Με βάση τις γεωθερμικές έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί στη Σαντορίνη, και κυρίως τις ερευνητικές γεωτρήσεις του ΙΓΜΕ, φαίνεται ότι η γεωθερμική ανωμαλία εντοπίζεται εντός ή πολύ κοντά στο μεταμορφωμένο υπόβαθρο, μέσα στο οποίο αναπτύσσεται το υδροθερμικό

σύστημα. Οι σχηματισμοί του υποβάθρου περιέχουν αδιαπέρατα πετρώματα, τα οποία απομονώνουν και προστατεύουν μερικώς τα θερμά ρευστά από το ψυχρό επιφανειακό μετεωρικό ή θαλασσίνο νερό. Τα «ανοικτά» κανονικά ρήγματα που υπάρχουν στην περιοχή, λειτουργούν ως οδοί κυκλοφορίας των «γεωθερμικών» νερών και επιτρέπουν την άνοδό τους προς την επιφάνεια[1].

Οι προκαταρκτικές έρευνες κατέδειξαν μια περιοχή με γεωθερμική ανωμαλία στο νότιο τμήμα της Σαντορίνης, μεταξύ Ακρωτηρίου, Εμπορείου και Μεγαλοχωρίου. Αντίθετα, στη βόρεια Σαντορίνη επικρατούν χαμηλές θερμοκρασιακές βαθμίδες [1]. Η μεγάλη γεωθερμική ανωμαλία στο νότιο τμήμα του νησιού οφείλεται στην ύπαρξη του τεκτονικού βυθίσματος διεύθυνσης Β-Ν και τη δράση των ρηγμάτων στο ανατολικό και δυτικό περιθώριό του, πιθανώς σε συνδυασμό με τα ΒΑ-ΝΔ ρήγματα που είναι παράλληλα στη γραμμή Καμένης.

Στην περιοχή αυτή έγιναν από το ΙΓΜΕ συνολικά 9 ερευνητικές γεωτρήσεις μικρής διαμέτρου (Εικόνες 2, 3), με σκοπό τη μελέτη της στρωματογραφίας, τη μέτρηση της γεωθερμικής βαθμίδας και τη δειγματοληψία ρευστών από βαθύτερους υδροφόρους ορίζοντες. Τα βάθη των γεωτρήσεων κυμάνθηκαν μεταξύ 138 m και 182 m. Τα πιο αξιόλογα ευρήματα προέκυψαν από τις γεωτρήσεις Γ-4 (βόρεια του Εμπορείου), Γ-6 (Ακρωτήριο, θέση Φανάρι), Γ-11 (Ακρωτήριο), Γ-9 (Μεγαλοχώρι), με γεωθερμική βαθμίδα 4,7 °C/100 m, 9,2°C/100 m, 4,7°C/100 m και 15,7°C/100 m αντίστοιχα.

Το 1985 κατασκευάστηκαν τρεις (3) βαθύτερες γεωτρήσεις (Εικόνες 2, 3):S-1 (πολύ κοντά στη θέση της γεώτρησης Γ-9), S-2 (δίπλα στην Γ-8) και S-3 (σε θέση περίπου 1 km δυτικά του Εμπορείου). Οι μέγιστες θερμοκρασίες που μετρήθηκαν στις γεωτρήσεις αυτές ήταν 64,7°C σε βάθος 240 m στη γεώτρηση S-1 (γ/θ βαθμίδα 16°C/100 m), 52,3°C στα 440 m στη γεώτρηση S-2 (γ/θ βαθμίδα 13°C/100 m) και 51,2°C στο βάθος των 260 m στην S-3[1].

Οι έρευνες αυτές επιβεβαίωσαν την παρουσία ενός πολύ σημαντικού γεωθερμικού συστήματος χαμηλής ενθαλπίας και οδήγησαν στη χωροθέτηση του πιθανού γεωθερμικού πεδίου χαμηλής θερμοκρασίας της νήσου Σαντορίνης (Εικόνα 2). Το πεδίο αυτό έχει έκταση 25 km² και θερμοκρασίες ταμιευτήρα 30-65°C σε μικρά σχετικά βάθη (50-250 m).

Όπως προαναφέρθηκε, εκτός του γεωθερμικού συστήματος χαμηλής ενθαλπίας, η ύπαρξη ενός ταμιευτήρα με ρευστά μέσης ενθαλπίας (>90°C) σε μεγαλύτερα βάθη θεωρείται, σύμφωνα με όλα τα υπάρχοντα στοιχεία, πολύ πιθανή. Οι ταμιευτήρες θερμών ρευστών μέσης ενθαλπίας με θερμοκρασίες 120°C έως 150°C είναι κατά πάσα πιθανότητα οι ασβεστόλιθοι του υποβάθρου με στεγανό κάλυμμα τους υπερκείμενους φυλλίτες και πρασινοσχιστόλιθους ή ακόμη και έντονα διαρρηγμένες τεκτονικά ζώνες του υποβάθρου σε συνδυασμό με φλέβες χαλαζία ή στρώματα από ασβεστοσχιστίτες. Τα γεωθερμόμετρα SiO₂, Na-K-Ca και Na/K που εφαρμόστηκαν σε δείγματα νερού από ρηχές γεωτρήσεις οδηγούν σε ενδεικτικές θερμοκρασίες στον βαθύτερο ταμιευτήρα της τάξης των 160-190°C, 130°C και 140°C αντίστοιχα. Σύμφωνα με το γεωθερμόμετρο K-N-Mg που εφαρμόστηκε επίσης σε ρηχούς ταμιευτήρες [13], οι θερμοκρασίες βάθους κυμαίνονται από 110°C έως 175°C. Και στις δύο περιπτώσεις ο γεωθερμικός ταμιευτήρας εκτιμάται ότι βρίσκεται σε βάθη μεταξύ 800 και 1000 m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους.

4. ΝΕΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ-ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Στο πλαίσιο των ερευνών που διεξάγονται στη Σαντορίνη από τις αρχές Απριλίου 2014, πραγματοποιήθηκαν εκτεταμένες εργασίες υπαίθρου σε όλο σχεδόν το νησί, με σκοπό την αναζήτηση κατάλληλων γεωτρήσεων για την πραγματοποίηση επιτόπιων μετρήσεων θερμοκρασίας, ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) και παροχής (όπου αυτό κατέστη δυνατό). Περισσότερη έμφαση δόθηκε στις περιοχές Εμπορείου, Μεγαλοχωρίου, Μεσσαριάς, Βλυχάδας λόγω της αυξημένης γεωθερμικής βαθμίδας που έχει μετρηθεί εκεί, και στην περιοχή των Φηρών, λόγω του μεγαλύτερου ενδιαφέροντος για αξιοποίηση της γεωθερμίας σε υπάρχουσες κτιριακές εγκαταστάσεις.

Θερμομετρήθηκαν συνολικά 136 γεωτρήσεις και ρηχά πηγάδια στη Σαντορίνη, ενώ καταγραφή των υπαρχουσών γεωτρήσεων έγινε και στη Θηρασία, όπου κατέστη δυνατή η μέτρηση μόνο μίας εξ αυτών. Οι μετρήσεις έγιναν στην κεφαλή των γεωτρήσεων, μετά από την παρέλευση ικανού χρόνου άντλησης, ώστε να ληφθεί αξιόπιστο δείγμα προς μέτρηση.

Σχεδόν στο σύνολο των γεωτρήσεων, το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα εντοπίστηκε κοντά ή ακριβώς στο επίπεδο της θάλασσας (25 έως 190 m κάτω από το επίπεδο του εδάφους). Η θερμοκρασιακή κατάσταση στη Σαντορίνη, με τη μορφή καμπυλών ίσης θερμοκρασίας που αναφέρονται περίπου στο απόλυτο υψόμετρο 0, παρουσιάζεται στην Εικόνα, ενώ η χωρική κατανομή των θερμοκρασιών παρουσιάζεται στην Εικόνα 3. Σημειώνεται ότι οι γεωτρήσεις του ΙΓΜΕ που απεικονίζονται στους χάρτες δεν ελήφθησαν υπόψη κατά το σχεδιασμό των ισόθερμων καμπυλών, δεδομένου ότι οι μετρήσεις της θερμοκρασίας έγιναν στο εσωτερικό τους και όχι στην κεφαλή, όπως στις υπόλοιπες.

Η πιο ενδιαφέρουσα περιοχή βρίσκεται στο νότιο τμήμα του νησιού (περιοχή Μεγαλοχωριού) με θερμοκρασίες που υπερβαίνουν τους 50-60°C σε γεωτρήσεις το βάθος των οποίων κυμαίνεται από 100 έως 200 m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους (κ.ε.ε.).

Οι μικρότερες συγκριτικά θερμοκρασίες μετρήθηκαν στο βόρειο τμήμα (ευρύτερη περιοχή Οίας) και δεν υπερβαίνουν τους 22°C σε γεωτρήσεις βάθους 25-40 m (κ.ε.ε.), εκτός από μία δημοτική γεώτρηση που χρησιμοποιείται για αφαλάτωση, της οποίας η θερμοκρασία μετρήθηκε στους 24,2°C και το βάθος της είναι 182 m.

Στην περιοχή των Φηρών, όπου υπάρχει και το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για αξιοποίηση της γεωθερμίας, μετρήθηκαν 14 γεωτρήσεις με πολύ ενθαρρυντικά αποτελέσματα. Ενδεικτικά αναφέρεται πως σε ένα ρηχό πηγάδι, βάθους μόλις 7 m, η θερμοκρασία ήταν 21°C. Σε γεωτρήσεις μεγαλύτερου βάθους (έως 186 m) μετρήθηκαν θερμοκρασίες υψηλότερες των 26°C. Τέλος σε ιδιωτική γεώτρηση βάθους 80 m που βρίσκεται 1,5 km ανατολικά των Φηρών, μετρήθηκε η υψηλότερη θερμοκρασία της περιοχής, ίση με 27,7°C.

Νοτιοανατολικά των Φηρών, στην περιοχή της Μεσαριάς, βρέθηκαν επίσης ενδιαφέρουσες θερμοκρασίες, οι οποίες κυμαίνονται από 24,2°C έως 27,6°C.

Νοτιότερα, γύρω από τον οικισμό «Εμπορείο», μετρήθηκαν 37 γεωτρήσεις και πηγάδια. Τα βάθη στις περισσότερες γεωτρήσεις είναι μικρά, μεταξύ 25 και 50 m, ενώ η θερμοκρασία στην κεφαλή τους είναι σε όλες μεγαλύτερη των 24-25°C. Αξιοσημείωτη είναι η θερμοκρασία των 29,3°C που μετρήθηκε σε γεώτρηση βάθους μόλις 27 m.

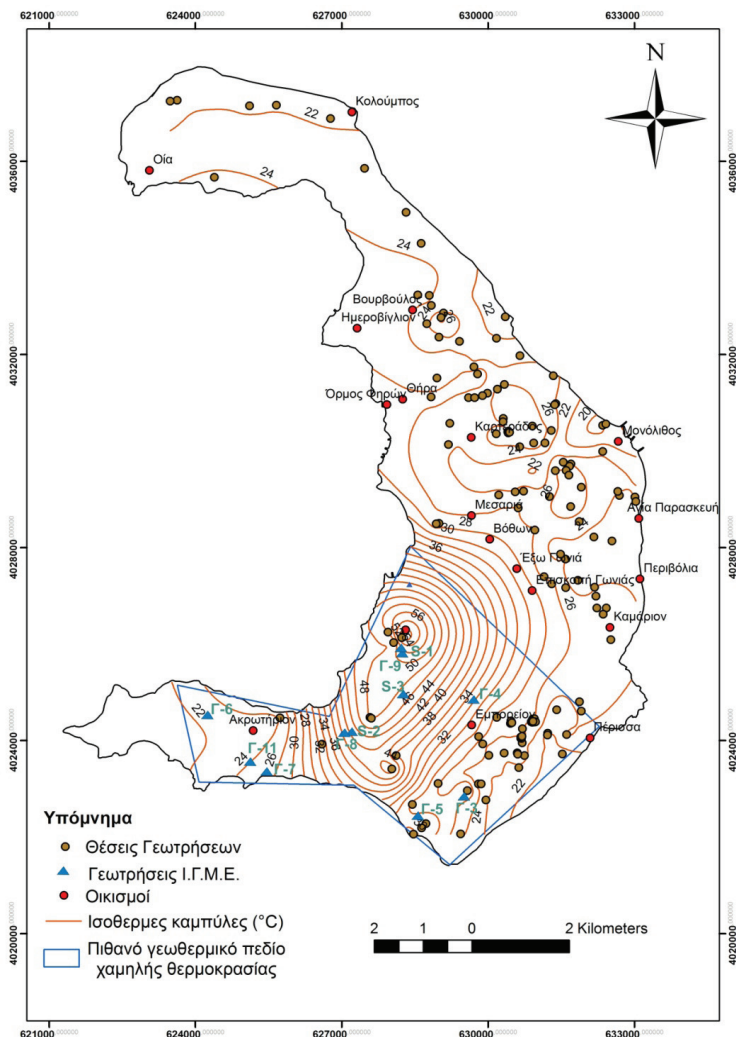
Στην περιοχή της Βλυχάδας, όλες οι γεωτρήσεις έχουν αυξημένη θερμοκρασία, από 27°C έως 32°C περίπου, παρά το πολύ μικρό τους βάθος (έως 35 m).

Τέλος, στη Θηρασία μετρήθηκε μόνο μία ρηχή δημοτική γεώτρηση που χρησιμοποιείται για αφαλάτωση, με θερμοκρασία 20,9°C, η οποία ουσιαστικά αντλεί θαλασσινό νερό.

Όλα τα γεωθερμικά νερά μέχρι 65°C που βρέθηκαν στη Σαντορίνη ανήκουν στην κατηγορία των νατριο-χλωριούχων νερών με μέτρια έως μεγάλη αλατότητα που δείχνει σαφή επίδραση της θάλασσας.

Συγκεκριμένα, σε αρκετές από τις γεωτρήσεις που χρησιμοποιούνται για αφαλάτωση, η ηλεκτρική αγωγιμότητα υπερβαίνει τα 20.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Στις υπόλοιπες, οι τιμές κυμαίνονται από 900 έως 6700 $\mu\text{S}/\text{cm}$, εκτός από δύο περιπτώσεις ιδιωτικών γεωτρήσεων, στον Μονόλιθο και την Περίσσα, στις οποίες η ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι μεγαλύτερη από 10.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Σε επόμενη φάση πρόκειται να γίνει δειγματοληψία από θέσεις που κρίνονται χρήσιμες και χαρακτηριστικές για τους σκοπούς του ερευνητικού προγράμματος

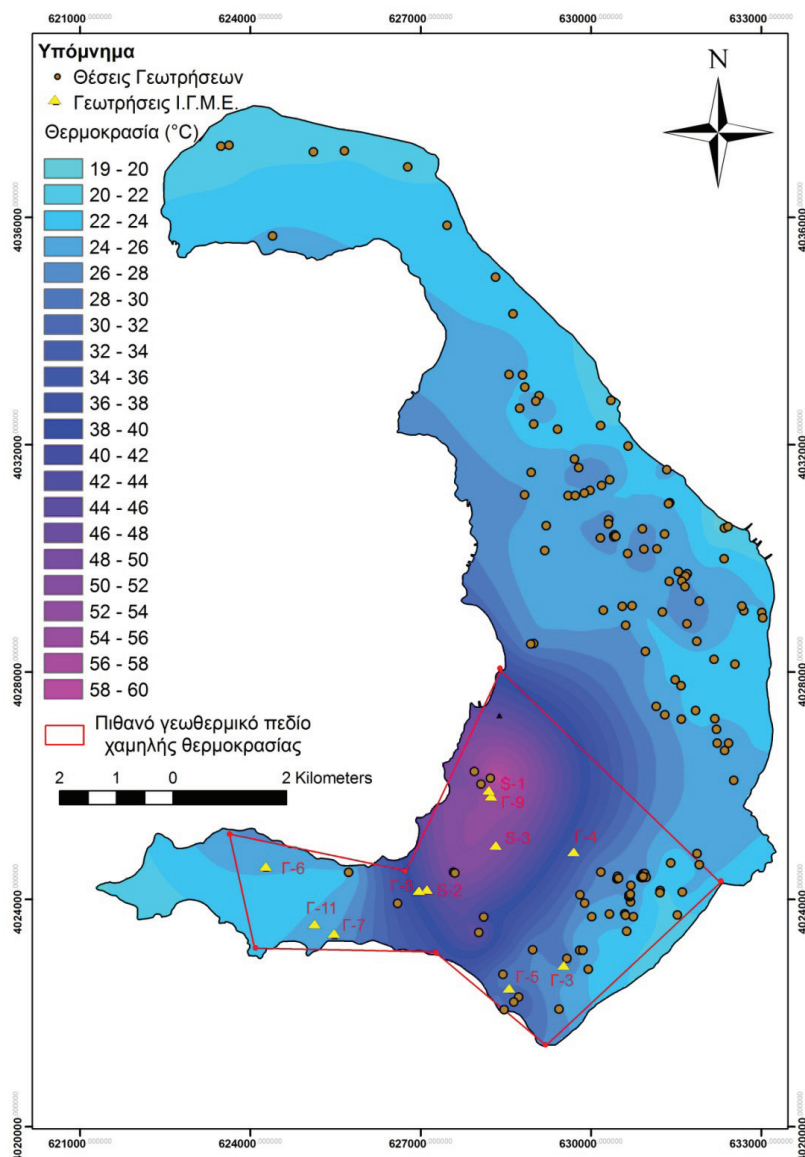


Εικόνα 2: Καμπύλες ίσης θερμοκρασίας

5. ΣΚΟΠΙΜΟΤΗΤΑ ΧΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ ΣΤΗ ΣΑΝΤΟΡΙΝΗ- ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

Προηγούμενη έρευνα άλλα και η παρούσα καταγραφή έδειξε ότι υπάρχει ένα αξιόλογο γεωθερμικό δυναμικό χαμηλής θερμοκρασίας στη Σαντορίνη, κυρίως στην περιοχή Μεγαλοχωρίου. Το δυναμικό αυτό θα μπορούσε κάλλιστα να αξιοποιηθεί, μεταξύ άλλων, για την ανάπτυξη συγκροτημάτων ευεξίας (SPA), κάτι που θα μπορούσε να συνεισφέρει στην επέκταση της τουριστικής περιόδου του νησιού, στη θέρμανση ή στην υποβοήθηση θερμοκηπίων, αλλά και στην αφυδάτωση αγροτικών προϊόντων και κυρίως της άνυδρης σαντορινιάς ντομάτας που είναι ένα από τα κυριότερα αγροτικά προϊόντα του νησιού.

Η ύπαρξη δυναμικού μέσης ενθαλπίας (με θερμοκρασίες νερών 90-120 °C) που μπορεί να υπάρχει σε μεγαλύτερα βάθη θεωρείται περισσότερο από βέβαιη. Σε αυτή την περίπτωση τα γεωθερμικά ρευστά μέσης ενθαλπίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ηλεκτροπαραγωγή με το δυαδικό κύκλο, για αφαλάτωση υφάλμυρου ή θαλασσινού νερού και για θέρμανση χώρων.



Εικόνα 3: Απεικόνιση γεωτρήσεων και χρωματική διαβάθμιση της θερμοκρασίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Fytikas, M., Karydakias, G., Kavouridis, Th., Kolios, N., Vougioukalakis, G., 1990a, Geothermal research on Santorini, in: Hardy D.A., Keller J., Galanopoulos, V.P., Fleming N.C., Druitt, T.H. (eds), Thera and the Aegean World III, The Thera Foundation, London, 2, 241-249.
- [2] Fytikas, M., Kolios, N., Vougioukalakis, G.E., 1990b, Post-Minoan volcanic activity of the Santorini Volcano. Volcanic Hazard and Risk. Forecasting possibilities, in: Hardy D.A., Keller J., Galanopoulos, V.P., Fleming N.C., Druitt, T.H. (eds), Thera and the Aegean World III, The Thera Foundation, London, 2, 183-198.
- [3] Tataris, A., 1964. The iron and manganese in the sands of Thera coasts, Bulletin of Greek Geological Society, 6(1), 65-83.
- [4] Papastamatiou, J. 1958. Sur l'âge des calcaires cristallines de l'île de Thera (Santorin). Bull. Geol. Soc. Greece, 3: 104-113.
- [5] Blake, M.C., Bonneau, M., Geussant, J., Kienast, J.R., Lepvier, C., Maluski, H., Papanikolaou, D., 1981, A geologic reconnaissance of the Cycladic blueschists belt, Greece, Geological Society of America Bulletin, 92, 247-254.
- [6] Skarpelis, N., Liati, A., 1990, The prevolcanic basement of Thera at Athinios: Metamorphism, Plutonism and Mineralization, in: Hardy D.A., Keller J., Galanopoulos, V.P., Fleming N.C., Druitt, T.H. (eds), Thera and the Aegean World III, The Thera Foundation, London, 2, 172-182.
- [7] Francalanci L., Vougioukalakis, G.E., Perini G., Manetti, P., 2005, A West-East Traverse along the magmatism of the south Aegean volcanic arc in the light of volcanological, chemical and isotope data, in: M. Fytikas, G.E. Vougioukalakis (eds), The South Aegean Active Volcanic Arc, Present Knowledge and Future Perspectives, Developments in Volcanology, Elsevier, Amsterdam.
- [8] Pavlides S., Mountrakis D., Fytikas M., Chatzipetros A., Christou O., Meletlidis S., Tranos M. and Vougioukalakis G. (1997). Neotectonic map of Santorini, Volcanoes, Earthquakes and Archaeology, London, United Kingdom, 28-29 April 1997, abstract volume, 31-32.
- [9] Mountrakis D, Pavlides S., Chatzipetros A, Meletlidis S, Tranos M, Viougioukalakis G and Kiliass A, (1998). Active deformation of Santorini. In: European Laboratory Volcanoes, Proceedings of the 2nd workshop on European Laboratory Volcanoes, eds: R. Casale, M. Fytikas, G. Sigvaldasson and G. Vougioukalakis, European Commission, Sci. Res. Development, p. 13-22.
- [10] Druitt, T.H., Edwards, L., Mellors, R.M., Pyle, D.M., Sparks, R.S.J., Lanphere, M., Davies, M. and Barreiro, B., 1999. Santorini Volcano. Geol. Soc. Mem., 19:165.
- [11] Perissoratis, C., 1995, The Santorini volcanic complex and its relation to the stratigraphy and structure of the Aegean arc, Greece, Marine Geology, 128, 37-58.
- [12] Arriaga, M-C.S., Tsompanakis, Y., Samaniego, F., 2008, Geothermal manifestations and earthquakes in the caldera of Santorini, Greece: An historical perspective, Proceedings of the 33rd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, January 28-30 2008.
- [13] Mendrinou, D., Choropanitis, I., Polyzou, O., Karytsas, C., 2010, Exploring for geothermal resources in Greece, Geothermics, 39, 124-137.

ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΥ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΝΤΛΙΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ- ΨΥΞΗΣ

Φ. Γαϊτάνης*, Κ.Λ. Κατσιφαράκης, Δ. Μπίκας

Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
Τ.Κ. 541 24, Θεσσαλονίκη, e-mail: fotisgait@gmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η αυξημένη ανάγκη εξοικονόμησης ενέργειας τις τελευταίες δεκαετίες έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη και εγκατάσταση, ιδίως στον ευρωπαϊκό χώρο, γεωθερμικών αντλιών θερμότητας κλειστού βρόγχου, για την κάλυψη των αναγκών θέρμανσης και ψύξης. Συνηθέστερα παρατηρείται η εγκατάσταση συστημάτων κατακόρυφου βρόγχου, λόγω της σημαντικά μικρότερης απαιτούμενης έκτασης.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι κατάστρωση ενός μαθηματικού μοντέλου που να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του οικονομικώς βέλτιστου συνδυασμού γεωθερμικών αντλιών θερμότητας και συμβατικών συστημάτων θέρμανσης-ψύξης. Το μοντέλο αυτό εξειδικεύεται και εφαρμόζεται σε ένα κτίριο γραφείων στη Νεάπολη Βοΐου. Η βελτιστοποίηση γίνεται με την εύρεση του ποσοστού της απαιτούμενης ισχύος που καλύπτεται από τη γεωθερμική αντλία θερμότητας και του ποσοστού που καλύπτεται από τα συμβατικά συστήματα θέρμανσης, ώστε να ελαχιστοποιείται το συνολικό κόστος, ενώ παράλληλα διατηρείται η οικονομική βιωσιμότητα της επένδυσης.

Λέξεις κλειδιά: γεωθερμία, αντλία θερμότητας, γραμμικός προγραμματισμός, RETScreen 4, βελτιστοποίηση

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ανάγκη αύξησης της ενεργειακής αποδοτικότητας στον κτιριακό τομέα και η επίτευξη των στόχων που έχουν τεθεί εντός της Ευρωπαϊκής Ένωσης δεν μπορούν να πραγματοποιηθούν αν δεν βελτιωθεί η ενεργειακή συμπεριφορά του υφιστάμενου κτιριακού αποθέματος. Στον ελληνικό χώρο σημαντικό τμήμα του αποθέματος αυτού αποτελείται από ιστορικές κατασκευές, όπου κάθε επέμβαση με στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας είναι πιθανό να οδηγήσει σε μη αποδεκτές αλλοιώσεις του χαρακτήρα της κατασκευής. Μια εφικτή λύση, που μπορεί να συμβάλει σημαντικά στην μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης σε αυτές τις περιπτώσεις είναι η στροφή σε γεωθερμικές αντλίες θερμότητας (Γ.Α.Θ.). Η πυκνότητα του σύγχρονου αστικού και ημιαστικού ιστού αλλά και η αξία της γης καθιστούν δύσκολη την εγκατάσταση οριζόντιων συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας. Έτσι συχνά προτιμώνται τα κατακόρυφα συστήματα, που απαιτούν σημαντικά μικρότερη επιφάνεια, παρά το συγκριτικώς μεγαλύτερο αρχικό τους κόστος. Για τον λόγο αυτό η παρούσα εργασία αφορά σε κατακόρυφα συστήματα.

2.ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Στην εργασία αυτή χρησιμοποιείται το λογισμικό RETScreen4, που δίνει την δυνατότητα υπολογισμού και διαστασιολόγησης Γ.Α.Θ. Για την ενεργειακή ανάλυση το λογισμικό αυτό χρησιμοποιεί παραλλαγές της μεθόδου συχνοτήτων θερμοκρασιών [1,2]. Η μέθοδος συνίσταται στον υπολογισμό της ενεργειακής κατανάλωσης του συστήματος για διάφορες θερμοκρασίες του εξωτερικού αέρα, και κατόπιν στον πολλαπλασιασμό των ποσοτήτων ενέργειας με τον αριθμό των ωρών στις οποίες εμφανίζεται το θερμοκρασιακό διάστημα που τις περιέχει. Η θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα διαιρείται σε διαστήματα (bins) των 2°C, ανάμεσα στην μέγιστη και την ελάχιστη. Για κάθε θερμοκρασιακό διάστημα υπολογίζονται οι στιγμιαίες θερμικές ή ψυκτικές απαιτήσεις του κτιρίου, ως μια γραμμική συνάρτηση της διαφοράς μεταξύ της εσωτερικής και εξωτερικής θερμοκρασίας και η στιγμιαία κατανάλωση των συσκευών θέρμανσης ή δροσισμού. Στη συνέχεια οι απαιτήσεις ισχύος πολλαπλασιάζονται με τον αριθμό των ωρών στις οποίες εμφανίζεται το θερμοκρασιακό διάστημα, δίνοντας την κατανάλωση ενέργειας των συσκευών του συστήματος. Η τροποποιημένη μέθοδος συχνοτήτων θερμοκρασιών [3], η οποία επιτρέπει την προσομοίωση υπό οιονεί στατική κατάσταση ενεργειακής συμπεριφοράς του κτιρίου, θεωρείται ως η πλέον κατάλληλη για την ενεργειακή αξιολόγηση συστημάτων θέρμανσης και δροσισμού με αντλίες θερμότητας.

Για τη διαστασιολόγηση της αντλίας θερμότητας είναι απαραίτητο να διατίθενται μια σειρά από στοιχεία που εισάγονται από τον χρήστη. Συγκεκριμένα απαιτούνται:

- i. Οι ετήσιες ενεργειακές απαιτήσεις του κτιρίου για θέρμανση και ψύξη.
- ii. Τα φορτία σχεδιασμού για θέρμανση και ψύξη.
- iii. Η θερμοκρασία σχεδιασμού χειμώνα και θέρους.

Για κάθε θερμοκρασιακό διάστημα ισχύει η σχέση:

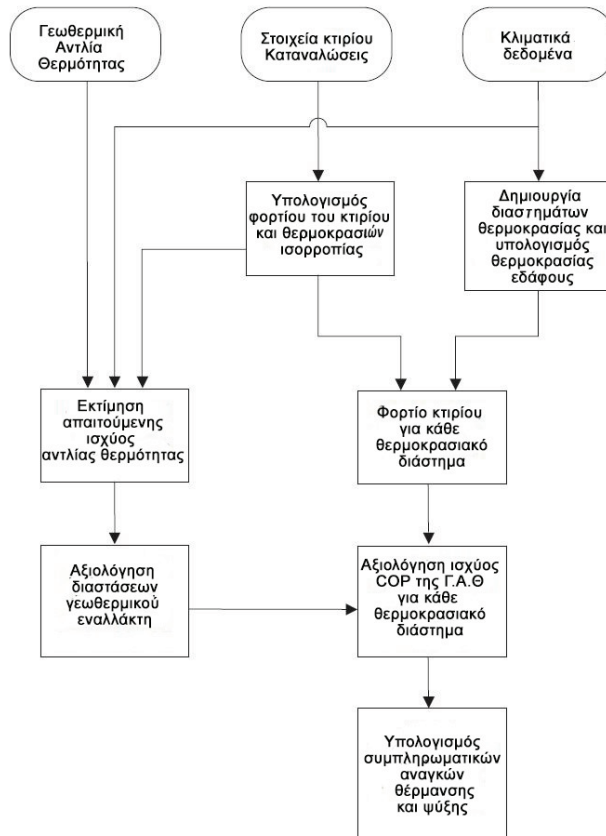
$$q_{d,heat} = c_0 + c_1 T_{d,heat} \quad (1)$$

όπου $q_{d,heat}$ είναι το φορτίο σχεδιασμού θέρμανσης και $T_{d,heat}$ η θερμοκρασία σχεδιασμού για την περίοδο θέρμανσης. Επίσης, οι ετήσιες ενεργειακές απαιτήσεις για την θέρμανση $q_{tot,heat}$ δίνονται από τη σχέση:

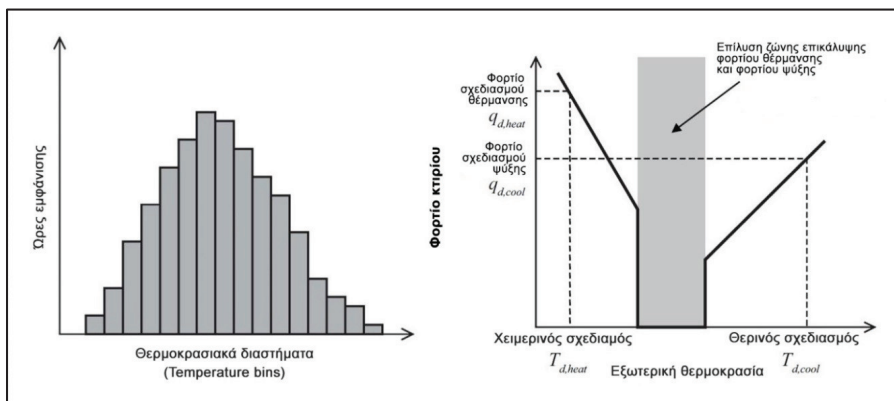
$$q_{tot,heat} = \sum_{i=1}^p (c_0 + c_1 T_{o,i}) h(T_{o,i}) \quad (2)$$

όπου $T_{o,i}$ η μέση θερμοκρασία σε καθένα από τα p θερμοκρασιακά διαστήματα ($1 \leq i \leq p$) και $h(T_{o,i})$ ο αριθμός των ωρών που η εξωτερική θερμοκρασία είναι ίση $T_{o,i}$ κατά την διάρκεια της περιόδου θέρμανσης. Οι συντελεστές c_0 και c_1 υπολογίζονται των εξισώσεων (1) και (2) υπολογίζονται με επαναληπτική διαδικασία. Όμοια διαδικασία ακολουθείται και για την περίοδο ψύξης. Η χρήση όμως δύο ομάδων ανεξάρτητων συντελεστών μπορεί να οδηγήσει

σε αλληλοεπικάλυψη των θερμοκρασιών ισορροπίας. Σε αυτή την περίπτωση το μοντέλο θεωρεί πως και οι δύο απαιτήσεις στο τμήμα που επικαλύπτονται ισούνται με το 0.



Εικόνα 1: Διάγραμμα ροής μοντέλου υπολογισμού ΓΑΘ στο RETScreen 4



Εικόνα 2: (Αριστερά) Θερμοκρασιακά διαστήματα-(Δεξιά) Τροποποιημένες καμπύλες φορτίου του κτιρίου για την επίλυση της ζώνης επικάλυψης.

Η διαστασιολόγηση του γεωθερμικού εναλλάκτη αφορά βασικά στον καθορισμό του μήκους του. Το RETScreen 4 χρησιμοποιεί τη απλή μέθοδο της IGSHA [4], η οποία εξακολουθεί να είναι σε χρήση [5,6]. Με βάση τη μέθοδο αυτή, το απαιτούμενο μήκος για την κάλυψη των αναγκών θέρμανσης και ψύξης υπολογίζεται από τις εξισώσεις:

$$L_h = q_{d,h} \left[\frac{\frac{(COP_h+1)}{COP_h}(R_p+R_sF_h)}{T_{g,min}-T_{ewt,min}} \right] \quad (3)$$

$$L_c = q_{d,c} \left[\frac{\frac{(COP_c+1)}{COP_c}(R_p+R_sF_c)}{T_{ewt,max}-T_{g,max}} \right] \quad (4)$$

όπου q_d είναι το φορτίο σχεδιασμού, COP ο συντελεστής απόδοσης, R_p η θερμική αντίσταση του σωλήνα, R_s η θερμική αντίσταση του εδάφους/πεδίου, F ο συντελεστής μερικού φορτίου το γεωθερμικού εναλλάκτη, $T_{g,min}=T_{g,max}$ η θερμοκρασία του εδάφους, $T_{ewt,min}$ η ελάχιστη επιτρεπτή θερμοκρασία εισόδου στην αντλία θερμότητας, $T_{ewt,max}$ η μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία εισόδου στην αντλία θερμότητας, ενώ οι δείκτες c και h ορίζουν την περίπτωση της ψύξης και της θέρμανσης αντίστοιχα. Οι παραπάνω εξισώσεις δεν λαμβάνουν υπόψη τους τη θερμική ανισορροπία που θα προκληθεί στο έδαφος λόγω μακροχρόνιας χρήσης.

Οι παραπάνω εξισώσεις διαστασιολόγησης χρησιμοποιούνται στην εύρεση του οικονομικώς βέλτιστου συνδυασμού γεωθερμικών αντλιών θερμότητας και συμβατικών συστημάτων θέρμανσης-ψύξης, η οποία γίνεται με χρήση γραμμικού προγραμματισμού. Η όλη διαδικασία επεξηγείται με εφαρμογή σε ιστορικό κτίριο της περιοχής Κοζάνης.

3. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΙΣΤΟΡΙΚΟ ΚΤΙΡΙΟ

3.1. Χαρακτηριστικά περιοχής και κτιρίου μελέτης

Το κτίριο μελέτης υπάγεται στην Δ' κλιματική ζώνη κατά τον Κ.Εν.Α.Κ και βρίσκεται εντός του ημιαστικού ιστού της Νεάπολης Βοΐου. Το συνολικό του εμβαδόν είναι 778 m² από το οποίο τα 448 m² αποτελούν τη θερμαινόμενη-ψυχόμενη επιφάνεια, ενώ ο θερμαινόμενος και ψυχόμενος όγκος του κτιρίου είναι 1933 m³. Αποτελείται από μια ιστορική κατασκευή, που συνδέεται με μια σύγχρονη μέσω ενός γυάλινου όγκου. Η κάτοψη του ιστορικού τμήματος, όπου στεγάζονται όλες οι υπηρεσίες και τα γραφεία είναι τετραγωνική και η νοτιοανατολική του πλευρά σχηματίζει γωνία 34,5° με τον νότο. Σήμερα λειτουργεί ως κτίριο γραφείων 5 ημέρες την εβδομάδα 10 ώρες τη μέρα (8:00-18:00). Τις υπόλοιπες ώρες παραμένει κλειστό.

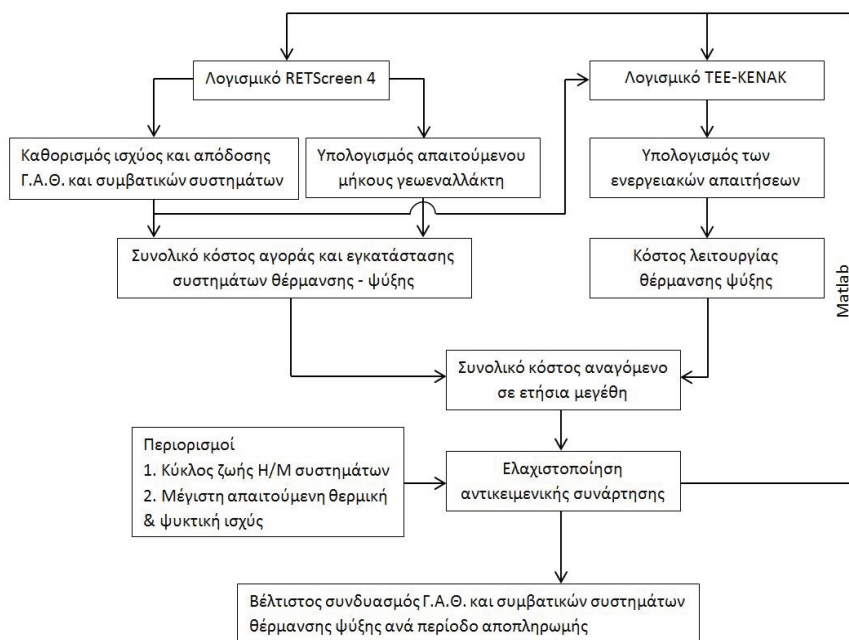
Η θερμική μάζα του είναι χαμηλή αφού η τοποθέτηση της θερμομόνωσης έχει γίνει εσωτερικά και σε κάθε όροφο υπάρχει ψευδοροφή. Το κτίριο είναι ελεύθερο σε κάθε όψη του, ενώ το ιστορικό τμήμα, που αποτελεί και τον θερμαινόμενο-ψυχόμενο χώρο, έρχεται σε επαφή με την επέκταση στην βόρεια όψη του. Η εξασφάλιση της ποιότητας αέρα γίνεται αποκλειστικά με μηχανικό αερισμό μόνο κατά τις ώρες λειτουργίας του κτιρίου. Ο απαιτούμενος νωπός αέρας ισούται με 1350 m³/h. Στον Πίνακα 1 συνοψίζονται στοιχεία για το κέλυφος του κτιρίου.

Τύπος δομικού στοιχείου	Επιφάνεια ανά όψη (m ²)				Συντελεστής Θερμοπερατότητας (W/m ² K)
	Βόρειος	Νότιος	Ανατολικός	Δυτικός	
Εξωτερικός τοίχος	169	133	133	133	0,414
Θύρες	6	0	0	0	4,1
Παράθυρα	23	23	23	23	3,7
Δάπεδο	448				0,215
Στέγη	40,1	40,1	4,1	40,1	0,174

Το έδαφος της περιοχής είναι αργιλικό και ο υπόγειος υδροφόρος ορίζοντας έχει μέσο βάθος 60m. Για την πραγματοποίηση των υπολογισμών και με δεδομένο ακόρεστο αργιλικό έδαφος, λαμβάνεται η αγωγιμότητα ίση με $1,3 \text{ W/(m K)}$, η διαχυτότητα του ίση με $6.45 \cdot 10^{-9}$, η πυκνότητα του ίση με 2100 kg/m^3 και η θερμοχωρητικότητα του ίση με 0.96 kJ/(kg K) [7].

3.2. Κατάστρωση της αντικειμενικής συνάρτησης

Η ελαχιστοποίηση του κόστους του συνδυασμού Γ.Α.Θ. και συμβατικών συστημάτων θέρμανσης ψύξης αποτελεί πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού [8]. Για την επίλυσή του απαιτείται η κατάστρωση της αντικειμενικής συνάρτησης, η οποία αποτελεί μια συνάρτηση κόστους που περιλαμβάνει την ετήσια απόσβεση του συνολικού κόστους του συστήματος της Γ.Α.Θ. και το κόστους των συστημάτων που θα παραλαμβάνουν το φορτίο αιχμής, καθώς και το κόστος λειτουργίας του κτιρίου κατά την περίοδο θέρμανσης και ψύξης.



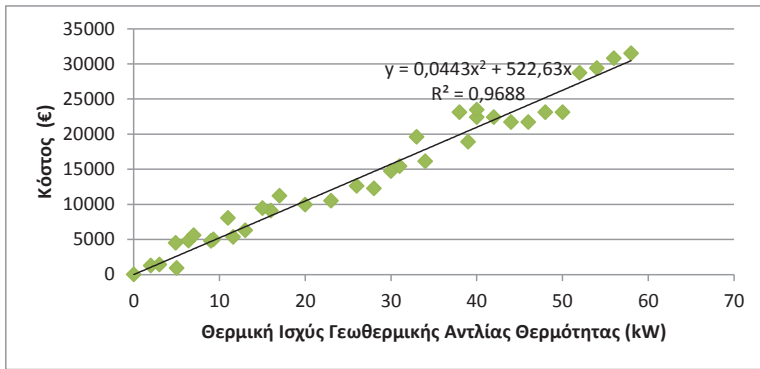
Εικόνα 3: Διάγραμμα ροής διαδικασίας βελτιστοποίησης

Το κόστος του γεωεναλλάκτη περιλαμβάνει την μεταφορά και εγκατάσταση του γεωτρύπανου, τη διάνοιξη γεωτρήσεων σε βάθος 65m, την προμήθεια των σωληνώσεων, την εισαγωγή της τυποποιημένης σωλήνωσης βρόγχου (U-tube), την πλήρωση με ειδικό ένεμα και την επίχωση των άκρων της κεφαλής με άμμο 80cm κάτω από τη στάθμη του εδάφους. Η εξίσωση κόστους των παραπάνω που θα χρησιμοποιηθεί είναι:

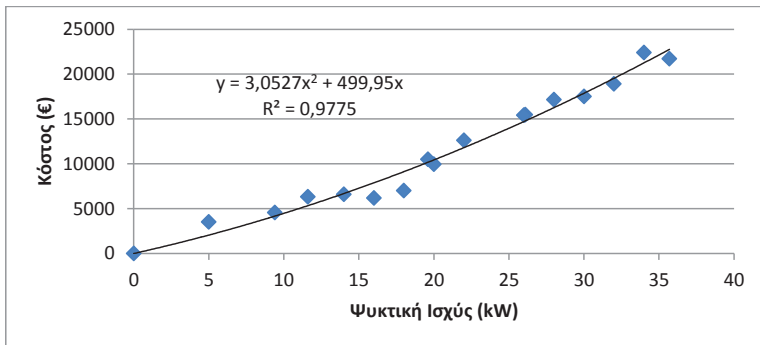
$$K_1 = 30 \times L_c \quad (5)$$

όπου L_c το απαιτούμενο μήκος του γεωθερμικού εναλλάκτη. Ο συντελεστής της εξίσωσης (5) προέκυψε από τις τιμές που δίνει το ελληνικό δημόσιο κατά τις δημοπρασίες αντίστοιχων έργων κατά τα έτη 2013-2014, υπολογίζοντας το ποσοστό έκπτωσης του εργολάβου στο 45% με βάση στοιχεία δημοπρασιών.

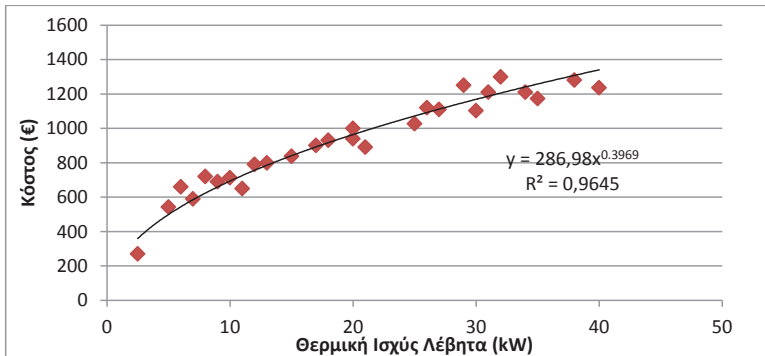
Για τον καθορισμό της εξίσωσης περιγραφής του κόστους των εναλλακτικών Η/Μ συστημάτων συναρτήσε της ισχύος τους, συγκεντρώθηκαν δεδομένα από την ελληνική αγορά για διάφορους τύπους συσκευών και χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των ελάχιστων τετραγώνων.



Εικόνα 4: Σχέση θερμικής ισχύος και κόστους Γ.Α.Θ.



Εικόνα 5: Σχέση ψυκτικής ισχύος συναρτήσει του κόστους για την ψυκτική μονάδα.



Εικόνα 6: Σχέση θερμικής ισχύος συναρτήσει του κόστους για λέβητα.

Το ετήσιο κόστος λειτουργίας προκύπτει από την εξίσωση:

$$K_{\text{λειτ}} = Q_{\text{ΗΓΑΘ}} K_{\eta\lambda} + Q_{\text{Ηλέβητα}} K_{\text{πετρ.}} + Q_{\text{CΨΜ}} K_{\eta\lambda} + Q_{\text{CΓΑΘ}} K_{\eta\lambda} \quad (6)$$

όπου $Q_{\text{ΗΓΑΘ}}$ οι καταναλώσεις ηλεκτρικού ρεύματος της Γ.Α.Θ. για την κάλυψη των αναγκών θέρμανσης σε kWh, $Q_{\text{Ηλέβητα}}$ οι καταναλώσεις πετρελαίου του λέβητα για την κάλυψη των αναγκών θέρμανσης σε λίτρα, $Q_{\text{CΓΑΘ}}$ οι καταναλώσεις ηλεκτρικού ρεύματος της Γ.Α.Θ. για την κάλυψη των αναγκών ψύξης σε kWh, $Q_{\text{CΨΜ}}$ οι καταναλώσεις ηλεκτρικού ρεύματος της

ψυκτικής μονάδας για την κάλυψη των αναγκών ψύξης σε kWh, $K_{ηλ}$ η τρέχουσα τιμή της kWh και $K_{πετρ}$ η τρέχουσα τιμή του λίτρου πετρελαίου.

Για την πραγματοποίηση της βελτιστοποίησης γίνεται αναγωγή των τιμών σε ετήσια μεγέθη. Η αναγωγή γίνεται με την χρήση της εξίσωσης ανατοκισμού:

$$R = [(P (1+P)^N) / ((1+P)^N - 1)] (K_{ΓΑΘ} + K_{λ\epsilon\beta\eta\tau\alpha} + K_{\Psi M} + K_1) \quad (7)$$

όπου P το ετήσιο επιτόκιο (%), R το σταθερό ύψος αποπληρωμής της δόσης του δανείου, N η εξόφληση σε έτη, $K_{ΓΑΘ}$ το κόστος αγοράς της ΓΑΘ, $K_{λ\epsilon\beta\eta\tau\alpha}$ το κόστος αγοράς του λέβητα πετρελαίου και $K_{\Psi M}$ το κόστος αγοράς της ψυκτικής μονάδας. Το άθροισμα όλων των K καθορίζει το ύψος του δανείου που θα ληφθεί.

Ο έλεγχος της βιωσιμότητας της επένδυσης θα γίνει με την μέθοδο της καθαρής παρούσας αξίας. Ο τύπος για τον υπολογισμό της είναι ο εξής:

$$NPV = -C_{in} \sum_{t=1}^N \frac{F_t}{(1+d)^t} + \frac{SV_N}{(1+d)^N} \quad (8)$$

όπου C_{in} η αρχική επένδυση, F_t το ετήσιο καθαρός όφελος, N ο οικονομικός κύκλος ζωής της επένδυσης, d το επιτόκιο αναγωγής σε παρούσα αξία και SV_N η απομένουσα αξία στο τέλος του N.

Οι ενεργειακές απαιτήσεις και τα στοιχεία λειτουργίας των συσκευών, που χρησιμοποιήθηκαν στη διαδικασία βελτιστοποίησης, συνοψίζονται στον Πίνακα 2.

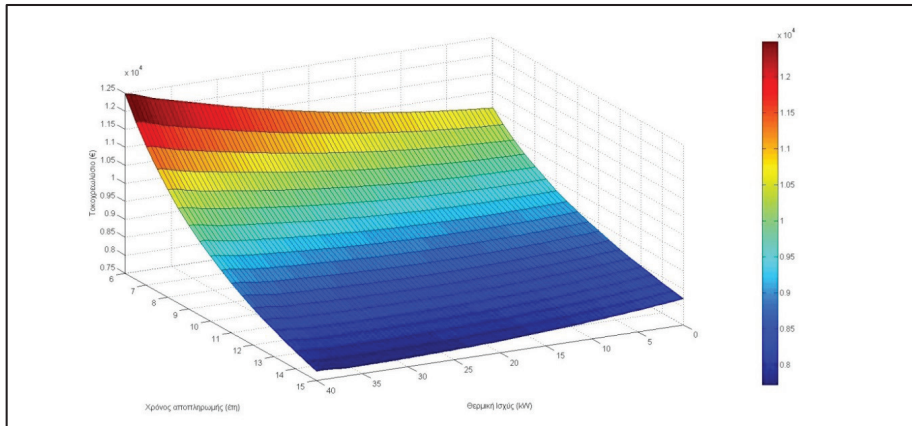
Πίνακας 2: Ενεργειακές απαιτήσεις και στοιχεία λειτουργίας συσκευών		
	Θέρμανση	Ψύξη
Αιχμή φορτίου (kW)	40	36
Ενεργειακή απαίτηση (kWh/m ²)	67,92	58,15
Τιμή καυσίμου [(€/L)-(€/kWh)]	1,283	0,18
C.O.P.- Γ.Α.Θ.	3.60	4.40
C.O.P.-Συστημάτων φορτίου αιχμής	0.93	2.14

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Σύμφωνα με στοιχεία κατασκευαστών, ο οικονομικός χρόνος ζωής της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας είναι ίσος με 15 έτη, ενώ του γεωθερμικού εναλλάκτη είναι πολύ μεγαλύτερος. Συνεπώς κατά την κατάσταση της εξίσωσης του ελάχιστου κόστους το χρονικό όριο αποπληρωμής του αρχικού απαιτούμενου ποσού δεν μπορεί να υπερβαίνει τα 15 χρόνια.

Με την διαδικασία βελτιστοποίησης που περιγράφηκε στην Εικόνα 3 και τον συνδυασμό των μοντέλων του RETScreen4 και του TEE-KENAK, για τον υπολογισμό των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας προέκυψαν τα στοιχεία του Πίνακα 3 για τις ενεργειακές απαιτήσεις και τα απαιτούμενα φορτία θέρμανσης και ψύξης για το κτίριο της μελέτης.

Όπως γίνεται φανερό από την Εικόνα 7, αλλά και τον Πίνακα 3, στην περίπτωση που η αποπληρωμή του αρχικού κεφαλαίου δανεισμού πραγματοποιηθεί νωρίτερα από τα 8 έτη, η βέλτιστη περίπτωση δεν περιλαμβάνει την εγκατάσταση Γ.Α.Θ. Τα ετήσια κόστη προκύπτουν από το άθροισμα της δόσης αποπληρωμής του δανείου για κάθε έτος και του ετήσιου κόστους λειτουργίας για θέρμανση και ψύξη. Λόγω της μορφής του τύπου (7), όσο αυξάνεται ο χρόνος αποπληρωμής μειώνεται η ετήσια δόση. Συνεπώς το ετήσιο κόστος για τα έτη αποπληρωμής 6, 7, 7.5 και 8 μειώνεται, αφού μειώνεται η ετήσια δόση και το κόστος λειτουργίας για την κάλυψη των αναγκών θέρμανσης και ψύξης παραμένει σταθερό.

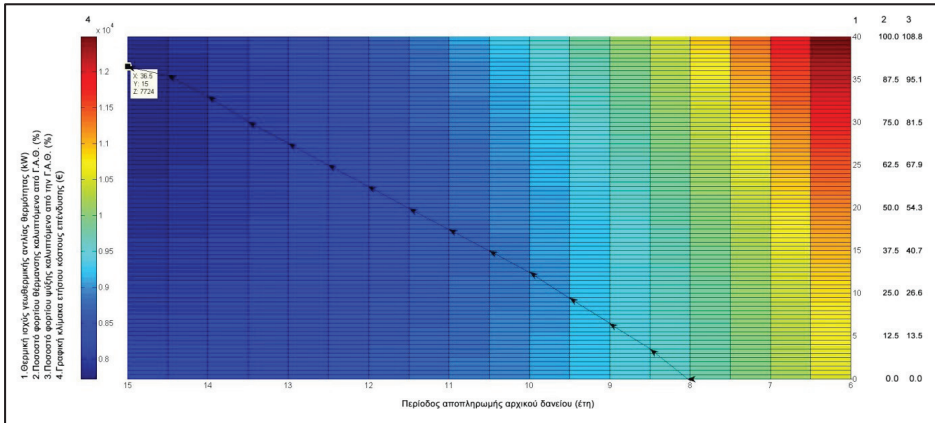


Εικόνα 7: Επιφάνεια προσδιορισμού ελάχιστου ετήσιου κόστους συνάρτηση της θερμικής ισχύος της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας και του χρόνου αποπληρωμής

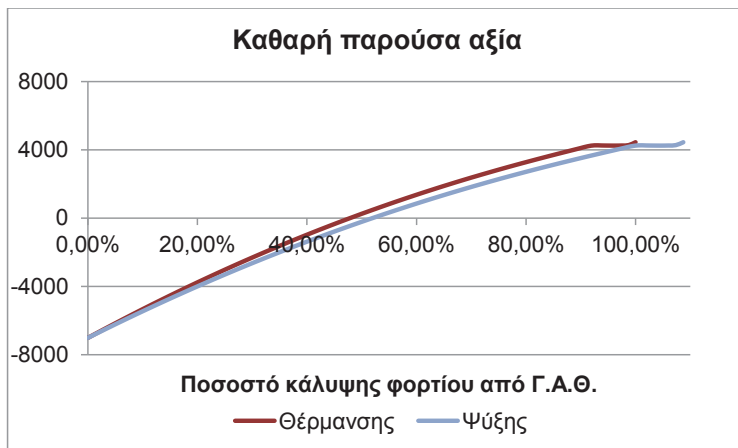
Πίνακας 3: Βέλτιστη ισχύς ανά σύστημα και έτος αποπληρωμής αρχικού δανείου

Αποπληρωμή (έτη)	Ισχύς της Γ.Α.Θ.		Ισχύς των συμβατικών συστημάτων		Ετήσιο κόστος =R+K _{ΛΕΙΤ} (€)
	Θερμική (kW)	Ψυκτική (kW)	Θερμική (kW)	Ψυκτική (kW)	
6.0	0.0	0.0	40.0	36.0	10545
7.0	0.0	0.0	40.0	36.0	9983
7.5	0.0	0.0	40.0	36.0	9759
8.0	0.0	0.0	40.0	36.0	9563
8.5	4.0	3.9	36.0	32.1	9383
9.0	6.5	6.3	33.5	29.7	9215
9.5	9.5	9.3	30.5	26.7	9055
10.0	12.5	12.0	27.5	24.0	8905
10.5	15.0	14.6	25.0	21.4	8762
11.0	17.5	17.1	22.5	18.9	8626
11.5	20.0	19.6	20.0	16.5	8496
12.0	22.5	22.0	17.5	14.0	8373
12.5	25.0	24.4	15.0	11.6	8254
13.0	27.5	26.9	12.5	9.1	8141
13.5	30.0	29.3	10.0	6.7	8032
14.0	33.0	32.3	7.0	3.7	7926
14.5	35.5	34.7	4.5	1.3	7823
15.0	36.5	36.0	3.5	0.0	7725

Ο βέλτιστος συνδυασμός εξαρτάται από τον χρόνο αποπληρωμής και το επιτόκιο δανεισμού. Συνεπώς ουσιαστικός παράγοντας για την επιλογή αποτελεί ο σχετικά ασφαλής καθορισμός του χρονικού ορίζοντα αποπληρωμής του αρχικού ποσού επένδυσης. Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν θεωρώντας επιτόκιο δανεισμού 7%.



Εικόνα 8: Ελάχιστο κόστος ανά περίοδο αποπληρωμής. Η γραμμή με τα βέλη υποδεικνύει τον βέλτιστο συνδυασμό ανά περίπτωση με τα αντίστοιχα ποσοστά κάλυψης του φορτίου θέρμανσης και ψύξης από την Γ.Α.Θ.



Εικόνα 9: Έλεγχος της οικονομικής βιωσιμότητας της επένδυσης με την χρήση της μεθόδου καθαρής παρούσας αξίας (ΚΠΑ)

5. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όπως προκύπτει από τους υπολογισμούς που παρουσιάστηκαν, το κόστος της επένδυσης, που γενικά προκύπτει από το άθροισμα των K_1 , $K_{ΓΑΘ}$, $K_{\lambda\epsilon\beta\eta\tau\alpha}$, $K_{\psi\mu}$, για πλήρη κάλυψη του φορτίου θέρμανσης και ψύξης με Γ.Α.Θ. φθάνει τα 47200 €, είναι δηλαδή πολύ ψηλό. Στην περίπτωση όμως που υπάρχει συνδυασμός αβαθούς γεωθερμίας για την κάλυψη του φορτίου βάσης και συμβατικών συστημάτων θέρμανσης ψύξης για το φορτίο αιχμής το κόστος μειώνεται αισθητά.

Από την Εικόνα 8 φαίνεται πως για περίοδο αποπληρωμής μικρότερη των 8 ετών, η πιο συμφέρουσα λύση είναι η κάλυψη του συνόλου των αναγκών θέρμανσης και ψύξης από συμβατικά συστήματα. Όσο όμως αυξάνεται περαιτέρω η περίοδος αποπληρωμής, αυξάνεται σταδιακά η συμβολή της Γ.Α.Θ. στον εκάστοτε βέλτιστο συνδυασμό. Έτσι με την συμπλήρωση του οικονομικού κύκλου ζωής της Γ.Α.Θ, δηλαδή στα 15 έτη, προκύπτει το απολύτως ελάχιστο ετήσιο κόστος, για κάλυψη του 90% των αναγκών θέρμανσης από την Γ.Α.Θ με το υπόλοιπο 10% να καλύπτεται από έναν λέβητα πετρελαίου μικρής ισχύος και πλήρη κάλυψη των αναγκών ψύξης από την Γ.Α.Θ.

Συσχετίζοντας όμως τα αποτελέσματα της Εικόνας 8 με το διάγραμμα της Εικόνας 9, συμπεραίνεται πως στην συγκεκριμένη περίπτωση για να αποτελέσει η εγκατάσταση κατακόρυφου συστήματος αβαθούς γεωθερμίας οικονομικά βιώσιμη επιλογή πρέπει να καλύπτει τουλάχιστον το 50% της απαιτούμενης ισχύος για θέρμανση και ψύξη. Αυτό συμβαίνει όταν η περίοδος αποπληρωμής ξεπερνά τα 11.5 έτη που αποτελεί μια ανεκτή τιμή.

Σημειώνουμε ακόμη ότι από τους επιμέρους παράγοντες κόστους για την εγκατάσταση των Γ.Α.Θ. σε υφιστάμενες κατασκευές ο κυριότερος είναι η ανόρυξη των γεωτρήσεων. Στην περίπτωση όμως που η εφαρμογή πραγματοποιηθεί κατά την ανέγερση της κατασκευής, το κόστος μειώνεται δραστικά.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η τεχνολογία της αβαθούς γεωθερμίας έχει μεγάλες προοπτικές ανάπτυξης ειδικά σε κτίρια του τριτογενή τομέα στην βόρεια Ελλάδα, όπου υπάρχουν τόσο απαιτήσεις θέρμανσης όσο και απαιτήσεις ψύξης. Επιπροσθέτως μάλιστα θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν ότι με τη χρήση Γ.Α.Θ. αξιοποιείται μια τοπική ενεργειακή πηγή και ότι υπάρχει περιβαλλοντικό όφελος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] ASHRAE, 1993, "Handbook of Fundamentals, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning", Inc., Atlanta, USA.
- [2] Παπακώστας, Κ.Τ., , 2001, «Συμβολή στην εκτίμηση της κατανάλωσης ενέργειας σε συστήματα θέρμανσης και κλιματισμού στην Ελλάδα με τη χρήση μεθόδων απλής και πολλαπλής μέτρησης», Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη.
- [3] Knebel, D. and Silver, S., 1983, "Simplified Energy Analysis Using the Modified Bin Method", ASHRAE, Atlanta.
- [4] IGSHPA, 1988, "Closed-Loop/Ground-Source Heat Pump Systems – Installation Guide", International Ground-source Heat Pump Association, Oklahoma State University, Stillwater, Oklahoma, USA.
- [5] Yang, H., Cui, P., and Fang, Z., 2010, "Vertical-borehole Ground-coupled Heat Pumps: A Review of Models and Systems", Applied Energy, 87, pp. 16-27.
- [6] Ruan, W., and Horton, W.T., 2010, "Literature Review on the Calculation of Vertical Ground Heat Exchangers for Geothermal Heat Pump Systems", International High Performance Building Conference, Purdue, U.S.A.
- [7] McRae, S.G., 1988, "Practical soil study: Studying Soils in the Field", Halstead Press, New York, NY, USA, 1988.
- [8] Paly, M., Mendez, J.H., Beck, M., Blum, P., Zell, A., and Bayer, P., 2012, "Optimization of energy extraction for closed shallow geothermal systems using lineal programming", Geothermics, pp. 57-65.

ΤHERMOMAP - ΕΝΑ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΕΡΓΟ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗΣ ΤΟΥ ΠΟΛΥ ΡΗΧΟΥ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ

Α. Αρβανίτης^{1*}, Δ. Κανάρης¹, Π. Κρασάκης², Μ. Στεφούλη¹

¹ Εθνικό Κέντρο Βιώσιμης και Αειφόρου Ανάπτυξης (Ε.Κ.Β.Α.Α.) -
Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών και Μελετών (Ι.Γ.Μ.Ε.Μ.),
Σπ. Λούη 1, Γ΄ Είσοδος, Ολυμπιακό Χωριό, 13677, Αχαρναί, Αττική,
e-mail: arvanitis@igme.gr

² Γεωλόγος - Γεωπεριβαλλοντολόγος, Παλλήνη, Αττική

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το Έργο “ThermoMap”, με πλήρη τίτλο “Area mapping of superficial geothermic resources by soil and groundwater data”, ήταν ένα καινοτόμο συγχρηματοδοτούμενο Ευρωπαϊκό Έργο, που εστίασε το ενδιαφέρον του στη χαρτογράφηση της πολύ ρηχής (αβαθούς) γεωθερμικής ενέργειας στην Ευρώπη, στα πρώτα 10 m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Στόχος του ήταν η προώθηση ενός περιβάλλοντος πληροφόρησης για την ανάπτυξη γεωθερμικών συστημάτων μικρού βάθους στην Ευρώπη. Στα πλαίσια του “ThermoMap” συνδυάστηκαν και αναλύθηκαν τα ήδη υπάρχοντα δεδομένα (γεωλογικά, κλιματικά, τοπογραφικά, εδαφολογικά, υδρογεωλογικά κλπ) προκειμένου να υπολογισθεί μια τιμή γεωθερμικού δυναμικού, δηλ. μιας τιμής θερμικής αγωγιμότητας ή/και θερμοχωρητικότητας των εδαφικών σχηματισμών για πολύ μικρά βάθη (0-10 m), σε μεγάλη και μεσαία κλίμακα. Η ανάλυση των γεω-δεδομένων πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον G.I.S, με τυποποιημένες μεθόδους, που ίσχυαν και για τους 12 εταίρους από τις 9 Ευρωπαϊκές χώρες, που συμμετείχαν στο Έργο. Η χρήση των υπαρχουσών γεω-επιστημονικών πληροφοριών και η σύνδεσή τους με σύστημα G.I.S. συντελεί στην εύρεση περιοχών, ευνοϊκών για την αξιοποίηση της αβαθούς γεωθερμίας με την εγκατάσταση συστημάτων Γεωθερμικών Αντλιών Θερμότητας (ΓΑΘ), σε σύντομο χρόνο, με χαμηλό κόστος και αξιόπιστο σχεδιασμό. Με τη βοήθεια ενός διαδραστικού εργαλείου πληροφόρησης, που τρέχει σε εφαρμογή WebGIS, ο κάθε χρήστης (εταιρίες, κρατικές αρχές, επιχειρήσεις, μελετητές, ακαδημαϊκά ιδρύματα, ιδιώτες κλπ) μπορεί να ελέγχει το εκτιμώμενο ρηχό γεωθερμικό δυναμικό στην περιοχή ενδιαφέροντος και οι ειδικοί, λαμβάνοντας αυτές τις πληροφορίες, μπορούν να σχεδιάζουν καλύτερα τα συστήματα ΓΑΘ. Σε επίπεδο χώρας που συμμετείχε στο Έργο αλλά και σε πανευρωπαϊκό επίπεδο, η θερμική παράμετρος που υπολογίζεται προσεγγιστικά για κάθε επιλεγμένο σημείο είναι η θερμική αγωγιμότητα του εδάφους. Όμως, εκτός απ’ αυτήν την προσεγγιστική εκτίμηση σε κλίμακα 1:250.000, για τις χώρες που συμμετείχαν στο “ThermoMap” επελέγησαν και περιοχές δοκιμής για συστηματικότερη μελέτη και καλύτερη εκτίμηση της θερμικής αγωγιμότητας και θερμοχωρητικότητας των εδαφικών σχηματισμών μέχρι βάθος 10 m. Για την Ελλάδα, ως περιοχή δοκιμής επελέγη η περιοχή της Καλαμάτας, για την οποία συγκεντρώθηκαν και αξιολογήθηκαν τα υπάρχοντα τοπογραφικά, κλιματικά, εδαφολογικά, γεωλογικά, υδρογεωλογικά κ.ά. δεδομένα, ενώ πραγματοποιήθηκαν δειγματοληψίες εδάφους και πρόσθετες επιβεβαιωτικές εργασίες υπαίθρου. Όλα τα στοιχεία, κατόπιν σχετικής επεξεργασίας, χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της θερμικής αγωγιμότητας και θερμοχωρητικότητας των εδαφικών σχηματισμών της περιοχής. Με την ολοκλήρωσή του, το Έργο “ThermoMap” έδωσε δύο βασικά εργαλεία εκτίμησης του πολύ ρηχού γεωθερμικού δυναμικού: (α) ένα διαδραστικό χάρτη (εφαρμογή WebGIS), που παρουσιάζει τις τιμές στην Ευρώπη, τόσο σε επίπεδο χώρας όσο και στις περιοχές δοκιμής, και με του οποίου τη βοήθεια ο κάθε χρήστης λαμβάνει άμεσα τη σχετική πληροφόρηση για κάθε επιλεγμένο σημείο, και (β) ένα εργαλείο υπολογισμού (calculator) για την εκτίμηση του δυναμικού σε οποιαδήποτε θέση με την εισαγωγή ειδικών δεδομένων για τη θέση αυτή.

Λέξεις Κλειδιά: αβαθής γεωθερμία, συστήματα γεωθερμικών αντλιών θερμότητας, γεωεναλλάκτης, θερμική αγωγιμότητα, εφαρμογή WebGIS

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το “ThermoMap”, με πλήρη τίτλο “Area mapping of superficial geothermic resources by soil and groundwater data” (δηλ. «Περιοχική χαρτογράφηση των ρηχών γεωθερμικών πόρων από δεδομένα εδάφους και υπόγειων νερών»), απετέλεσε ένα καινοτόμο συγχρηματοδοτούμενο Ευρωπαϊκό Έργο, που διήρκεσε από 1-9-2010 μέχρι 31-8-2013. Στο Έργο αυτό συμμετείχαν 12 εταίροι από 9 χώρες (Γερμανία, Αυστρία, Βέλγιο, Γαλλία, Ηνωμένο Βασίλειο, Ισλανδία, Ουγγαρία, Ρουμανία, Ελλάδα). Από ελληνικής πλευράς συμμετείχε το Ι.Γ.Μ.Ε. (σήμερα Ε.Κ.Β.Α.Α.-Ι.Γ.Μ.Ε.Μ.), ενώ συντονιστής του Έργου ήταν το Πανεπιστήμιο Friedrich-Alexander του Erlangen-Nürnberg (Γερμανία). Ο βασικός στόχος του “ThermoMap” ήταν η χαρτογράφηση του πολύ ρηχού γεωθερμικού δυναμικού στην Ευρώπη, όπως αυτό καθορίζεται από τη θερμική αγωγιμότητα του μη συνεκτικού εδάφους μέχρι μέγιστο βάθος 10 m [1, 2] και η προώθηση ενός περιβάλλοντος πληροφόρησης για την ανάπτυξη γεωθερμικών συστημάτων θερμικού βάθους. Η επίσημη ιστοσελίδα του Έργου είναι: <http://www.thermomap-project.eu/>.

2. ΟΙ ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΚΑΙ Ο ΡΟΛΟΣ ΤΟΥΣ ΣΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΑΝΤΛΙΩΝ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Οι θερμικές ιδιότητες των εδαφικών σχηματισμών, που παίζουν σημαντικό ρόλο στο σχεδιασμό και την απόδοση συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας κλειστού κυκλώματος, είναι: η θερμική αγωγιμότητα και η θερμοχωρητικότητα. Ως θερμική αγωγιμότητα (k) ορίζεται η ικανότητα του υλικού του εδάφους ή του μαλακού πετρώματος να μεταφέρει θερμότητα με αγωγή (μονάδα μέτρησης $W/m.K$) [3, 4]. Η θερμοχωρητικότητα ορίζεται ως το γινόμενο της ειδικής θερμότητας και του φαινομένου βάρους και αντιπροσωπεύει την ικανότητα συγκεκριμένου όγκου υλικού του εδάφους και μαλακού πετρώματος να αποθηκεύει εσωτερική ενέργεια (μονάδα μέτρησης $MJ/m^3.K$).

Η θερμική αγωγιμότητα αποτελεί βασική παράμετρο στο σχεδιασμό έργων, όπου λαμβάνουν χώρα φαινόμενα μετάδοσης θερμότητας, όπως είναι οι γεωεναλλάκτες των συστημάτων Γεωθερμικών Αντλιών Θερμότητας (ΓΑΘ) κλειστού κυκλώματος. Η θερμοκρασία του υπεδάφους, όπου είναι τοποθετημένος ο γεωεναλλάκτης, μεταβάλλεται περιοδικά κατά την ετήσια λειτουργία του συστήματος ανάλογα με: (α) τη θερμότητα που απορροφάται από το κτίριο ή αποδίδεται στο κτίριο ανάλογα με τις ενεργειακές του ανάγκες και την ισχύ της ΓΑΘ και (β) την ικανότητα του τμήματος του υπεδάφους, όπου βρίσκεται ο γεωεναλλάκτης, να ανακτά θερμότητα από τον περιβάλλοντα χώρο ή να απορρίπτει θερμότητα στον περιβάλλοντα χώρο και αυτή η ικανότητα εξαρτάται από τη θερμική αγωγιμότητα του εδαφικού σχηματισμού και τον όγκο που καταλαμβάνει ο γεωεναλλάκτης στο υπέδαφος. Με τη ΓΑΘ θερμική ενέργεια απορροφάται από το υπέδαφος ή αποθηκεύεται στο υπέδαφος, ενώ η θερμική αγωγιμότητα του υπεδάφους εκφράζει την ικανότητα αναπλήρωσης αυτού του ποσού από το υπέδαφος «αποθήκευσης» και τον περιβάλλοντα χώρο. Κατά το σχεδιασμό ενός συστήματος αβαθούς γεωθερμίας κλειστού βρόχου, θα πρέπει να διασφαλίζεται η απρόσκοπτη απορρόφηση/αποθήκευση θερμότητας από/στο υπέδαφος και να εξασφαλίζονται θερμοκρασίες εξόδου του ρευστού από το γεωεναλλάκτη για την οικονομική και αποδοτική λειτουργία της ΓΑΘ. Είναι φανερό ότι η θερμική αγωγιμότητα του υπεδάφους επιδρά σημαντικά στην απόδοση και τη λειτουργία ενός συστήματος ΓΑΘ [3].

Όταν η θερμική αγωγιμότητα του υπεδάφους είναι υψηλή, τότε: (α) Διευκολύνεται η απορρόφηση θερμότητας από το υπέδαφος στο γεωεναλλάκτη ή η αποθήκευση θερμότητας από το γεωεναλλάκτη προς το υπέδαφος και η αναπλήρωση ή απόρριψη αυτής της θερμότητας στον περιβάλλοντα χώρο του υπεδάφους αποθήκευσης, με αποτέλεσμα τη μικρότερη θερμοκρασιακή διαταραχή και τη σταθερότερη λειτουργία όλου του συστήματος. (β) Η θερμοκρασία εξόδου του ρευστού από το γεωεναλλάκτη είναι υψηλότερη κατά την περίοδο θέρμανσης και χαμηλότερη κατά την περίοδο της ψύξης, με αποτέλεσμα τη βελτίωση του συντελεστή απόδοσης της ΓΑΘ και τη μικρότερη ενεργειακή κατανάλωση του συστήματος. Όταν η θερμική αγωγιμότητα του υπεδάφους είναι χαμηλή, τότε συσσωρεύεται θερμική

ενέργεια στο υπέδαφος και αυξάνεται η θερμοκρασία του υπεδάφους, με αρνητικές συνέπειες κατά τη λειτουργία ψύξης του συστήματος [3, 5]. Πολλές παράμετροι του εδάφους, όπως η κοκκομετρία, η ορυκτολογική σύσταση, η θερμοκρασία, η ξηρή και υγρή πυκνότητα, η υγρασία, ο κορεσμός σε νερό, το πορώδες, η κατ' όγκον περιεκτικότητα αέρα, το μοναδιαίο ειδικό βάρος των κόκκων, επηρεάζουν τη θερμική αγωγιμότητα [3, 4].

Η γνώση της θερμικής αγωγιμότητας των εδαφικών σχηματισμών παίζει καθοριστικό ρόλο στη διαστασιολόγηση των γεωεναλλακτών. Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμική αγωγιμότητα του υπεδάφους τόσο διευκολύνεται η μετάδοση θερμότητας σ' αυτό και συνεπώς απαιτείται μικρότερο μήκος γεωεναλλάκτη για την αποδοτική λειτουργία του συστήματος. Η ορθή διαστασιολόγηση του μήκους του γεωεναλλάκτη εξασφαλίζει θερμοκρασιακή σταθερότητα του υπεδάφους κατά τη μακροχρόνια λειτουργία του συστήματος και έτσι αποφεύγονται αστοχίες και χαμηλή ενεργειακή απόδοση. Πιθανές παραδοχές της τιμής της θερμικής αγωγιμότητας μπορεί να οδηγήσουν σε υπερδιαστασιολόγηση ή υποδιαστασιολόγηση του γεωεναλλάκτη με αρνητικές συνέπειες (αύξηση κόστους, μειωμένη ενεργειακή απόδοση και λειτουργία αντίστοιχα). Συνεπώς, το ζητούμενο είναι ο όσο το δυνατόν ακριβέστερος προσδιορισμός της θερμικής αγωγιμότητας του υπεδάφους. Η θερμική αγωγιμότητα μπορεί να προσδιορισθεί με τους ακόλουθους τρόπους: (α) εργαστηριακή μέτρηση δειγμάτων, (β) δοκιμή θερμικής απόκρισης (TRT), (γ) εφαρμογή θεωρητικών μοντέλων με τη χρήση μαθηματικών τύπων, που συνδέουν διάφορες μετρήσιμες φυσικές υπεδαφικές παραμέτρους με τη θερμική αγωγιμότητα και (δ) εφαρμογή ημι-εμπειρικών εξισώσεων μέσω άλλων γνωστών μετρήσιμων φυσικών παραμέτρων (κοκκομετρία, υγρασία, πυκνότητα, κορεσμός κ.ά.) [3, 4].

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ THERMOMAP

Στα πλαίσια του “ThermoMap” συλλέχθηκαν, εναρμονίσθηκαν, αναλύθηκαν, υπέστησαν επεξεργασία και οπτικοποιήθηκαν υπάρχοντα δεδομένα (εδαφολογικά, γεωλογικά, υδρογεωλογικά, κλιματικά, μορφολογικά, τοπογραφικά, χρήσεων γης κλπ), σε περιβάλλον GIS και με υποπονημένες μεθόδους, προκειμένου να υπολογισθεί μια τιμή για το πολύ Ρηχό Γεωθερμικό Δυναμικό (very Shallow Geothermal Potential, vSGP). Τα δεδομένα εισήχθησαν με μορφή θεματικών επιπέδων (layers), στα οποία συνδέθηκαν πίνακες με συγκεκριμένες πληροφορίες και προϋπολογισμένες τιμές, και μετά από κατάλληλη γεω-επεξεργασία (geoprocessing) προέκυψε ο υπολογισμός του πολύ ρηχού γεωθερμικού δυναμικού. Η βασική ιδιότητα που υπολογίσθηκε ήταν η θερμική αγωγιμότητα των εδαφικών σχηματισμών, ενώ δόθηκε η δυνατότητα εκτίμησης και της θερμοχωρητικότητας. Τα δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή εφαρμογής WebGIS ανοιχτού κώδικα, μέσω της οποίας ο κάθε χρήστης (εταιρίες, κρατικές αρχές, επιχειρήσεις, μελετητές, ακαδημαϊκά ιδρύματα, ιδιώτες κ.ά.) μπορεί να λαμβάνει πληροφορίες για το εκτιμώμενο ρηχό γεωθερμικό δυναμικό σε κάποια θέση που τον ενδιαφέρει. Τέλος, το έργο περιελάμβανε δειγματοληψίες εδάφους και μετρήσεις, προκειμένου να διαπιστωθεί η ακρίβεια και η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.

Στα πλαίσια του “ThermoMap”, έγινε υπολογισμός του πολύ ρηχού γεωθερμικού δυναμικού (vSGP) σε: (α) πανευρωπαϊκό επίπεδο και επίπεδο χώρας με την κατασκευή ενός Ευρωπαϊκού Χάρτη Περιγράμματος (European Outline Map, EOM), κλίμακας 1:250.000, παρέχοντας μια πρόχειρη εκτίμηση, και (β) τοπικό επίπεδο, σε συγκεκριμένες Περιοχές Δοκιμής (Test Areas), που επιλέχθηκαν από τους εταίρους για κάθε μια από τις 9 χώρες, για συστηματικότερη μελέτη και ακριβέστερη εκτίμηση σε 3 διαφορετικά στρώματα μέχρι το βάθος των 10 m (0-3, 3-6 και 6-10 m). Και στις δύο περιπτώσεις, πριν τον υπολογισμό του δυναμικού, ελήφθησαν υπόψη μερικοί περιοριστικοί παράγοντες, όπως νομικοί περιορισμοί (προστατευόμενες περιοχές), τοπογραφία και κλιματικές συνθήκες [2].

3.1. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΣΤΙΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

Για κάθε χώρα που συμμετείχε στο “ThermoMap”, επελέγη μια τουλάχιστον περιοχή δοκιμής (test area), σε κλίμακες από 1:5.000 μέχρι 1:40.000 [2]. Για την Ελλάδα, ως περιοχή δοκιμής προτάθηκε η ευρύτερη περιοχή πόλεως Καλαμάτας.

Για κάθε περιοχή δοκιμής αρχικά ελήφθησαν υπόψη μια σειρά παραμέτρων, όπως νομικοί περιορισμοί, τοπογραφία και κλιματικές συνθήκες. Οι νομικοί περιορισμοί περιελάμβαναν τις προστατευόμενες περιοχές, όπως ζώνες Natura 2000, εθνικά και φυσικά πάρκα, περιοχές πλημμυρών κλπ. Οι τοπογραφικές παράμετροι περιελάμβαναν το ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων (Digital Elevation Model, DEM) και τις κλίσεις που προκύπτουν από αυτό. Έγινε διάκριση των κλίσεων σε 4 τάξεις (0-5°, 5-10°, 10-15° και >15°) και αποκλείστηκαν περιοχές με κλίσεις >15°. Ο χάρτης κατανομής των κλίσεων εισήχθη ως θεματικό επίπεδο δεδομένων (layer), από το οποίο έγινε αφαίρεση των υδάτινων σωμάτων. Οι κλιματικές παράμετροι που υπεισέλθαν, ως θεματικά επίπεδα, ήταν η θερμοκρασία (μέση ετήσια τιμή, σε °C) και το ύψος των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων (μέση ετήσια τιμή, σε mm) με βάση στοιχεία άνω των 30 ετών. Από αυτές τις παραμέτρους υπολογίστηκε ο «δείκτης υγρασίας» (humidity index) με βάση τους τύπους κατά Schreiber (1973) [6]. Ο δείκτης αυτός αντικατοπτρίζει 5 κατηγορίες κλιματικών συνθηκών (ξηρές, ημίξηρες, ύφυγες, υγρές, υπέρυγες) που επηρεάζουν την υγρασία του μη συνεκτικού υπεδάφους και συνεπώς και τις θερμικές του ιδιότητες και γι' αυτό ελήφθη υπόψη στον υπολογισμό της θερμικής αγωγιμότητας και θερμοχωρητικότητας. Επίσης, για κάθε περιοχή δοκιμής ελήφθησαν υπόψη οι γεωλογικές συνθήκες εισάγοντας ξεχωριστό θεματικό επίπεδο (layer) με τα πολύγωνα των γεωλογικών σχηματισμών ψηφιοποιημένων γεωλογικών χαρτών.

Στις περιοχές δοκιμής, το βάθος υπολογισμού του πολύ ρηχού γεωθερμικού δυναμικού έφτανε τα 10 m, με την προϋπόθεση ότι αυτό δεν περιοριζόταν από την παρουσία σκληρού πετρώματος (ως «σκληρό πέτρωμα» χαρακτηρίστηκε ένα καθόλου ή ελαφρώς αποσπασμένο πέτρωμα που δεν ευνοεί την εγκατάσταση γεωεναλλάκτη για τεχνικούς και οικονομικούς λόγους εξαιτίας δυσκολίας εκσκαφής). Αυτό το μέγιστο βάθος των 10 m διαιρέθηκε σε 3 επιμέρους στρώματα: 0-3, 3-6 και 6-10 m και για κάθε ένα από αυτά έγινε υπολογισμός της θερμικής αγωγιμότητας και θερμοχωρητικότητας, λαμβάνοντας υπόψη μια σειρά υδρογεωλογικών και εδαφολογικών παραμέτρων [2]. Επιπλέον, συλλέχθηκαν και αξιολογήθηκαν στοιχεία σχετικά με τη ζώνη μαλακού πετρώματος σε κάθε περιοχή δοκιμής.

Η γνώση του πάχους (βάθους από την επιφάνεια) της «ζώνης μαλακού πετρώματος» (soft rock zone) είναι σημαντική. Από ένα αρχικό βασικό πολύγωνο με πληροφορίες για το πάχος της ζώνης μαλακού πετρώματος δημιουργήθηκαν 3 επίπεδα πολυγώνων (για 0-3, 3-6, 6-10 m) και έμπαινε ένας δείκτης ανάλογα με το αν το συγκεκριμένο επίπεδο ήταν μέσα στη ζώνη αυτή ή όχι, δηλ. 0=όχι μαλακό πέτρωμα, 1=μαλακό πέτρωμα, 2=μερικώς μαλακό πέτρωμα.

Η υδρογεωλογική παράμετρος που ελήφθη υπόψη ήταν η στάθμη του υπόγειου νερού (υδροστατική στάθμη, σε m). Η γνώση της υδροστατικής στάθμης ήταν εξαιρετικά σημαντική για τον καθορισμό κορεσμένων / ακόρεστων ζωνών. Δημιουργήθηκαν 3 θεματικά επίπεδα (layers) κορεσμού (για 0-3, 3-6, 6-10 m) μετατρέποντας τις γραμμές της υδροστατικής στάθμης σε πολύγωνα. Αν η στάθμη ήταν τελείως κάτω από συγκεκριμένο στρώμα βάθους (π.χ. των 3-6 m) αυτό θεωρούνταν ως «ακόρεστο», ενώ αν η στάθμη έπεμνε το στρώμα βάθους ή βρισκόταν πάνω από αυτό τότε θεωρούνταν ως «κορεσμένο».

Οι εδαφολογικές παράμετροι ήταν ιδιαίτερα σημαντικές για την εκτίμηση του πολύ ρηχού γεωθερμικού δυναμικού. Οι δύο κύριες παράμετροι ήταν ο τύπος και η υφή του εδάφους. Ο τύπος του εδάφους προσδιορίστηκε με βάση την ταξινόμηση κατά WRB (World Reference Base for Soil Resources, 2006), που είναι το πιο κοινό σύστημα ταξινόμησης [7] και δημιουργήθηκε ένα θεματικό επίπεδο (layer) με τα πολύγωνα των διαφόρων τύπων. Η υφή του εδάφους, που βασίζεται στην κατανομή του μεγέθους των κόκκων (κοκκομετρία), είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας. Στα πλαίσια του "ThermoMap" χρησιμοποιήθηκε το τριγωνικό διάγραμμα-σύστημα ταξινόμησης USDA (United States Department of Agriculture), με βάση την ποσοστιαία συμμετοχή της άμμου, της ιλύος και της αργίλου, και στο οποίο υπάρχουν 12 τάξεις, που ομαδοποιούνται σε 4 κύριες ομάδες: άμμοι, ιλύες, αργίλοι και πηλοί. Με βάση το σύστημα ταξινόμησης USDA, προέκυψαν διαβαθμισμένα επίπεδα ακρίβειας των δεδομένων της υφής του εδάφους και αυτά τα ιεραρχικά επίπεδα, τα οποία εξαρτώνται κατά πολύ από την ποιότητα των σχετικών υπάρχοντων στοιχείων, διακρίνονται σε 4 βαθμίδες, από την υψηλότερη 1 έως τη χαμηλότερη 4 [2]. Η υφή του εδάφους (μέση κατανομή μεγέθους κόκ-

κων προσδιορίσθηκε και για τα 3 στρώματα βάθους (0-3, 3-6, 6-10 m) προκειμένου να υπολογισθούν οι τιμές της θερμικής αγωγιμότητας και θερμοχωρητικότητας σ' αυτά τα στρώματα με τη χρησιμοποίηση των τύπων κατά Kersten [8] και Dehner [9] αντίστοιχα. Για τους υπολογισμούς αυτούς δόθηκε μια τιμή φαινόμενου βάρους (ή φαινόμενης πυκνότητας, bulk density) για κάθε ένα από αυτά τα 3 στρώματα και συγκεκριμένα $1,3 \text{ g/cm}^3$ για το στρώμα βάθους 0-3 m, $1,5 \text{ g/cm}^3$ για το στρώμα 3-6 m και $1,8 \text{ g/cm}^3$ για το στρώμα 6-10 m, αντικατοπτρίζοντας το γεγονός ότι το έδαφος και το χαλαρό πέτρωμα γίνονται πιο συμπαγή με την αύξηση του βάθους [2]. Ένα σημαντικό βήμα μέσα στη διαδικασία υπολογισμού ήταν ο συνδυασμός της υφής (κοκκομετρικής σύστασης) με την αντίστοιχη τιμή φαινόμενου βάρους, που οδήγησε στον προσδιορισμό της κατανομής του μεγέθους των πόρων (pore size distribution). Μερικές σημαντικές παράμετροι του εδάφους προέρχονται από την κοκκομετρία, όπως η αεροϊκανότητα (air capacity, ac, δηλ. η ικανότητα του εδάφους να συγκρατεί ποσότητα αέρα), η υδατοϊκανότητα (field capacity, fc, δηλ. η μέγιστη περιεκτικότητα σε νερό που μπορεί να συγκρατήσει το έδαφος χωρίς να προκληθεί κίνηση του νερού λόγω βαρύτητας) και η περιεκτικότητα «νεκρού νερού» (dead water content, dwc, δηλ. το ποσοστό πόρων διαμέτρου $\leq 2 \mu\text{m}$ με νερό που δεν μπορεί να απορροφηθεί από τα φυτά), των οποίων τα ποσοστά εξαρτώνται από τις μεμονωμένες κατανομές του μεγέθους πόρων των διαφόρων τάξεων της υφής.

Από τη διατομή (intersecting) των 5 θεματικών επιπέδων (layers) των ενδιάμεσων αποτελεσμάτων - δηλ. κλίσης (με ζώνες προστασίας), υγρασίας (με θερμοκρασία), κορεσμού, ζώνης μαλακού πετρώματος και εδάφους (υφής κατά USDA και τύπου κατά WRB) - επί 3 φορές και συνδέοντας πίνακες προϋπολογισμένων τιμών θερμικής αγωγιμότητας για κάθε τάξη εδάφους κατά USDA και κάθε στρώμα βάθους (0-3, 3-6, 6-10 m) γίνεται επιλογή της σωστής τιμής λαμβάνοντας υπόψη το φαινόμενο βάρος, την υδρολογική κατάσταση του συστήματος (κορεσμένο/ακόρεστο, ξηρό/υγρό), την αεροϊκανότητα (ac) και τις συνθήκες εδαφικού νερού (fc, dwc) και έτσι προκύπτουν οι τιμές της θερμικής αγωγιμότητας. Με τις υπολογισμένες τιμές θερμικής αγωγιμότητας και θερμοχωρητικότητας για κάθε στρώμα βάθους (0-3, 3-6, 6-10 m) ολοκληρώνεται η διαδικασία εκτίμησης του πολύ ρηχού γεωθερμικού δυναμικού στις περιοχές δοκιμής.

Προκειμένου να επικυρωθούν οι υπολογισμένες τιμές από την εφαρμογή των ημιεμπειρικών εξισώσεων, να ελεγχθεί η αξιοπιστία τους αλλά και να βελτιωθεί η όλη μεθοδολογία, πραγματοποιήθηκαν δειγματοληψίες εδάφους από τις περιοχές δοκιμής. Στα δείγματα αυτά έγινε κοκκομετρική ανάλυση για τον προσδιορισμό της υφής καθώς και εργαστηριακή μέτρηση της θερμικής τους αγωγιμότητας, κάτω από διαφορετικές συνθήκες υγρασίας, στο Πανεπιστήμιο Friedrich-Alexander του Erlangen-Nürnberg (Γερμανία). Στις τιμές που μετρήθηκαν έγινε παρεμβολή (interpolation) σε παρόμοιες τιμές υγρασίας και φαινόμενου βάρους για λόγους συγκρισιμότητας με αυτές που υπολογίσθηκαν θεωρητικά. Γενικά, παρά τις αποκλίσεις, διαπιστώθηκε μια καλή συμφωνία μεταξύ των μετρημένων τιμών (με παρεμβολές σε παρόμοιες τιμές υγρασίας και φαινόμενου βάρους) και των υπολογισμένων τιμών της θερμικής αγωγιμότητας. Αυτές οι αποκλίσεις μπορούν να συμβάλλουν στη βελτιστοποίηση της μεθοδολογίας και του συστήματος εκτίμησης [2].

Για την περιοχή της πόλεως Καλαμάτας, η οποία ήταν η ελληνική περιοχή δοκιμής, ελήφθησαν υπόψη τα παρακάτω δεδομένα:

- Στατιστικά στοιχεία θερμοκρασίας αέρα και βροχόπτωσης, περιόδου 1956-2010, από το σταθμό Καλαμάτας της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας
- Ψηφιοποιημένο τοπογραφικό υπόβαθρο με ταξινομημένες τις μορφολογικές κλίσεις σε 4 κατηγορίες ($0-5^\circ$, $5-10^\circ$, $10-15^\circ$ και $>15^\circ$) χρησιμοποιώντας μοντέλο υψομέτρων DEM ανάλυσης $5\text{m} \times 5\text{m}$ και ορθοφωτοχάρτη ανάλυσης $1\text{m} \times 1\text{m}$ από το «Κτηματολόγιο Α.Ε.».
- Υδρογραφικό δίκτυο και υδάτινα σώματα της περιοχής, σε ψηφιακή μορφή
- Προστατευόμενη ζώνη Natura 2000, σε ψηφιακή μορφή
- Ψηφιοποιημένος γεωλογικός χάρτης κλίμακας 1:50.000 του Ι.Γ.Μ.Ε. (φύλλο χάρτη «Καλαμάτα»)
- Εδαφολογικός χάρτης, σύμφωνα με την ταξινόμηση WRB, σε ψηφιακή μορφή. Οι τύποι εδαφών που υπάρχουν στην περιοχή είναι fluvisols, leptosols και regosols.

- Υπάρχοντα υδρογεωλογικά δεδομένα και χάραξη ισοπιεζομετρικών καμπυλών. Από τις ισοπιεζομετρικές καμπύλες δημιουργήθηκαν πολυγωνικά διανυσματικά αρχεία (shapefiles) επιπέδων κορεσμού για βάθη 0-3, 3-6, 6-10 και >10 m. Επιβεβαιωτικές εργασίες υπαίθρου με μετρήσεις της υδροστατικής στάθμης πραγματοποιήθηκαν το Νοέμβριο του 2012.
- Υπάρχοντα δεδομένα κοκκομετρικής σύστασης (υφής) του εδάφους από μικρού βάθους ερευνητικές γεωτρήσεις που ανορύχθηκαν από το Κ.Ε.Δ.Ε. της Γενικής Γραμματείας Δημοσίων Έργων για γεωτεχνικούς και τεχνικο-γεωλογικούς σκοπούς. Η επεξεργασία των δεδομένων αυτών περιελάμβανε γεωαναφορά των θέσεων των γεωτρήσεων, συσχετισμό της υφής του εδάφους μεταξύ διαφορετικών θέσεων και νέα προσπάθεια ταξινόμησης κατά USDA. Από τα στοιχεία των γεωτεχνικών γεωτρήσεων κατασκευάστηκε χάρτης και βάση δεδομένων. Δεν χρησιμοποιήθηκαν τα στοιχεία όλων των γεωτρήσεων γιατί δεν ήταν κατάλληλα. Τα δεδομένα από 42 γεωτεχνικές γεωτρήσεις ταξινομήθηκαν κατά USDA με την προβολή τους πάνω στο σχετικό τριγωνικό διάγραμμα ταξινόμησης για τα 3 στρώματα βάθους (0-3, 3-6, 6-10 m). Με βάση την ταξινόμηση κατά USDA, δημιουργήθηκαν πολυγωνικά διανυσματικά αρχεία (shapefiles), που παρουσιάζουν την κατανομή των τάξεων της υφής του εδάφους σε κάθε στρώμα βάθους.
- Τα προαναφερθέντα κλιματικά, τοπογραφικά, υδρογεωλογικά και εδαφολογικά δεδομένα καθώς και τα δεδομένα υδρογραφικού δικτύου και ζώνης Natura 2000 εισήχθησαν με τη μορφή διανυσματικών αρχείων (shapefiles) και σε προβολικό σύστημα WGS84 στο σύστημα GIS για επεξεργασία (geo-processing).
- Δεδομένα από δειγματοληψίες εδάφους, αναλύσεις των δειγμάτων και εργαστηριακές μετρήσεις. Τον Οκτώβριο του 2012, ανοίχθηκαν ορύγματα, βάθους 5-6 m, σε 9 επιλεγμένες θέσεις και έγιναν δειγματοληψίες από διαφορετικούς εδαφικούς ορίζοντες. Ακολούθησαν κοκκομετρικές αναλύσεις των δειγμάτων καθώς και μετρήσεις θερμικής αγωγιμότητας στο Πανεπιστήμιο Friedrich-Alexander του Erlangen-Nürnberg.

3.2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΧΑΡΤΗ ΠΕΡΙΓΡΑΜΜΑ

Ο Ευρωπαϊκός Χάρτης Περιγράμμα (European Outline Map, EOM), κλίμακα 1:250.000, δίνει για γενική εικόνα του πολύ ρηχού γεωθερμικού δυναμικού στην Ευρώπη και είναι προφανές ότι δεν μπορεί να αντικαταστήσει τον λεπτομερή σχεδιασμό μιας τεχνικής εταιρίας εγκατάστασης συστημάτων ΓΑΘ. Τα βήματα εκτίμησης και η διαδικασία υπολογισμού για τον EOM είναι παρόμοια με εκείνα που χρησιμοποιήθηκαν για τις περιοχές δοκιμής. Υπάρχουν όμως κάποιες βασικές διαφορές. Έτσι, στον EOM δεν ήταν δυνατή η εκτίμηση του δυναμικού σε 3 στρώματα μέχρι το βάθος των 10 m λόγω ανεπαρκών δεδομένων. Η παράμετρος που προσδιορίζεται είναι μόνον η θερμική αγωγιμότητα και όλες οι τιμές, που λαμβάνονται, αφορούν το ανώτερο στρώμα, χρησιμοποιώντας για τους υπολογισμούς ως τιμή του φαινόμενου βάρους αυτή των $1,3 \text{ g/cm}^3$ [2].

Για την εκτίμηση της θερμικής αγωγιμότητας σε κάθε σημείο του Ευρωπαϊκού Χάρτη Περιγράμματος (EOM) χρησιμοποιήθηκαν σε μορφή shapefiles (προβολικό σύστημα WGS84) τα ακόλουθα δεδομένα (για την Ισπανία, εκτός των κλιματικών δεδομένων, χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία από άλλες, εθνικές πηγές):

- Η ελεύθερα διαθέσιμη ψηφιακή Ευρωπαϊκή Εδαφολογική Βάση Δεδομένων (European Soil Database, ESDB, v2.0) [10] του Ευρωπαϊκού Κέντρου Εδαφολογικών Δεδομένων (European Soil Data Centre, ESDAC), που επελέγη ως βάση για τον προσδιορισμό της υφής του εδάφους σε 4 τάξεις: λεπτόκοκκο/πολύ λεπτόκοκκο, μέτρια λεπτόκοκκο, μεσόκοκκο και αδρόκοκκο υλικό (αρχεία από TXSRFDO - Dominant surface textural class of the Soil Typological Unit, ανάλυσης $1\text{ km} \times 1\text{ km}$) [11]
- Ταξινομημένοι τύποι εδάφους σύμφωνα με την ταξινόμηση κατά WRB (WRBLV1: World Reference Base for Soil Resources 2006/2007), που ελήφθησαν από την Ευρωπαϊκή Εδαφολογική Βάση Δεδομένων (European Soil Database, ESDB, v2.0) του Ευρωπαϊκού Κέντρου Εδαφολογικών Δεδομένων (European Soil Data Centre, ESDAC) [11].
- Κλιματικά δεδομένα (θερμοκρασία, ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα), που ελήφθησαν από την ψηφιακή βάση παγκόσμιων κλιματικών δεδομένων WorldClim (<http://www.worldclim.org>) για την περίοδο 1950-2000 [12, 13]

- Μορφολογικές κλίσεις, DEM (Digital Elevation Model) από SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) 90m Digital Elevation Database v4.1 (USGS/NASA SRTM δεδομένα) με αναδειγματοληψία (αλλαγή ανάλυσης ψηφιακής εικόνας) σε 500 m και 1 km [14]
- Ζώνες προστασίας Natura 2000 της Κεντρικής Ευρώπης (βάσει Κοινοτικών Οδηγιών), που προέρχονται από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Περιβάλλοντος (European Environment Agency, EEA) της Ευρωπαϊκής Επιτροπής [15] και σε Εθνικά Καθορισμένες Περιοχές (CDDA) [16].

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ THERMOMAP

Το Έργο “ThermoMap”, με την ολοκλήρωσή του, έδωσε δύο βασικά εργαλεία εκτίμησης του πολύ ρηχού γεωθερμικού δυναμικού, τα οποία είναι: (α) Διαδραστικός χάρτης (σε περιβάλλον WebGIS), που παρουσιάζει τις τιμές του ρηχού γεωθερμικού δυναμικού στην Ευρώπη, τόσο σε επίπεδο Ευρώπης και χώρας όσο και σε επίπεδο περιοχής δοκιμής, παρέχοντας τη σχετική πληροφόρηση για κάθε σημείο που ενδιαφέρει το χρήστη. (β) Εργαλείο Υπολογισμού (Calculator), που επιτρέπει την εκτίμηση του πολύ ρηχού γεωθερμικού δυναμικού σε οποιαδήποτε τοποθεσία χρησιμοποιώντας ειδικές πληροφορίες για τη συγκεκριμένη θέση. Και οι δύο αυτές εφαρμογές αναπτύχθηκαν από το Τμήμα Γεωπληροφορικής Z_GIS του Πανεπιστημίου του Salzburg PLUS (Αυστρία), που ήταν ένας από τους εταίρους του Έργου.

4.1. ΔΙΑΔΡΑΣΤΙΚΟΣ ΧΑΡΤΗΣ - ΕΦΑΡΜΟΓΗ MAPVIEWER

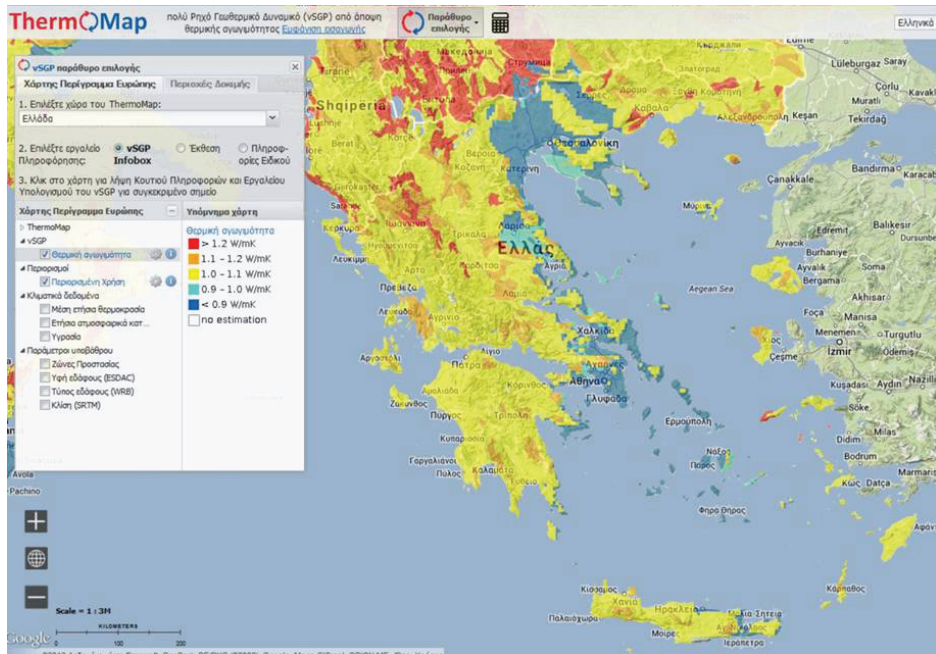
Οι τιμές θερμικής αγωγιμότητας που προκύπτουν τόσο για τον Ευρωπαϊκό Χάρτη Περιγράμμα (EOM) όσο για τις περιοχές δοκιμής ενσωματώθηκαν σε ένα Διαδικτυακό Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών (WebGIS) ανοικτού κώδικα, με όλα τα απαραίτητα χωρικά γεωδεδομένα υποβάθρου από διάφορες πηγές, με στόχο την απεικόνιση διαδραστικού χάρτη. Για τις 14 περιοχές δοκιμής αλλά και για τον Ευρωπαϊκό Χάρτη, τα γεωδεδομένα και οι υπολογιζόμενες τιμές γεωθερμικού δυναμικού παρέχονται ως υπηρεσίες Web Map Services (WMS) και οπτικοποιούνται σε μια εφαρμογή MapViewer («Προβολή Χάρτη») του WebGIS. Γενικά, τα δεδομένα των περιοχών δοκιμής, αφού έχουν υποστεί τη σχετική επεξεργασία και ομαδοποίηση, εισάγονται σε GIS σε τοπικό επίπεδο, εκεί όπου βρίσκονται οι διακομιστές - εξυπηρετητές (servers) των εταίρων του έργου, και από εκεί δημοσιεύονται σε περιβάλλον WMS. Αυτό σημαίνει ότι σε κάθε αναζήτηση (query) που πραγματοποιείται από οποιονδήποτε χρήστη, μέσω του πρότυπου WMS, δρομολογείται το αίτημα αυτό προς τον κεντρικό διακομιστή (που βρίσκεται στο Τμήμα Γεωπληροφορικής Z_GIS του Πανεπιστημίου Salzburg PLUS). Μέσω κατάλληλης εφαρμογής, τα αιτήματα αποστέλλονται στους διακομιστές των εταίρων και στη συνέχεια επιστρέφουν οι επιθυμητές απαντήσεις. Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για τη δημοσίευση των επιπέδων WMS περιλαμβάνουν λογισμικό ESRI ArcGIS Server και λογισμικό εξυπηρετητή ανοικτού κώδικα GeoServer, με μια υποκείμενη βάση δεδομένων PostGIS, αλλά καθορίζονται η δομή των δεδομένων και η συμμόρφωση με τα πρότυπα του Open Geospatial Consortium (OGC) για την ανάκτηση των αιτούμενων πληροφοριών (οι μορφές των αιτήσεων και απαντήσεων είναι τυποποιημένες από το OGC). Η διεπαφή WebGIS αναπτύχθηκε με τη χρήση λογισμικών ανοικτού κώδικα, όπως OpenLayers και ExtJS4, που αποτελούν διεπαφές προγραμματισμού εφαρμογών JavaScript, οι οποίες καθιστούν δυνατό το συνδυασμό διαδραστικών χαρτών με μια σύνθετη διασύνδεση χρήστη [2]. Επίσης, δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να χρησιμοποιεί τις κατάλληλες εργαλείοι, να εμφανίζονται τα αντίστοιχα υπομνήματα, πίνακες αλλά και οι δομές των θεματικών επιπέδων με σκοπό τη σωστή, ολοκληρωμένη εμφάνιση του διαδραστικού χάρτη. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί το πολύ χρήσιμο εργαλείο αναζήτησης “GetFeatureInfo”, το οποίο δίνει πληροφορίες για όλες τις παραμέτρους στο συγκεκριμένο πολύγωνο επιφάνειας που επιλέγεται από το χρήστη, ενώ επιπρόσθετα δίνει και τη δυνατότητα εκτύπωσής τους [2]. Ο Διαδραστικός Χάρτης είναι διαθέσιμος στη διεύθυνση: <http://geoweb2.sbg.ac.at/thermomap/>

Ανοίγοντας ο χρήστης την εφαρμογή MapViewer του “ThermoMap”, μέσω της προαναφερθείσας διεύθυνσης, εμφανίζεται ένα «Παράθυρο Εισαγωγής» (Intro Window), που καλύπτει εν

μέρει το κύριο παράθυρο και όπου υπάρχουν χρήσιμα κείμενα, δηλ. «Εγχειρίδιο Οδηγιών», «Τεχνικές Οδηγίες» και «Λεξιλόγιο Όρων (Γλωσσάριο)», τα οποία μπορεί να κατεβάσει. Από το Παράθυρο αυτό, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει γλώσσα (π.χ. ελληνικά) από έναν αναπτυσσόμενο κατάλογο, να λάβει κάποιες σύντομες βασικές πληροφορίες που παρατίθενται σε μορφή ερωτήσεων - απαντήσεων («Με μια ματιά») και να ξεκινήσει την εφαρμογή εκτίμησης του πολύ ρηχού γεωθερμικού δυναμικού επιλέγοντας ανάμεσα στο «Χάρτη Περίγραμμα Ευρώπης (EOM)» και στις «Περιοχές Δοκιμής». Έχοντας πατήσει το επιθυμητό κουμπί, το Παράθυρο Εισαγωγής θα κλείσει και ένα νέο παράθυρο, το «παράθυρο επιλογής vSGP» (vSGP selection window), εμφανίζεται στην επάνω αριστερή γωνία της εφαρμογής. Ανάλογα με την επιλογή που έχει γίνει, εμφανίζεται είτε ο χάρτης θερμικής αγωγιμότητας της Ευρώπης είτε μια επισκόπηση των χωρών που μετείχαν στο «ThermoMap» και οι Περιοχές Δοκιμής. Το «παράθυρο επιλογής vSGP» έχει δύο διαπαφές για τα δύο πεδία «Χάρτης Περίγραμμα Ευρώπης» και «Περιοχές Δοκιμής» με δυνατότητα επιλογής της αντίστοιχης καρτέλας. Στο παράθυρο αυτό, υποδεικνύεται μια σειρά εργασιών με τα ακόλουθα βήματα: (i) επιλογή Περιοχής Ενδιαφέροντος (χώρας ή περιοχής δοκιμής), (ii) επιλογή Εργαλείου Πληροφοριών («Κουτί Πληροφοριών vSGP», «Εκθεση», «Πληροφορίες Ειδικού») και (iii) κλικάρισμα πάνω σε συγκεκριμένο σημείο του χάρτη για τη λήψη πληροφοριών σχετικά με το πολύ ρηχό γεωθερμικό δυναμικό καθώς και άλλες παραμέτρους [17].

Αν ο χρήστης επιλέξει το «Χάρτη Περίγραμμα Ευρώπης», τότε εμφανίζεται ο χάρτης της Ευρώπης με την κατανομή της εκτιμώμενης θερμικής αγωγιμότητας (ως προεπιλογή). Από την επιλογή της χώρας, μπορεί ο ενδιαφερόμενος να επιλέξει μια χώρα που μετείχε στο «ThermoMap» μέσα από έναν αναδυόμενο κατάλογο και η κλίμακα θέασης του χάρτη εστιάζει στην έκταση της επιλεγμένης χώρας (Εικόνα 1). Εκτός από την κατανομή της θερμικής αγωγιμότητας στη συγκεκριμένη χώρα, μπορεί ο ενδιαφερόμενος να λάβει πληροφορίες και για άλλες παραμέτρους για τη χώρα, όπως περιορισμούς χρήσης, κλιματικά δεδομένα (μέση ετήσια θερμοκρασία, ετήσιο ύψος ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων, υγρασία), ζώνες προστασίας, υφή του εδάφους (κατά ESDAC), τύποι εδάφους (κατά WRB) και κλίσεις (κατά SRTM), επιλέγοντας στο «κουτί επιλογής» (checkbox) το κατάλληλο επίπεδο του χάρτη (στην αριστερά πλευρά του πίνακα περιεχομένων, μέσα σε αναδιπλούμενους φακέλους), το οποίο και προβάλλεται. Ένα «Κουμπί Διαφάνειας» στη δεξιά πλευρά κάθε τσεκαρισμένου επιπέδου ελέγχει τη διαφάνεια με έναν ρυθμιστή, ενώ ένα «Κουμπί Πληροφοριών» ανοίγει ένα παράθυρο πληροφοριών σχετικά με τις πηγές των δεδομένων και τα βήματα επεξεργασίας. Στη δεξιά πλευρά του πίνακα περιεχομένων εμφανίζεται το υπόμνημα και η επεξήγηση των συμβόλων για κάθε επίπεδο που έχει επιλεγεί. Με επιλεγμένο το «Κουτί Πληροφοριών (Info box) vSGP» από το Εργαλείο Πληροφοριών (Info tool) και κάνοντας κλικ πάνω σε οποιοδήποτε σημείο του χάρτη, εμφανίζεται ένα παράθυρο με τις γεωγραφικές συντεταγμένες του σημείου και με 5 καρτέλες (tabs): (i) η προ-επιλεγμένη καρτέλα «Σύνοψη» (Summary) με μια γενική εκτίμηση και πιθανούς περιορισμούς, (ii) η καρτέλα «vSGP» με πίνακα δεδομένων θερμικής αγωγιμότητας, υψής εδάφους και υδρολογικής κατάστασης, (iii) η καρτέλα «Κλιματικό Διάγραμμα» (Climate Chart) με δεδομένα ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων και θερμοκρασίας, (iv) η καρτέλα «Εκθεση» (Report) για τη δημιουργία ενός πληροφοριακού δελτίου της τοποθεσίας, με λεπτομέρειες χάρτη και συλλογή όλων των σημαντικών παραμέτρων που ελήφθησαν υπόψη, το οποίο μπορεί να εκτυπωθεί ή να μετατραπεί σε έγγραφο pdf και, τέλος (v) η καρτέλα «Εργαλείο Υπολογισμού» (Calculator) για το άνοιγμα του Εργαλείου Υπολογισμού, για το οποίο γίνεται εκτενής περιγραφή στην ενότητα 4.2. Έχοντας επιλέξει «Πληροφορίες Ειδικού» (Expert info) και κάνοντας κλικ πάνω σε οποιοδήποτε σημείο του χάρτη της χώρας, ανοίγει ένα παράθυρο με πίνακες περιγραφικών χαρακτηριστικών (attribute tables) όλων των ορατών επιπέδων του χάρτη που υπάρχουν σ' αυτό το σημείο και με επεξήγηση των συντομογραφιών. Πάνω στο «Χάρτη Περίγραμμα Ευρώπης» μπορεί να γίνει μεγέθυνση είτε με τον τροχό του ποντικιού, είτε σχεδιάζοντας ένα ορθογώνιο με πατημένο το πλήκτρο Shift, είτε πληκτρολογώντας οποιαδήποτε τοποθεσία στο πεδίο αναζήτησης διεύθυνσης στην επάνω δεξιά γωνία του παραθύρου του χάρτη και πατώντας Enter, είτε ακόμη χρησιμοποιώντας γεωγραφικές συντεταγμένες (π.χ. «47.802202, 13.043489»). Τέλος, άλλες λειτουργίες που υπάρχουν είναι: η δυνατότητα επιλογής του

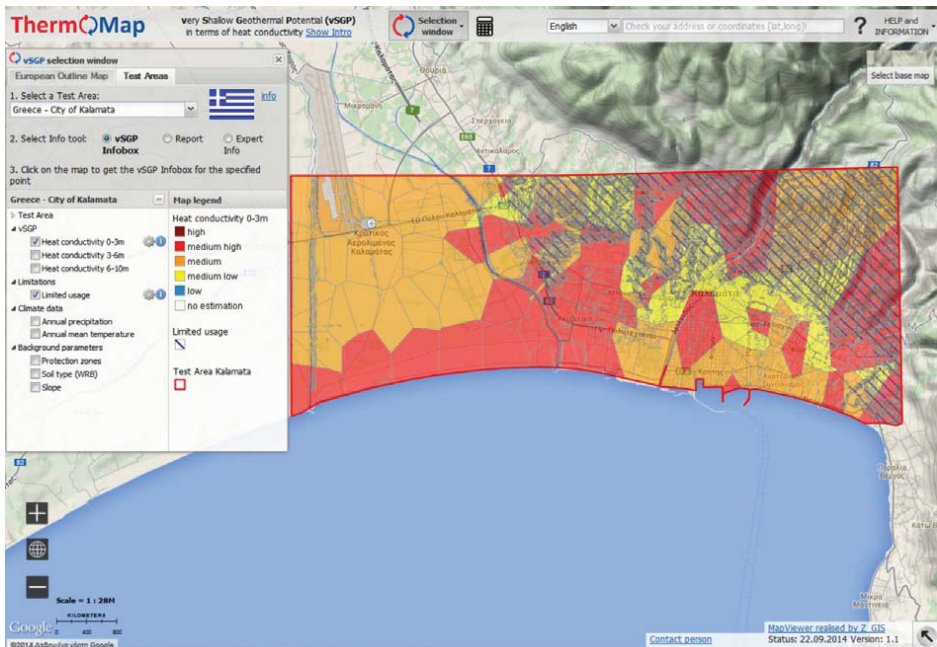
χάρτη βάσης, το άνοιγμα χάρτη επισκόπησης και η παρουσία της πραγματικής κλίμακας (σε αριθμητική και γραφική μορφή) [17].



Εικόνα 1: Η εφαρμογή MapViewer που παρουσιάζει την κατανομή της εκτιμώμενης θερμικής αγωγιμότητας στην Ελλάδα, η οποία έχει επιλεγεί ως χώρα από το «Χάρτη Περίγραμμα Ευρώπης» (επιλεγμένη γλώσσα: ελληνική)

Αν ο χρήστης επιλέξει «Περιοχές Δοκιμής» (Test Areas), τότε εμφανίζεται ένας αναπτυσσόμενος κατάλογος με τις περιοχές μελέτες των χωρών των εταίρων που μετείχαν στο “ThermoMap”. Για την Ελλάδα, η περιοχή δοκιμής ήταν η Καλαμάτα. Επιλέγοντας ως περιοχή δοκιμής την Καλαμάτα, η εφαρμογή MapViewer εστιάζει στην περιοχή της Καλαμάτας και με προεπιλεγμένο το «Κουτί Πληροφοριών (Infobox) vSGP» από το Εργαλείο Πληροφοριών (Info tool) εμφανίζεται η κατανομή της εκτιμώμενης θερμικής αγωγιμότητας για το στρώμα βάθους 0-3 m (Εικόνα 2). Επιλέγοντας ο χρήστης στο «κουτί επιλογής» (checkbox) τη θερμική αγωγιμότητα για τα στρώματα βάθους 3-6 και 6-10 m (στην αριστερά πλευρά του πίνακα περιεχομένων), φορτώνονται τα αντίστοιχα επίπεδα. Εκτός από την κατανομή της θερμικής αγωγιμότητας σ’ αυτά τα τρία στρώματα βάθους, ο κάθε ενδιαφερόμενος μπορεί να λάβει πληροφορίες για άλλες παραμέτρους της περιοχής δοκιμής, όπως περιορισμούς χρήσης, κλιματικά δεδομένα (μέση ετήσια θερμοκρασία, ετήσιο ύψος ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων), ζώνες προστασίας, τύποι εδάφους (κατά WRB) και κλίσεις, επιλέγοντας το κατάλληλο επίπεδο στην αριστερά πλευρά του πίνακα περιεχομένων, μέσα σε αναδιπλούμενους φακέλους. Στη δεξιά πλευρά κάθε τσεκαρισμένου επιπέδου υπάρχουν τα Κομψία «Διαφάνειας» και «Πληροφοριών», με τις ίδιες λειτουργίες που αναφέρθηκαν για το «Χάρτη Περίγραμμα Ευρώπης (EOM)». Με επιλεγμένο το «Κουτί Πληροφοριών (Infobox) vSGP» από το Εργαλείο Πληροφοριών και κάνοντας κλικ πάνω σε οποιοδήποτε σημείο του διαδραστικού χάρτη μέσα στην περιοχή δοκιμής (Καλαμάτα), εμφανίζεται ένα παράθυρο με τις γεωγραφικές συντεταγμένες του σημείου και με 5 καρτέλες: «Σύνοψη» (Summary), «vSGP 0-10m», «περισσότερα...» (more...), «Κλιματικό Διάγραμμα» (Climate Chart) και «Εκθεση» (Report). Η επιλογή της καρτέλας «Σύνοψη» παρέχει μια γενική εκτίμηση για την καταλλό-

τητα εγκατάστασης ενός συστήματος ΓΑΘ και πιθανούς περιορισμούς. Η καρτέλα “vSGP” περιέχει πίνακα με τις τιμές και το εύρος τιμών της θερμικής αγωγιμότητας, καθώς και τις τιμές της θερμοχωρητικότητας, για κάθε ένα από τα τρία στρώματα βάθους (0-3, 3-6, 6-10 m). Στην καρτέλα «περισσότερα...» παρατίθεται πίνακας με πληροφορίες για την υφή του εδάφους (κοκκομετρική σύσταση κατά USDA), το επίπεδο ακριβείας, την υδρολογική κατάσταση (κορεσμένες/ακόρεστες συνθήκες), το φαινόμενο βάρος και την κλίση, για καθένα από τα προαναφερθέντα στρώματα βάθους. Επιλέγοντας την καρτέλα «Κλιματικό Διάγραμμα» παρουσιάζονται κλιματικά στοιχεία, δηλ. πίνακας με το ετήσιο και το μέγιστο μηνιαίο ύψος των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων και τη μέση και την ελάχιστη ετήσια θερμοκρασία αέρα, καθώς και γράφημα που απεικονίζει τη μηνιαία διακύμανση του ύψους των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων και της μέσης θερμοκρασίας του αέρα. Με επιλογή της καρτέλας «Έκθεση» και πατώντας το κουμπί αριστερά δημιουργείται ένα πληροφοριακό δελτίο με χάρτη της περιοχής δοκιμής και πληροφορίες για όλες τις σημαντικές παραμέτρους τόσο γενικά για το συγκεκριμένο σημείο (τοποθεσία, συντεταγμένες, πιθανοί περιορισμοί χρήσης, εκτίμηση καταλληλότητας τοποθέτησης συστήματος ΓΑΘ, κλιματικές συνθήκες) όσο και ειδικότερα ανά στρώμα βάθους (μέση τιμή και εύρος θερμικής αγωγιμότητας, θερμοχωρητικότητα, φαινόμενο βάρος, υφή εδάφους κατά USDA, συνθήκες κορεσμού) βάσει των εισαχθέντων δεδομένων. Αυτή η έκθεση, 5 σελίδων και διαστάσεων A4, μπορεί να εκτυπωθεί ή να μετατραπεί σε έγγραφο pdf μορφής. Όταν επιλεγμένο Εργαλείο Πληροφόρησης είναι οι «Πληροφορίες Ειδικού» (Expert info), τότε για το σημείο του διαδραστικού χάρτη μέσα στην περιοχή δοκιμής (Καλαμάτα) ανοίγει ένα παράθυρο με πίνακες περιγραφικών χαρακτηριστικών (attribute tables) όλων των υπαρχόντων ορατών επιπέδων, το οποίο και συνιστά ένα χρήσιμο εργαλείο. Τα τυποποιημένα ακρώνυμα των τίτλων των στηλών επεξηγούνται με «συμβουλές εργαλείου» (tooltips) και σε έναν κατάλογο συντομογραφιών που εμφανίζεται κάνοντας κλικ πάνω στο κουμπί «Συντομογραφίες» (Abbreviations) [17].



Εικόνα 2: Η εφαρμογή MapViewer που παρουσιάζει την εκτίμηση της εκτιμώμενης θερμικής αγωγιμότητας για το στρώμα βάθους 0-3 m στην περιοχή πόλης Καλαμάτας, η οποία έχει επιλεγεί από τον κατάλογο των περιοχών δοκιμής (επιλεγμένη γλώσσα: αγγλικά)

4.2. ΕΡΓΑΛΕΙΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ

vSGP Calculator with enhanced background parameters
Αχαρνές, Ελλάδα
ThermQMap

1. General location parameters (optional)

Protection zone : NO	Slope (°)	Soil type (WRB)
Name: <input type="text"/>	< 15°	Cambisol
Code: <input type="text"/>		
Type: <input type="text"/>		

2. Climate parameters

Temperature (°C)			Precipitation (mm)			Humidity Index SCHREIBER (1973)
Annual average	Soil temperature (optional)	Annual minimum (optional)	Annual sum	Monthly maximum (optional)	Month(s) of maximum precipitation (optional)	
17.58		5.50	495	80	December	<input type="button" value="Calculator"/> semaid

3. Depth layer specific settings

Select depth layer definition

No depth information (like European Outline Map)

4. Depth layer specific parameters

Bulk density (g/cm ³)	Soil texture (USDA)			Water content Vol.-%				Saturation
	Insert separates	Select Soil texture group/class	Selection by triangle (optional)	minimum (arid/unsaturated)	maximum (humid/unsaturated)	saturated	measured (Vol.-%) (optional)	
1.3		loam all (Group level)		21	41			unsaturated

5. Calculation

Heat capacity (MJ/m ³ K) DEHNER (2007)	Heat conductivity (W/mK) KERSTEN (1949)				vSGP (Test Area legend)
	Current vSGP value	minimum (and/unsaturated)	maximum (humid/unsaturated)	saturated	
<input type="button" value="Calculator"/>	0.83	0.83	1.07		low conductivity

6. Report with specified parameters

Person responsible:

Report title:

Εικόνα 3: Εργαλείο Υπολογισμού (Calculator). Στην περίπτωση αυτή είναι ενσωματωμένο και έτσι για το επιλεγμένο σημείο τα διαθέσιμα στοιχεία φορτώνονται από το Χάρτη Περιγράμμα Ευρώπης. Όταν το Εργαλείο Υπολογισμού είναι αυτόνομο, τα πεδία δεδομένων είναι κενά και θα πρέπει να συμπληρωθούν, ενώ απουσιάζει και η τοποθεσία (επιλεγμένη γλώσσα: αγγλικά)

Το «Εργαλείο Υπολογισμού» (Calculator), για την εκτίμηση του πολύ Ρηχού Γεωθερμικού Δυναμικού (vSGP), αποσκοπεί στο να επαιυξήσει τα υπάρχοντα δεδομένα από το «Χάρτη Περιγράμμα Ευρώπης» ή να δημιουργήσει νέα δεδομένα και χρησιμοποιείται όταν υπάρχουν λεπτομερή στοιχεία (π.χ. από αναλύσεις εδαφικών σχηματισμών). Χρησιμοποιείται για οποιοδήποτε σημείο εκτός περιοχών δοκιμής και φιλοδοξεί να φτάσει τουλάχιστον στο ίδιο ή ακόμη μεγαλύτερο επίπεδο ακριβείας, όπως στις περιοχές δοκιμής. Το «Εργαλείο Υπολογισμού», που αποτελεί μια φόρμα δεδομένων εισόδου (input form), έχει προ-συμπληρωθεί με πληροφορίες από το «Χάρτη Περιγράμμα Ευρώπης» και ο κάθε χρήστης μπορεί να εισάγει νέα δεδομένα ή να τροποποιήσει τα υπάρχοντα. Το «Εργαλείο Υπολογισμού» είναι είτε ενσωματωμένο είτε αυτόνομο: (α) Ως ενσωματωμένο εργαλείο, με μορφή καρτέλας, βρίσκεται στο παράθυρο που ανοίγει κάνοντας κλικ πάνω σε οποιοδήποτε σημείο του Ευρωπαϊκού χάρτη και έχοντας επιλέξει το «Κουτί Πληροφοριών (Infobox) vSGP» ως Εργαλείο Πληροφόρησης (βλ. και ενότητα 4.1). Πατώντας στο εικονίδιο μιας αριθμομηχανής, ανοίγει το Εργαλείο Υπολογισμού του vSGP ως μια νέα σελίδα html και όλα τα διαθέσιμα στοιχεία (κλιματικές και εδαφικές παράμετροι) για το σημείο αυτό του Χάρτη Περιγράμματος φορτώνονται (Εικόνα 3). Τα στοιχεία μπορούν να τροποποιηθούν και να γίνει εκ νέου εκτίμηση της θερμικής αγωγιμότητας και θερμχωρητικότητας πατώντας στο σχετικό εικονίδιο. Υπάρχει η δυνατότητα δημιουργίας και εκτύπωσης έκθεσης με τα νέα αποτελέσματα και τις ειδικές πα-

ραμέτρους. (β) Ως αυτόνομο εργαλείο (εκτός εφαρμογής MapViewer) είναι προσβάσιμο από τη διεύθυνση: <http://geoweb2.sbg.ac.at/thermomap/calculator.html>. Στην περίπτωση αυτή δεν είναι προ-συμπληρωμένες οι τιμές κλιματικών και εδαφικών παραμέτρων, ενώ για την αναφορά των αποτελεσμάτων του υπολογισμού σε μια τοποθεσία θα πρέπει να ορίζονται η διεύθυνση ή οι γεωγραφικές συντεταγμένες [18].

Στο «Εργαλείο Υπολογισμού» (Εικόνα 3), υπάρχουν δύο διαδραστικά εργαλεία για την επιλογή της τάξης του μεγέθους των κόκκων (κοκκομετρικής σύστασης), τα οποία εφαρμόζονται στην ενότητα “4. Depth layer specific parameters” (4. Ειδικές παράμετροι στρώματος βάθους) (α) είτε πατώντας το κουμπί “Insert separates” (Εισαγωγή κλασμάτων) οπότε θα ανοίξει το «εργαλείο υπολογισμού κοκκομετρίας» (Grain size calculator) για να εισαχθούν οι ποσοστιαίες τιμές των κλασμάτων, (β) είτε πατώντας το κουμπί “Selection by triangle” (Επιλογή από το τρίγωνο) οπότε θα ανοίξει το Εργαλείο Τριγωνικού Διαγράμματος (Triangle Tool), το οποίο δείχνει ένα διαδραστικό τριγωνικό διάγραμμα κοκκομετρίας κατά USDA [18].

Στο «εργαλείο υπολογισμού κοκκομετρίας» (Grain size calculator) εισάγονται ποσοστιαίες τιμές άμμου και αργίλου, στη συνέχεια πατώντας το κουμπί “Get...” (Πάρτε...) υπολογίζεται το ποσοστό ιλύος και κατόπιν γίνεται προβολή του σημείου πάνω στο τριγωνικό διάγραμμα και η σχετική τάξη μεγέθους των κόκκων κατά USDA εμφανίζεται σε αναδιπλούμενο κατάλογο. Πατώντας το κουμπί “Apply...” (Εφαρμόστε...) κλείνει το εργαλείο υπολογισμού κοκκομετρίας και η επιλεγμένη τάξη μεγέθους κόκκων μεταφέρεται στο κύριο παράθυρο του Εργαλείου Υπολογισμού vSGP [18].

Το «Εργαλείο Τριγωνικού Διαγράμματος» (Triangle Tool) έχει 2 διεπαφές: το επίπεδο Τάξης (Class level) με 12 τάξεις κατά USDA και το επίπεδο Ομάδας (Group level) με 4 ομάδες κατά USDA. Κάνοντας κλικ στο τριγωνικό διάγραμμα, η αντίστοιχη τάξη ή ομάδα επισημαίνεται στο τριγωνικό διάγραμμα και εμφανίζεται στον αναδιπλούμενο κατάλογο. Πατώντας το κουμπί “Apply...” (Εφαρμόστε...) το Εργαλείο Τριγωνικού Διαγράμματος κλείνει και η επιλεγμένη τάξη μεγέθους κόκκων μεταφέρεται στο κύριο παράθυρο του Εργαλείου Υπολογισμού (Calculator) του vSGP [18].

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το Έργο “ThermoMap” έδωσε τη δυνατότητα μιας εκτίμησης του πολύ ρηχού θερμικού δυναμικού (θερμικής αγωγιμότητας και θερμοχωρητικότητας) με την αξιοποίηση και κατάλληλη επεξεργασία υπαρχόντων δεδομένων. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη μεθοδολογία που εφαρμόστηκε κρίνονται ως ικανοποιητικά και δίνουν μια καλή αρχική εκτίμηση. Τα δύο βασικά εργαλεία που δημιουργήθηκαν, δηλ. ο διαδραστικός χάρτης με την εφαρμογή MapViewer και το εργαλείο υπολογισμού, παρέχουν τη δυνατότητα στον κάθε ενδιαφερόμενο (εταιρία, μελετητή, επιχειρήση, φοιτητή, ερευνητή, ιδιώτη, κρατική αρχή κ.ά.) να έχει, εύκολα και γρήγορα, μια πρώτη εικόνα για τη γεωθερμική κατάσταση μιας θέσης μέχρι το βάθος των 10 m. Συνιστούν ένα πολύ χρήσιμο βοήθημα στο σχεδιασμό και την εγκατάσταση συστημάτων ΓΑΘ με οριζόντιους (βάθους 0-3 m) ή ορισμένου τύπου κατακόρυφους (βάθους 3-10 m) γεωεναλλάκτες, κλειστού τύπου [19]. Στην πράξη, η απόλυτη ακρίβεια επιτυγχάνεται με τον έλεγχο των τοπικών συνθηκών, με εργασίες υπαίθρου και εργαστηριακές μετρήσεις. Όμως, επειδή αυτές οι εργασίες απαιτούν χρόνο, τα εργαλεία του “ThermoMap” δίνουν τη δυνατότητα άμεσης λήψης μιας αρχικής εκτίμησης. Με τον τρόπο αυτό, το “ThermoMap” έρχεται κοντά στην αγορά των ΓΑΘ βοηθώντας στην ανάπτυξή της. Η εξασφάλιση επιτυχημένων - αποδοτικών συστημάτων ΓΑΘ και η μείωση του κόστους εγκατάστασης (π.χ. μείωση του κόστους της μελέτης εγκατάστασης) συνιστούν δύο παραμέτρους που παίζουν καθοριστικό ρόλο στη μεγαλύτερη προώθηση και εξάπλωσή τους. Η αξιοποίηση των εργαλείων του “ThermoMap” επηρεάζει θετικά και τις δύο αυτές παραμέτρους. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι η τεχνονγνωσία που έχει αποκτηθεί και τα εργαλεία που έχουν αναπτυχθεί μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της αβαθούς γεωθερμίας και σε άλλες περιοχές.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Bertermann, D. and Jordan, G., 2011, "Geothermal Energy Resource Exploitation in the EU: ThermoMap", *European Geologist*, 32, pp. 29-32
- [2] Bertermann, D., Bialas, Ch., Morper-Busch, L., Klug, H., Rohn, J., Stollhofen, H., Psyk M., Jaudin, F., Maragna, Ch., Einarsson, G. M., Vikingsson, S., Orosz, L., Jordan, G., Vjidea, A.-M., Lewis, M., Lawley, R. S., Latham, A., Declercq, P.-Y., Petitclerc, E., Zacherl, A., Arvanitis, A. A., and Stefouli, M., 2013, "ThermoMap - An Open-Source Web Mapping Application for Illustrating the very Shallow Geothermal Potential in Europe and Selected Case Study Areas", *Proc. European Geothermal Congress, Pisa, Italy, 3-7 June 2013, Paper SG3-05*, 8 p.
- [3] Φραγκογιάννης, Γ., 2011, «Αναλυτικός Σχεδιασμός και Πειραματική Ανάλυση Συστημάτων Αβαθούς Γεωθερμίας με Κατακόρυφους Γεωεναλλάκτες. Πειραματική Διερεύνηση του Θερμικού Δυναμικού του Υπεδάφους», Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων - Μεταλλουργών, Ε.Μ.Π., Αθήνα, 284 σελ.
- [4] Φραγκογιάννης, Γ.Ι., Παπαθεοδώρου, Ν.Γ., Σταματάκη, Σ.Κ., και Ρόζος, Δ.Ε., 2010, «Πειραματικός Προσδιορισμός της Θερμικής Αγωγιμότητας Εδαφών - Συσχέτιση με Χαρακτηριστικές Ιδιότητες των Εδαφικών Υλικών», 6^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ 29/09-1/10/2010, Βόλος, 8 σελ.
- [5] Ψαρράς, Ν., 2012, «Γεωθερμία και Κλιματισμός - Θεωρητικοί και Πρακτικοί Κανόνες», Εκδόσεις SHARE Τεχνικές Εκδόσεις ΕΠΕ, Αθήνα, 187 σελ.
- [6] Schreiber, D., 1973, "Entwurf einer Klimaeinteilung für landwirtschaftliche Belange", *Bochumer Geo-graphische Arbeiten*, 3, Bochum, pp.1-104
- [7] IUSS Working Group WRB, 2006, "World Reference Base for Soil Resources 2006", *World Soil Resources Reports*, 103, Rome, pp. 1-132
- [8] Kersten, M.S., 1949, "Thermal Properties of Soil", *Bulletin* 28, LII/21, Minneapolis, pp. 1-227
- [9] Dehner, U., 2007, "Bestimmung der thermischen Eigenschaften von Böden als Grundlage für die Erdwärmenutzung", *Mainzer geowissenschaftliche Mitteilungen*, 35, Mainz, pp. 159-186
- [10] Panagos, P., Van Liedekerke, M., Jones, A. and Montanarella, L., 2012, "European Soil Data Centre: Response to European policy support and public data requirements", *Land Use Policy*, 29/2, Amsterdam, pp. 329-338
- [11] European Soil Data Centre (ESDAC): European Commission - Joint Research Centre (JRC) - Institute for Environment and Sustainability (IES). ESDAC MapViewer: <http://eusoiils.jrc.ec.europa.eu/wrb/>
- [12] Hijmans, R.J., Cameron, S.E., Parra, J.L., Jones, P.G. and Jarvis, A., 2005, "Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas", *International Journal of Climatology*, 25, pp. 1965-1978
- [13] Museum of Vertebrate Zoology, University of California, Berkeley (2012): WorldClim, Monthly precipitation and mean and min temperature data for current conditions (~1950-2000), Interpolated data of global weather stations, <http://www.worldclim.org/>
- [14] CGIAR Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI), SRTM 90m Digital Elevation Database v4.1: Processed Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) data version 4.1, Resampled global SRTM data to 500 m and 1 km resolutions, <http://srtm.csi.cgiar.org>
- [15] European Environment Agency (EEA), 2012, "Natura 2000" from Unit Nature & Biodiversity, DG Environment, European Commission - generalized to a scale of 1: 100,000, Birds directive and Habitats directive for Central Europe (EU25, EU27, EU12, EU15), <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/natura-2>
- [16] European Environment Agency (EEA), 2011, Nationally Designated Areas (National - CDDA-1) from European Topic Centre on Biological Diversity (ETC/BD) based on country deliveries - National protected sites of Europe with Iceland, <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/nationally-designated-areas-national-cdda-5>
- [17] Morper-Busch, L., 2013, "Instructions for using the ThermoMap MapViewer", *Instruction Manual*, <http://geoweb2.sbg.ac.at/thermomap/>, 11 p.
- [18] Morper-Busch, L., 2013, "Instructions for using the ThermoMap vSGP Calculator", *Instruction Manual*, <http://geoweb2.sbg.ac.at/thermomap/>, 13 p.
- [19] Bertermann, D., Bialas, Ch., Psyk, M., and Morper-Busch, L., 2013, "ThermoMap MapViewer Technical Guidelines", <http://geoweb2.sbg.ac.at/thermomap/>, 6 p.

ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΑΒΑΘΟΥΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ ΣΤΗΝ ΠΡΩΙΜΗΣΗ ΦΥΤΕΙΩΝ ΥΠΟ ΧΑΜΗΛΗ ΚΑΛΥΨΗ. Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΟΥ ΣΠΑΡΑΓΓΙΟΥ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΧΡΥΣΟΥΠΟΛΗΣ ΚΑΒΑΛΑΣ

Π. Δαλαμπάκης¹, Α. Ηλίας¹, Α. Λαδάς²

^{1*} Ινστιτούτο Εγγείων Βελτιώσεων, Ελληνικός Γεωργικός Οργανισμός «Δήμητρα», 57400 Σίνδος, Θεσσαλονίκη, e-mail: dalabakis.lri@nagref.gr

²FrigoLand, Βιομηχανικές Εφαρμογές Ψύξης, 13^ο χιλ. Καβάλας-Ξάνθης, e-mail: akladas@otenet.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

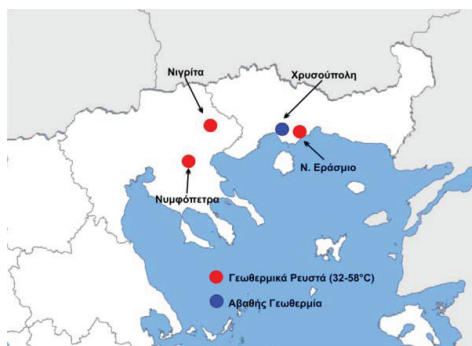
Η διαχρονική παρακολούθηση θερμαινόμενων και μη θερμαινόμενων καλλιέργειών λευκού σπαραγγιού στη λεκάνη της Χρυσούπολης Καβάλας, έδειξε ότι η διαδικασία πρωίμησης απαιτεί υψηλά θερμικά φορτία τα οποία, ανάλογα με τον χρόνο έναρξής της, κυμαίνονται από 250 έως και 300 KWh/ημέρα/στρέμμα. Η τεχνική επίτευξης πρωιμότητας χωρίς επιπτώσεις στην παραγωγικότητα απαιτεί θερμοκρασίες προσαγωγής της τάξης των 30°C και διαθεσιμότητα του ενεργειακού πόρου στο 95% του χρόνου εφαρμογής κατ'ελάχιστο. Προκειμένου να επιτευχθεί πρωίμηση κατά τρόπο οικονομικά βιώσιμο, απαιτείται διαθεσιμότητα και αξιοποίηση μιας πηγής θερμικής ενέργειας χαμηλού κόστους. Μια αξιόπιστη εναλλακτική είναι η αξιοποίηση του άφθονου και ανανεώσιμου θερμικού δυναμικού το οποίο βρίσκεται αποθηκευμένο στο νερό των ταμιευτήρων μικρού βάθους με τη χρήση της τεχνολογίας των αντλιών θερμότητας.

Συστήματα αντλιών θερμότητας νερού-νερού έχουν εγκατασταθεί και λειτουργούν αποτελεσματικά από το 2006 σε πέντε φυτείες λευκού σπαραγγιού συνολικής έκτασης 110 στρεμμάτων στην ευρύτερη περιοχή της Χρυσούπολης, προσφέροντας χαμηλού κόστους θερμική ενέργεια. Η πηγή της απορροφούμενης θερμικής ενέργειας είναι το νερό υδρογεωτρήσεων βάθους από 30 έως 100 μ., με εκμεταλλεύσιμες παροχές από 15 έως 80 m³/h και θερμοκρασία από 16 έως 19,5°C. Με θερμοκρασίες προσαγωγής στους αγρούς της τάξης των 30-35°C για διάστημα 10-15 ημερών επιτυγχάνεται πρωιμότητα της τάξης των 15-25 ημερών σε σχέση με τις μη θερμαινόμενες φυτείες. Η σκοπιμότητα και η οικονομική βιωσιμότητα της ενεργειακής αξιοποίησης των εκτεταμένων υδροταμιευτήρων μικρού βάθους με θερμοκρασίες μεταξύ 15 και 25°C στο σύνολο των μεγάλων σύγχρονων ιζηματογενών λεκανών της χώρας στον αγροτικό τομέα, είναι προφανής.

Λέξεις Κλειδιά: αβαθής γεωθερμία, αντλίες θερμότητας, πρωίμηση καλλιέργειών, σπαράγγια

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Πέραν της γεωθερμικής ενέργειας, η οποία είναι αποθηκευμένη σε ρευστά υψηλής-μέσης ενθαλπίας ($T > 90^{\circ}\text{C}$) και χαμηλής ενθαλπίας ($25^{\circ}\text{C} < T < 90^{\circ}\text{C}$), υπάρχει και η δυνατότητα αξιοποίησης της λεγόμενης αβαθούς γεωθερμικής ενέργειας (earth energy), δηλαδή της θερμότητας που εμπεριέχεται μέσα στα πετρώματα και ρευστά με θερμοκρασία μικρότερη από 25°C . Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση των Γεωθερμικών Αντλιών Θερμότητας (Γ.Α.Θ.). Οι Γ.Α.Θ. αποτελούν μια τυποποιημένη, φιλική προς το περιβάλλον και αξιόπιστη τεχνολογία θέρμανσης-ψύξης, η οποία μπορεί, υπό προϋποθέσεις, να εμφανίσει σημαντικά οικονομικά πλεονεκτήματα και να λειτουργήσει αποτελεσματικά και στον αγροτικό τομέα. Κατά την τελευταία δεκαετία η εγκατάσταση συστημάτων Γ.Α.Θ. στην Ελλάδα κυρίως για αστική θέρμανση και ψύξη, εμφανίζει υψηλούς ρυθμούς αύξησης. Σήμερα καταγράφονται αρκετές εκατοντάδες εφαρμογών με συνολική εγκατεστημένη θερμική ισχύ πάνω από 70 MW [1]. Οι μέσες αποδόσεις των Γ.Α.Θ. κυμαίνονται από 350% (1:3,5) για τα κλειστά κυκλώματα και προσεγγίζουν το 500% (1:5) για τα ανοικτού τύπου κυκλώματα. Οι αποδόσεις αυτές καθιστούν τις Γ.Α.Θ. ως τα πλέον οικονομικά ενεργειακά συστήματα με εξοικονόμηση σε σχέση με άλλες συμβατικές ή ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (π.χ. βιομάζα) έως και 70%.



Σχήμα 1: Θέσεις εφαρμογής γεωθερμικής θέρμανσης φυτειών σπαραγγιού.

Μεταξύ των εκατοντάδων εφαρμογών θέρμανσης-ψύξης με Γ.Α.Θ. στην Ελλάδα, μόλις πέντε αφορούν στη γεωργία, παρά το γεγονός ότι μία από τις πλέον κρίσιμες παραμέτρους βιωσιμότητας των αγροτικών εκμεταλλεύσεων είναι η θέρμανση με στόχο την πρωιμότητα. Οι αιτίες μη επαρκούς εξάπλωσης της συγκεκριμένης τεχνολογίας στον αγροτικό χώρο είναι το υψηλό κόστος εγκατάστασης και η αναγκαιότητα να υπάρχει μεγάλη εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύς. Η πρώτη εφαρμογή υπεδάφιας θέρμανσης με χρήση Γ.Α.Θ. έγινε το 2006 σε φυτεία λευκού σπαραγγιού έκτασης 10 στρεμμάτων στη Χρυσούπολη Καβάλας. Έως σήμερα άλλες τέσσερις αντίστοιχες εφαρμογές στην ίδια περιοχή καλύπτουν συνολικά 180 στρέμματα (τα 70 στρμ. θα τεθούν σε λειτουργία το 2015). Το σπαράγγι δεν επιλέχθηκε τυχαία. Από το 1998 εφαρμόστηκε με επιτυχία η υπεδάφια θέρμανση φυτειών λευκού και πράσινου σπαραγγιού υπό χαμηλή κάλυψη (low-tunnels) με χρήση γεωθερμικών ρευστών χαμηλής ενθαλπίας, στη Νιγρίτα Σερρών, τη Νυμφόπετρα Θεσσαλονίκης και το Νέο Εράσμιο Ξάνθης [2] (σχήμα 1).

Και στις τρεις περιπτώσεις, σε συνολική καλλιεργημένη έκταση 220 στρεμμάτων, χρησιμοποιήθηκαν απ'ευθείας τα γεωθερμικά ρευστά από γεωτρήσεις στα αντίστοιχα γεωθερμικά πεδία. Μετά από δέκα πέντε διαδοχικά παραγωγικά χρόνια γνωρίζουμε επαρκώς τις βασικές θερμοδυναμικές παραδοχές για την διαδικασία πρωίμησης, με διαφορετική αφετηρία κάθε φορά την αρχική θερμοκρασία και τις απαιτούμενες ποσότητες του γεωθερμικού ρευστού. Τα κύρια χαρακτηριστικά των συγκεκριμένων εφαρμογών περιγράφονται στον πίνακα 1.

Το σπαράγγι είναι ένα πολυετές φυτό, του οποίου η καλλιέργεια ευνοείται σε ήπιες κλιματικές συνθήκες όπως αυτές που επικρατούν στη Βόρεια Ελλάδα. Η περίοδος βλάστησης και συγκομιδής του τοποθετείται την Άνοιξη, φυσιολογικά μετά τα μέσα Μαρτίου. Η έναρξη της βλαστικής περιόδου ελέγχεται άμεσα από τη θερμοκρασία του αέρα και την ηλιακή ακτινοβολία, παράμετροι που επηρεάζουν άμεσα τη θερμοκρασία του εδάφους. Στην παρούσα εργασία και με βάση τις πολυετείς παρατηρήσεις και μετρήσεις αναδεικνύεται το γεγονός ότι απαιτούνται θερμοκρασίες εδάφους τουλάχιστον 15°C για 10-15 συνεχείς ημέρες προκειμένου μια φυτεία σπαραγγιού να ξεκινήσει να παράγει. Στην Ελλάδα άνω του 95% της ετήσιας παραγωγής αφορά στο λευκό σπαράγγι, του οποίου η ημερήσια παραγωγική ικανότητα, το μήκος και η διάμετρος των βλαστών εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις διακυμάνσεις των εδαφικών θερμοκρασιών. Η κλίμακα θερμοκρασιών για βέλτιστη παραγωγική ικανότητα τοποθετείται μεταξύ 25,0°C και 35°C. Πάνω από τους 35°C στο έδαφος το αποθηκευτικό σύστημα του φυτού αποκρίνεται δύσκολα και ο ρυθμός ανάπτυξης των βλαστών ελαχιστοποιείται. Αντίστοιχες παρατηρήσεις ισχύουν και για τις φυτείες πράσινου σπαραγγιού.

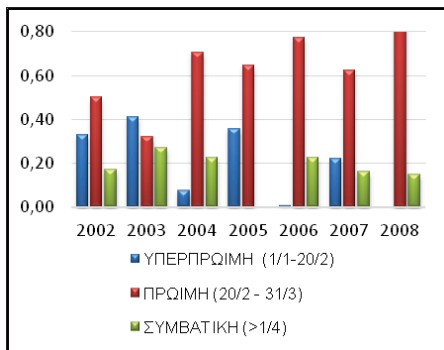
Πίνακας 1: Θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά εφαρμογής υπεδάφιας θέρμανσης σε φυτείες σπαραγγιού με απ'ευθείας χρήση γεωθερμικών ρευστών

ΠΕΡΙΟΧΗ (Γ/Θ ΠΕΔΙΟ)	T°C Γ/Θ Ρευστού (στην είσοδο της εφαρμογής)	Αποδιδόμενη ενέργεια (KWh)/24ωρο/στρέμμα (max τις πρώτες 10-20 ημέρες εφαρμογής: T _{εδαφους} <15°C)	Αποδιδόμενη ενέργεια (KWh)/24ωρο/στρέμμα (μέσος όρος την περίοδο συντήρησης απωλειών. T _{εδαφους} : 20-25°C)	Πρωιμότητα (max-min) (ημέρες)
ΝΕΟ ΕΡΑΣΜΙΟ ΞΑΝΘΗ	58	500-580	300-380	70-50
ΝΥΜΦΟΠΕΤΡΑ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ	42	470-550	240-300	50-35
ΝΙΓΡΙΤΑ ΣΕΡΡΕΣ	32	400-250	200-260	40-30

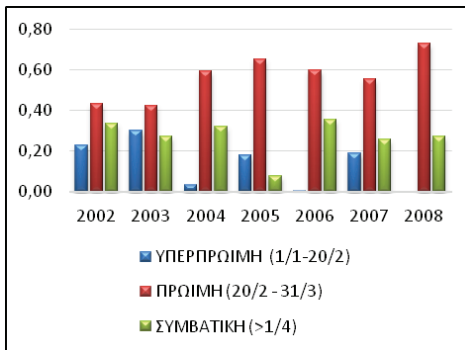
Σύμφωνα με τα στοιχεία του πίνακα 1 έχει επιτευχθεί τεχνητή έναρξη της παραγωγικής διαδικασίας έως και 50 ημέρες σε σχέση με αντίστοιχες μη θερμαινόμενες φυτείες σπαραγγιού της ίδιας χρονιάς και της ίδιας γεωγραφικής ενότητας (Περιφέρεια Α.Μ.Θ.). Το διάστημα αυτό μεταφέρει την παραγωγική διαδικασία όχι στην πρώιμη αλλά στην εκτός εποχής ζώνη. Αποτέλεσμα είναι αφενόθεν επίτευξη υψηλών τιμών πώλησης, αφ'ετέρου η πραγματοποίηση της συγκομιδής υπό ιδιαίτερα δυσμενείς καιρικές συνθήκες. Το σημαντικότερο ίσως πρόβλημα στην περίπτωση της υπερπρωίμισης είναι η δυνατότητα προώθησης του προϊόντος σε μία εποχή που οι καταναλωτές δεν αναζητούν το συγκεκριμένο προϊόν. Όπως φαίνεται στα σχήματα 2 και 3, για τις φυτείες πρώιμου σπαραγγιού ποσοστό 55-73% της ετήσιας παραγωγής παράγεται την περίοδο από 20 Φεβρουαρίου έως 31 Μαρτίου και αυτό το ποσοστό αντιστοιχεί στο 62-85% των ετήσιων εσόδων. Τα παραπάνω δεδομένα δείχνουν τη δυνατότητα για μετατόπιση της παραγωγής και εμπορίας του σπαραγγιού σε μία περίοδο κατά την οποία υπάρχει σημαντική ζήτηση, οι τιμές είναι υψηλές ενώ οι ενεργειακές απαιτήσεις για επίτευξη της πρωιμίσης είναι σχετικά χαμηλές.

Η επίτευξη πρωιμότητας την περίοδο μεταξύ 20/2 και 31/3 απαιτεί προσφορά θερμικής ενέργειας της τάξης των 200- 300 KWh/στρέμμα/24ωρο. Το θερμικό αυτό φορτίο μπορεί να αποδοθεί με υπεδάφια κυκλοφορία (κλειστό κύκλωμα) ρευστών με θερμοκρασία σταδιακά αυξανόμενη από 20°C έως 35°C. Η διαδικασία σταδιακής αύξησης της θερμοκρασίας του ρευστού έχει να κάνει με την αντίστοιχη σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας του εδάφους (T_{αρχ}=9-11°C) των γραμμών φύτευσης υπό χαμηλή κάλυψη. Γεωθερμικά ρευστά χαμηλής ενθαλπίας με θερμοκρασίες 25°C<T<35°C και δυνατότητα άμεσης χρήσης δεν υπάρχουν παντού και όπου υπάρχουν, το νομοθετικό πλαίσιο για αξιοποίησή τους σε περιορισμένη έκταση είναι σχεδόν απαγορευτικό. Μια εναλλακτική στην έλλειψη διαθεσιμότητας γεωθερμικών πόρων είναι η αξιοποίηση του άφθονου και ανανεώσιμου θερμικού δυναμικού

το οποίο βρίσκεται, σχεδόν παντού, αποθηκευμένο στο νερό των ταμειυτήρων μικρού βάθους με τη χρήση της τεχνολογίας των αντλιών θερμότητας.



Σχήμα 2: Κατανομή πωλήσεων πρώιμων φυτειών πράσινου σπαραγγιού στις τρεις εποχιακές ζώνες.



Σχήμα 3: Κατανομή παραγόμενων ποσοτήτων σε φυτεία πρώιμου πράσινου σπαραγγιού στις τρεις εποχιακές ζώνες.

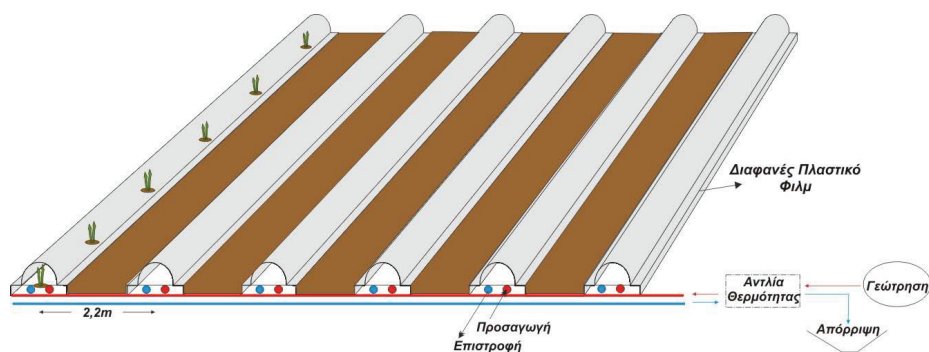
Για πρώτη φορά σε ευρωπαϊκό επίπεδο, από το 2006 έως και σήμερα, επιχειρείται αξιοποίηση σε εκτατική μορφή της αβαθούς γεωθερμίας στον αγροτικό τομέα, στη θέρμανση καλλιέργειών σπαραγγιού υπό χαμηλή κάλυψη στη λεκάνη της Χρυσούπολης Καβάλας. Έχουν ήδη εγκατασταθεί και λειτουργούν τρία μονοβάθμια συστήματα αντλιών θερμότητας νερού-νερού σε τρεις διαφορετικούς αγρούς (δύο των 10 στρ και ενός 17 στρ) και ένα διβάθμιο σύστημα (απορρόφηση θερμικής ενέργειας σε δύο διαδοχικά στάδια), το οποίο αποδίδει ισχύ 900 KW, καλύπτοντας τις θερμικές απαιτήσεις φυτειών σπαραγγιού σε έκταση 70 στρ. Και στις τέσσερις αυτές περιπτώσεις η πηγή απορρόφησης θερμικής ενέργειας είναι το νερό συμβατικών υδρογεωτρήσεων (προϋπαρχουσών ή νέων) από σχετικά αβαθείς ταμειυτήρες (40-100 μ.) και αρχική θερμοκρασία 16-19,5°C. Η μέση απαιτούμενη παροχή νερού ανά στρέμμα προσεγγίζει το 1,3 -1,6m³/h. Η παρούσα εργασία πραγματοποιείται την εγκατάσταση, λειτουργία και τα παραγωγικά και οικονομικά χαρακτηριστικά ενός συστήματος μονοβάθμιας υδροψυκτικής αντλίας θερμότητας σε αγρό καλλιέργειας λευκού σπαραγγιού έκτασης 10 στρμ. στην περιοχή Χρυσούπολης.

2. ΥΛΙΚΑ - ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η εφαρμογή του συστήματος υπεδάφιας θέρμανσης με χρήση γεωθερμικής αντλίας θερμότητας έγινε το 2013 σε ιδιόκτητο αγρό έκτασης 10 στρεμμάτων, 6 χιλ. ΝΑ της Χρυσούπολης στο χωριό Χρυσόχωρι. Ο αγρός έχει τραπεζοειδές σχήμα και μέγιστο μήκος 160 μ. Οι γραμμές φύτευσης έχουν κατεύθυνση Α-Δ σε απόσταση 2,2 μ. μεταξύ τους. Το αγροτεμάχιο καλλιεργείται συστηματικά από το 2010 με λευκό σπαραγγί. Για τις ανάγκες υλοποίησης της πειραματικής εφαρμογής σε φυτεία πράσινου σπαραγγιού, δύο από τις γραμμές φύτευσης διατέθηκαν για συστηματικές καταγραφές και μετρήσεις τόσο των θερμοδυναμικών παραμέτρων όσο και των χαρακτηριστικών παραγωγής. Η μεταφορά θερμότητας στον αγρό γίνεται με θαμένους αγωγούς 1" PE, εκατέρωθεν και κατά μήκος των γραμμών φύτευσης, με κυκλοφορία ζεστού νερού. Οι αγωγοί αυτοί εκκινούν και επιστρέφουν από και προς ένα δισωληνίο σύστημα κεντρικών αγωγών HDPE, διαμέτρου 3", τοποθετημένων σε όρυγμα στο ανατολικό μέτωπο της φυτείας (σχήμα 4).

Οι σωλήνες θέρμανσης της 1" τοποθετούνται στην επιφάνεια του αγρού αμφίπλευρα των στελεχών των φυτών σπαραγγιού σε οριζόντια απόσταση 20 cm από αυτά. Στη συνέχεια κατασκευάζεται ένα χωμάτινο τραπεζοειδές «σαμάρι» πλάτους 60 cm και ύψους 15 cm. Η

διάταξη αυτή καλύπτεται με διαφανές πλαστικό φιλμ, το οποίο στηρίζεται επάνω σε μεταλλικές αψίδες ανοίγματος 60 cmστη βάση και ύψους 45cm.



Σχήμα 4: Σχηματική αποτύπωση της διάταξης θέρμανσης φυτείας πράσινου σπαραγγιού με χρήση υδροψυκτικής αντλίας θερμότητας και αξιοποίηση του νερού υδρογεώτρησης.

Δημιουργείται έτσι ένα χαμηλό τούνελ (lowtunnel), το οποίο λειτουργεί: α) ως μέσον προστασίας της φυτείας από τα καιρικά φαινόμενα (χαλάζι, δυνατός άνεμος, βροχή κ.ά), β) ως μέσον μείωσης των θερμικών απωλειών κατά τη διάρκεια της νύκτας και γ) ως ηλιακός συλλέκτης ο οποίος εγκλωβίζει την θερμική ενέργεια που εισέρχεται κατά τη διάρκεια της ημέρας από την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία. Το σύνολο των πλαστικών αγωγών θέρμανση αποτελεί μέρος του δευτερεύοντος «κλειστού» κυκλώματος της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας. Οι κεντρικές πλαστικές σωλήνες 3” εκκινούν και επιστρέφουν στο κύκλωμα των υψηλών πιέσεων του «συμπυκνωτή» της αντλίας θερμότητας, όπου το νερό θερμαίνεται. Η κυκλοφορία του «θερμού» νερού γίνεται με τη βοήθεια φυγοκεντρικής αντλίας ισχύος 3 KW.

Η πηγή από την οποία γίνεται η απορρόφηση της απαιτούμενης θερμικής ενέργειας είναι το νερό υδρογεώτρησης, η οποία κατασκευάστηκε ως γεώτρηση «ενεργειακού σκοπού» εντός του αγροτεμαχίου σε βάθος 50 μ. Η άντληση της σταθερής παροχής (16 m³/h) νερού, γίνεται με χρήση φυγοκεντρικής αντλίας ισχύος 4KW.

Το αντλούμενο νερό εισέρχεται στο κύκλωμα των «χαμηλών πιέσεων» του εξαμιστή της αντλίας θερμότητας, και στη συνέχεια απορρίπτεται σε γειτονικό στραγγιστικό κανάλι. Το εκμεταλεύσιμο ενεργειακό περιεχόμενο του αντλούμενου νερού προσδιορίζεται από την αρχική σταθερή θερμοκρασία εισόδου των 17°C και την οριακά μεταβαλλόμενη θερμοκρασία εξόδου των 12-13°C σε συνάρτηση με την παροχή του νερού. Η γεωθερμική αντλία θερμότητας είναι μια τυποποιημένη μονοβάθμια βιομηχανική μονάδα, η οποία σχεδιάστηκε σύμφωνα με τα παραπάνω χαρακτηριστικά του νερού ($t_{αρχ.}$ και παροχή) ώστε να αποδίδει στον αγρό των 10 στρεμμάτων συνολική θερμική ισχύ της τάξης των 100 KW, απορροφώντας περί τα 20 KWηλεκτρικής ενέργειας. Η όλη διάταξη είναι εγκατεστημένη εντός μεταλλικού container (φωτό1).

Οι μετρήσεις έγιναν με όργανα και αισθητήρια σε διάφορα στάδια μεταφοράς και απορρόφησης ενέργειας. Στα δύο tollπράσινου σπαραγγιού (θερμαινόμενο και μη θερμαινόμενο) τοποθετήθηκαν από τρία αισθητήρια θερμοκρασίας εκ των οποίων το ένα εντός του εδάφους του επιφανειακού σαμαριού και τα άλλα δύο εντός πλαστικών κλωβών σε ύψος 15 και 25 cmαντίστοιχα από την επιφάνεια του σαμαριού με σκοπό την καταγραφή της διαστρωμάτωσης της θερμοκρασίας του αέρα εντός του toll (φωτό 2).

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η διαδικασία θέρμανσης της φυτείας σπαραγγιού ξεκίνησε στις 19/2/2013 επτά ημέρες μετά την τοποθέτηση των πλαστικών τούνελ πάνω από τις γραμμές φύτευσης. Το διάστημα αυτό επέτρεψε την αρχική προθέρμανση του προστατευμένου εδάφους με αποτέλεσμα την άνοδο της θερμοκρασίας κατά 2°C περίπου, λόγω της ημερήσιας ηλιοφάνειας κατά το διάστημα αυτό. Η θερμοκρασία εκκίνησης του εδάφους και στα δύο σαμάρια (θερμαινόμενο και μη) είναι 10,5°C.

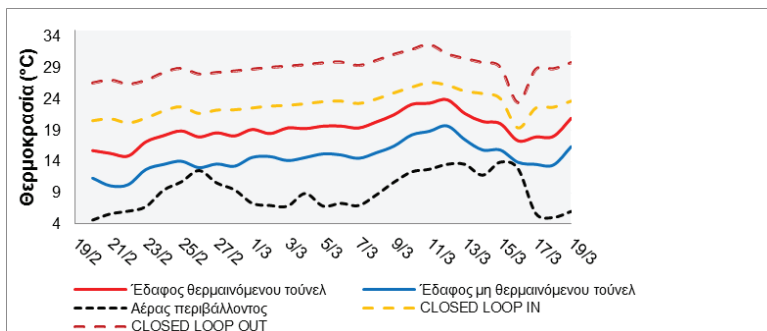


Φωτό 1: Γ/Θ αντλία θερμότητας νερού-νερού 100 KW πλήρως εγκατεστημένη εντός μεταλλικού container.



Φωτό 2: Διάταξη καταγραφής θερμοκρασίας στο έδαφος του σαμαριού και τον αέρα εντός του πλαστικού τούνελ σε φυτεία πράσινου σπαραγγιού.

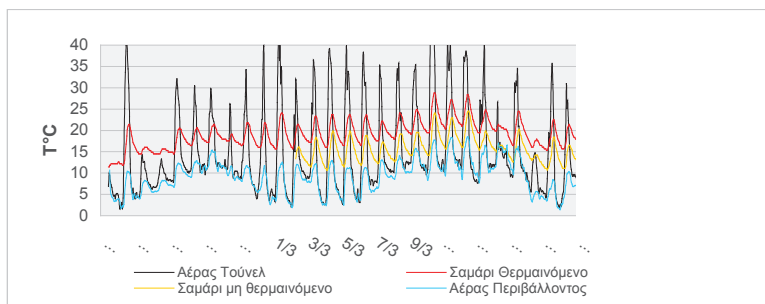
Η θερμοκρασία προσαγωγής του νερού στον αγρό αρχικά ήταν 27°C. Σε δέκα ημέρες συνεχούς λειτουργίας η θερμοκρασία αυξήθηκε στους 29°C, ακολουθώντας μέχρι τη μέγιστη τιμή που ήταν 33°C στις 11/3 μετά από 20 ημέρες συνεχούς λειτουργίας του συστήματος θέρμανσης. Οι επιστροφές του νερού του δικτύου ανακυκλοφορίας διατηρούν σταθερό $\Delta t=6^\circ\text{C}$, γεγονός που οφείλεται στη σταθερή ενεργειακή απόδοση της αντλίας θερμότητας στα 100 KW περίπου. Η σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας του νερού προσαγωγής, παράλληλα με την ενεργειακή προσφορά της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της ημέρας αποτυπώνεται άμεσα στην άνοδο της θερμοκρασίας του εδάφους του θερμαινόμενου τούνελ. Η αντίστοιχη αύξηση της θερμοκρασίας του μη θερμαινόμενου τούνελ οφείλεται αποκλειστικά στην ηλιακή ενέργεια.



Σχήμα 5: Διακύμανση θερμοκρασιών του νερού ανακυκλοφορίας (είσοδος-έξοδος αντλίας θερμότητας) και εδάφους στο θερμαινόμενο και μη θερμαινόμενο τούνελ πράσινου σπαραγγιού.

Η διαφορά στη θερμοκρασία του εδάφους των δύο μεταχειρίσεων είναι άμεση και διατηρείται σταθερή καθ'όλη τη διάρκεια της εφαρμογής, στους 5°C (σχήμα 5). Η ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας λαμβάνει τις μέγιστες τιμές την περίοδο από 7/3 έως και 13/3 (2,8 έως 4,8 KW/m²). Το διάστημα αυτό και κατά τη διάρκεια της ημέρας η θερμοκρασία του αέρα στο εσωτερικό των πλαστικών τούνελ φθάνει σε τιμές από 33°C έως και 45°C (σχήμα 6). Το εσωτερικό αυτό πέραν της συσσώρευσης θερμικής ενέργειας δημιουργεί στο έδαφος των δύο τούνελ σημαντική διαφορά θερμοκρασιών μεταξύ ημέρας και νύκτας, η οποία στην περίπτωση του θερμαινόμενου τούνελ μεταβάλλεται από 3°C έως 8°C ενώ στην περίπτωση του μη θερμαινόμενου από 3°C έως και 12°C.

Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι η απότομη διαφοροποίηση του προφίλ της θερμοκρασίας του εδάφους των σαμαριών. Από τις 25/2 έως τις 6/3 η θερμοκρασία στο έδαφος διατηρείται σταθερή στους 14-15°C στο μη θερμαινόμενο τούνελ και στους 18-19°C στο θερμαινόμενο αντίστοιχα. Από τις 7/3 έως και τις 13/3 παρατηρείται βαθμιαία άνοδος της θερμοκρασίας που στο θερμαινόμενο τούνελ φθάνει τους 25°C και στο μη θερμαινόμενο τους 20°C. Οι μεταβολές αυτές της θερμοκρασίας του εδάφους και οι σημαντικές μεταβολές μεταξύ ημέρας και νύκτας επηρεάζουν το ρυθμό ανάπτυξης των βλαστών του σπαραγγιού.

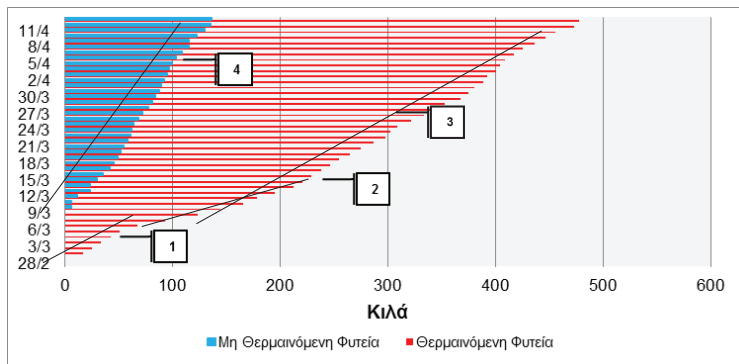


Σχήμα 6: Διακύμανση θερμοκρασιών του εδάφους στο θερμαινόμενο και μη θερμαινόμενο τούνελ πράσινου σπαραγγιού.

Ο ρυθμός ανάπτυξης ενός βλαστού σπαραγγιού (cm/ημέρα) είναι μία από τις παραμέτρους που σε συνδυασμό με τη διάμετρο και τον αριθμό των βλαστών διαφοροποιούν την παραγωγική απόδοση ενός αγρού. Με εδαφικές θερμοκρασίες έως και 15°C ο ρυθμός ανάπτυξης παραμένει πολύ μικρός (<1cm/ημέρα). Με θερμοκρασίες από 16°C έως 20°C για τουλάχιστον 10 συνεχόμενες ημέρες το φυτό εισέρχεται σε κανονικούς ρυθμούς ανάπτυξης (1,5-2 cm/ημέρα). Ο ρυθμός ανάπτυξης αυξάνεται απότομα με θερμοκρασίες εδάφους 20-25°C (3-3,5 cm/day) και μεγιστοποιείται για θερμοκρασίες 25-34°C (>4,5 cm/ημέρα).

Τα παραπάνω αποτυπώνονται στις κλίσεις (τάσεις) των διαφορετικών τμημάτων των αθροιστικών καμπυλών ημερήσιας παραγωγής για το θερμαινόμενο και μη θερμαινόμενο τούνελ πράσινου σπαραγγιού. Η μεταβολή της εδαφικής θερμοκρασίας διαφοροποιεί την ημερήσια παραγωγικότητα. Στο σχήμα 7 οι κλίσεις των γραμμών 1, 2 και 3 δείχνουν τον σταθερά μεγαλύτερο ρυθμό αύξησης της παραγωγής στο θερμαινόμενο τούνελ σε σχέση με τον αντίστοιχο ρυθμό στο μη θερμαινόμενο. Επίσης η κλίση της γραμμής 2 είναι ενδεικτική της ιδιαίτερα μεγάλης αύξησης της ημερήσιας παραγωγής στο θερμαινόμενο τούνελ, το διάστημα από 7/3 έως 12/3, το οποίο συμπίπτει με την βαθμιαία άνοδο της θερμοκρασίας εδάφους από τους 20°C στους 25°C. Με δεδομένο τη διακύμανση των θερμοκρασιών του εδάφους παρατηρούμε ότι η έναρξη συγκομιδής σπαραγγιού στο θερμαινόμενο τούνελ είναι στις 28/2, εννέα ημέρες από την έναρξη θέρμανσης και με θερμοκρασίες εδάφους σταθερά πάνω από 15°C καθ'όλη την περίοδο αυτή. Αντίθετα στο μη θερμαινόμενο τούνελ η συγκομιδή ξεκινά στις 12/3, και με θερμοκρασίες εδάφους σταθερά πάνω από 13°C για 20 συνεχείς ημέρες. Οι ρυθμοί ανάπτυξης στα δύο τούνελ είναι τελείως διαφορετικοί με αποτέλεσμα, στο τέλος της πρώιμης περιόδου καταγραφής των ημερήσιων παραγωγών

(31/3/13) τα συνολικά συγκομισθέντα κιλά του θερμαινόμενου τούνελ να είναι κατά 423% περισσότερα από τα αντίστοιχα του μη θερμαινόμενου τούνελ. Τα παραγωγικά αυτά δεδομένα, όπως φαίνονται στον πίνακα 3, αφορούν στο σύνολο της πρώιμης περιόδου και στο 50% περίπου της μέγιστης παραγωγικής απόδοσης ενός συμβατικού στρέμματος φυτείας πράσινου σπαραγγιού. Το σύστημα θέρμανσης αποδίδει κατά τη διάρκεια της εφαρμογής 100-110 KW θερμικής ισχύος στο δευτερεύον κύκλωμα (κλειστός βρόχος). Στο πρωτεύον κύκλωμα της αντλίας θερμότητας (ανοικτός βρόχος) απορροφάται από το νερό της γεώτρησης θερμική ισχύς της τάξης των 75-85 KW. Σύμφωνα με τις μετρήσεις του αναλυτή ενέργειας, η απορροφούμενη ηλεκτρική ισχύς από το σύνολο των συσκευών της διάταξης θέρμανσης είναι 26-27 KW. Η κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος από τους δύο συμπιεστές (παράλληλη διάταξη) της αντλίας θερμότητας είναι 19-20 KW (προκύπτει από τα 26-27 KW απορροφούμενης ισχύος αφού αφαιρεθεί η κατανάλωση των αντλιών της γεώτρησης και της κυκλοφορίας) (σύνολο 7 KW). Με δεδομένο τα παραπάνω διαμορφώνεται ένας μέσος μικτός συντελεστής απόδοσης της αντλίας θερμότητας στο επίπεδο του 4. Ο αντίστοιχος καθαρός συντελεστής απόδοσης (δεν συνυπολογίζεται η απορροφούμενη ισχύς από τις δύο αντλίες) προσεγγίζει το 5.

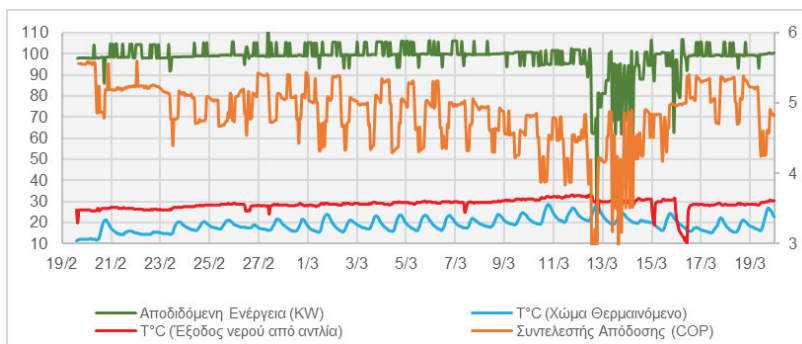


Σχήμα 7: Αθροιστικές καμπύλες ημερήσιας παραγωγής πράσινου σπαραγγιού σε θερμαινόμενο και μη θερμαινόμενο τούνελ.

Σύμφωνα με τα συγκεντρωτικά δεδομένα του πίνακα 2, η συνολική ενέργεια που απορροφήθηκε από το σύστημα θέρμανσης κατά τη διάρκεια της περιόδου πρωίμησης ανήλθε στις 24.000 KWh εκ των οποίων 17.700 KWh από την αντλία θερμότητας και 6.300 KWh από τις δύο αντλίες νερού. Με δεδομένο ότι αποδόθηκαν στον θερμαινόμενο αγρό (10 στρέμματα) συνολικά 81.000 KWh, ο ολικός συντελεστής απόδοσης (αρχή-τέλος) διαμορφώθηκε στο 3,5 (μικτός) και στο 4,8 (καθαρός).

Πίνακας 2: Ενεργειακά και θερμοκρασιακά αποτελέσματα του συστήματος θέρμανσης (10 στρ.)					
Περίοδος μετρήσεων (19/2/13 – 31/3/13)	Πρωτεύον Κύκλωμα (Ανοικτός βρόχος)	Δευτερεύον Κύκλωμα (Κλειστός βρόχος)	Αντλία θερμότητας	Χώμα θερμαινόμενου σπαραγγιού (τούνελ)	Χώμα μη θερμαινόμενου σπαραγγιού (τούνελ)
T°C (είσοδος)(min-max)	17 (νερό γεώτρησης)	21-27	21-27		
T°C (έξοδος)(min-max)	12-13 (νερό γεώτρησης)	27-33	27-33		
T°C (min-max)				10,5 – 28,7	10,5 - 24,3
Παροχή νερού (lt/h)	15500	13900			
Απορροφούμενη ισχύς (KWe)	4 (αντλία γεώτρησης)	3 (κυκλοφορητής)	19-20 (αντλία θερμότητας)		
Αποδιδόμενη ισχύς (KWh)			100-110		
Ενέργεια απορροφηθείσα (KWh) (συνολικά)	6300		17700		
Ενέργεια αποδοθείσα (KWh)			81000		

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η διαφοροποίηση του συντελεστή απόδοσης, ο οποίος μεταβάλλεται σύμφωνα με τη θερμοκρασία του επιστρεφόμενου νερού από τον αγρό (δηλαδή από τη θερμοκρασία του εδάφους). Είναι χαρακτηριστικό ότι ο συντελεστής απόδοσης λαμβάνει σταδιακά από τις 7/3 έως και τις 12/3 τις χαμηλότερες τιμές (σχήμα 8). Την περίοδο αυτή η θερμοκρασία του εδάφους λαμβάνει τις υψηλότερες τιμές (20-25°C) και οι επιστροφές του κλειστού βρόχου τους 33°C, γεγονός που αναγκάζει τους δύο συμπιεστές να εργάζονται προοδευτικά σε υψηλότερες πιέσεις και άρα με μεγαλύτερη κατανάλωση ισχύος για να αποδώσουν τη ζητούμενη αύξηση θερμοκρασίας του νερού στο κλειστό κύκλωμα.



Σχήμα 8: Μεταβολή ενεργειακών παραμέτρων του συστήματος θέρμανσης με χρήση αντλίας θερμότητας.

Τα δεδομένα παραγωγής στο τέλος της πρώιμης περιόδου είναι αξιοσημείωτα (πίνακας 3). Η συνολική παραγωγή του θερμαινόμενου αγρού έως 31/3 είναι 3.808 κιλά/10 στρέμματα, ενώ η αντίστοιχη του μη θερμαινόμενου αγρού 900 κιλά/10 στρέμματα. Η πρόσσοδος στις δύο περιπτώσεις είναι 13.400 και 3.150 ευρώ αντίστοιχα. Μετά την αφαίρεση του κόστους ενέργειας η καθαρή πρόσσοδος του θερμαινόμενου αγρού, για την πρώιμη περίοδο μόνον, προσεγγίζει τις 11.400 ευρώ. Το ετήσιο λειτουργικό όφελος (προ αποσβέσεων) της διαδικασίας πρώιμησης για ένα αγρό 10 στρεμμάτων προσεγγίζει τις 8.000-9.000 ευρώ. Το παραπάνω οικονομικό αποτέλεσμα, το οποίο επαναλαμβάνεται με κάποιες αναμενόμενες διακυμάνσεις τα τελευταία 15 χρόνια, καταδεικνύει τη βιωσιμότητα της επένδυσης:

- Καθαρή παρούσα αξία της επένδυσης (NPV): 80.000 – 90.000 ευρώ
- Έντοκη περίοδος αποπληρωμής: 2,7 – 4,1 έτη
- Εσωτερικός βαθμός απόδοσης κεφαλαίου (IRR): 26% - 40%

Περίοδος καταγραφών (19/2/13 – 31/4/13)	Θερμαινόμενη φυτεία σπαραγγιού (τούνελ)	Μη θερμαινόμενη φυτεία σπαραγγιού (τούνελ)	Επιχορήγηση 40%	Χωρίς Επιχορήγηση
Έναρξη Θέρμανσης	19/2/2013			
Έναρξη Συγκομιδής	28/2/2013	9/3/2013		
Σύνολο παραγωγής (Kg)	3820	9008		
Εκροές (euros)	13.400	3.150		
Κόστος ενέργειας (euros)	2.000			
Ετήσιο λειτουργικό Όφελος (euros)	11.400			
Αρχικό κόστος επένδυσης	30.000		18.000	30.000
Έντοκη περίοδος αποπληρωμής (έτη)			2,7	4,1
Καθαρή Παρούσα Αξία			90.000	80.000
Εσωτερικός Συντελεστής απόδοσης Κεφαλαίου			39,95%	26,42%

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η χρήση γεωθερμικών αντλιών θερμότητας στην πρωίμηση καλλιέργειας πράσινου σπαραγγιού υπό χαμηλή κάλυψη (low tunnels), είναι μια ιδιαίτερα αποδοτική γεωργική εφαρμογή. Για μετεωρολογικές συνθήκες όπως αυτές της περιοχής Χρυσούπολης Καβάλας, αρκούν 11-12 KW/στρέμμα για να πρωιμίσει μια θερμαινόμενη φυτεία σπαραγγιού σε σχέση με μία μη θερμαινόμενη κατά 15-20 ημέρες. Ένα εξαιρετικό κρίσιμο μέγεθος είναι το ότι σε μια θερμαινόμενη καλλιέργεια σπαραγγιού ποσοστό μεγαλύτερο από 80% της συνολικής ετήσιας παραγωγής ενός αγρού συγκομίζεται εντός της πρώιμης περιόδου μεταξύ 20/2 και 31/3. Το ποσοστό αυτό για μια μη θερμαινόμενη καλλιέργεια δεν ξεπερνά το 20%.

Αντλίες θερμότητας νερού-νερού έχουν εγκατασταθεί και λειτουργούν αποτελεσματικά από το 2006 σε πέντε φυτείες σπαραγγιού συνολικής έκτασης 110 στρεμμάτων στην ευρύτερη περιοχή της Χρυσούπολης. Η συνολική εγκατεστημένη θερμική ισχύς ανέρχεται στα 1300 KW. Η μέγιστη απορροφούμενη ηλεκτρική ισχύς προσεγγίζει τα 250 KW. Η πηγή της απορροφούμενης θερμικής ενέργειας είναι το νερό υδρογεωτρήσεων βάθους από 30 έως 100 μ., με εκμεταλλεύσιμες παροχές από 15 έως 80 m³/h και θερμοκρασία από 16 έως 19,5°C. Όταν η θερμοκρασία του νερού είναι μεγαλύτερη από 18°C, η απορρόφηση της θερμικής ενέργειας μπορεί να γίνεται σε διαδοχικά στάδια με διατάξεις εξάτμισης-συμπύκνωσης τοποθετημένες εν σειρά. Η διάταξη αυτή βελτιστοποιεί την ενεργειακή απόδοση του υδατικού πόρου και εξασφαλίζει την ορθολογική διαχείρισή του. Με θερμοκρασίες προσαγωγής στους αγρούς της τάξης των 30-35°C και συντελεστή απόδοσης (C.O.P) μεταξύ 3,5 και 4,5, επιτυγχάνεται πρωίμηση της τάξης των 15-25 ημερών σε σχέση με τις μη θερμαινόμενες φυτείες. Η σκοπιμότητα και η οικονομική βιωσιμότητα της ενεργειακής αξιοποίησης των εκτεταμένων υδροταμιευτήρων μικρού βάθους με θερμοκρασίες μεταξύ 15 και 25°C στο σύνολο των μεγάλων σύγχρονων ιζηματογενών λεκανών της χώρας, αποδεικνύεται πολύ ελκυστική και στον αγροτικό τομέα.

Η προστιθέμενη αξία λόγω πρωιμότητας καθιστά ιδιαίτερα ανταγωνιστική την όποια θερμαινόμενη αγροτική παραγωγή, εντατική ή εκτατική, όπως αυτή του σπαραγγιού. Επιπλέον, η ήπια πρωίμηση δεν φαίνεται να έχει καμία επίπτωση στη στρεμματική απόδοση των φυτειών σπαραγγιού (750-850 κιλά/στρέμμα/έτος). Οι πέντε φυτείες σπαραγγιού στην περιοχή της Χρυσούπολης, συνολικής έκτασης 110 στρεμμάτων οι οποίες θερμαίνονται με χρήση γεωθερμικών αντλιών, αποδίδουν συστηματικά τα τελευταία πέντε χρόνια από 800€ έως 1200€/στρέμμα επιπλέον καθαρή αξία πωληθέντων σε σχέση με τις αντίστοιχες μη θερμαινόμενες φυτείες, οι οποίες χρησιμοποιούνται και ως μέτρο σύγκρισης. Έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον η μεταφορά της παραπάνω τεχνολογίας στη θέρμανση και πρώιμη παραγωγή και άλλων αγροτικών προϊόντων όπως: φυλλώδη λαχανικά, φράουλα, φασολάκι, καρπούζι και άλλα πολλά. Η τεχνική θέρμανσης με αξιοποίηση της αβαθούς γεωθερμίας μπορεί να μεταφερθεί και σε θερμοκηπιακές καλλιέργειες [3]. Η περίπτωση αυτή χρειάζεται οικονομοτεχνική διερεύνηση, καθώς το μέγεθος της εφαρμογής οριοθετείται από την απαιτούμενη υψηλή εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύ, τον τύπο της καλλιέργειας και το γεγονός ότι η αντλία θερμότητας θα πρέπει να αποδίδει υψηλές θερμοκρασίες.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Andritsos, N., Dalabakis, P., Karydakos, G., Kolios, N., Fytikas, M. (2011) Characteristics of low-enthalpy geothermal applications in Greece. *Renewable Energy*, Volume 36, Issue 4, April 2011, Pages 1298-1305
- [2] Dalabakis, P., Kolios, N., Ilias, A., Panagopoulos, A., Xanthopoulos, S. (2004) Asparagus early season production using low enthalpy geothermal energy in Neo Erasmio-Xanthi, Greece, Συνέδριο ΓΕΑΙΑ, 2-3 Μαΐου, Αθήνα.
- [3] Δαλαμπάκης, Π., Ηλίας, Α. (2011) Γεωθερμικές αντλίες θερμότητας. Μια οικονομική και περιβαλλοντικά φιλική ενεργειακή λύση. Ενδιαφέρουσες εφαρμογές στον αγροτικό τομέα. Τριμηνιαία Έκδοση του ΕΘ.Ι.ΑΓ.Ε, Τεύχος 42

ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟ ΠΕΔΙΟ ΑΡΙΣΤΗΝΟΥ- ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΗΣ - ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΙ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ

Π. Δαλαμπάκης¹, Α. Ηλίας¹, Ν. Ανδρίτσος², Σ. Ξανθόπουλος³,
Α. Χριστοφορίδης³

¹ Ινστιτούτο Εγγείων Βελτιώσεων, Ελληνικός Γεωργικός Οργανισμός «Δήμητρα»,
57400 Σίνδος, Θεσσαλονίκη, e-mail: dalabakis.lri@nagref.gr

² Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Πεδίον
Άρεως, 383 34, Βόλος, e-mail: nandrits@uth.gr

³ Alteren Ενέργεια και Περιβάλλον Α.Ε., Καλλιρρόης 2, 55535 Πυλαία, e-mail:
spiros@alteren.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

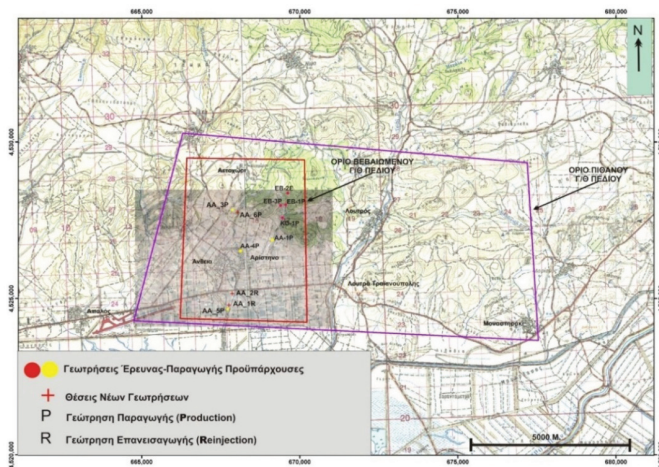
Το βεβαιωμένο γεωθερμικό πεδίο Αρίστηνου-Αλεξανδρούπολης καλύπτει έκταση περίπου 20 km² και εκτείνεται δυτικά των θερμοπηγών της Τραϊανούπολης. Με βάση την έως σήμερα γεωτρητική έρευνα έχει αποτυπωθεί το σημαντικό, σε έκταση και ποιότητα, γεωθερμικό ενδιαφέρον της περιοχής σε βάθη έως 400 m και θερμοκρασίες από 32 °C έως και 90 °C. Η δοκιμαστική άντληση της γεώτρησης AA-3Π έδειξε ότι είναι εφικτή παροχή της τάξης των 90-100 m³/h ανά παραγωγική γεώτρηση. Η χημική διερεύνηση του βαθύτερου και θερμότερου ταμειυτήρα αποτυπώνει ότι τα γεωθερμικά ρευστά ανήκουν στον τύπο Na-Cl με TDS που αγγίζει τα 10,5 g/l και σχετικά υψηλές συγκεντρώσεις σε ιόντα Ca²⁺ και SO₄²⁻. Από την αξιολόγηση της σύστασης των γεωθερμικών νερών προκύπτει ότι τα περισσότερα ρευστά δεν παρουσιάζουν σαφή τάση για δημιουργία αποθέσεων CaCO₃, παρουσιάζουν όμως τάση για διάβρωση, κάτι που θα πρέπει να ληφθεί υπόψη στην επιλογή των υλικών. Η πρώτη φάση αξιοποίησης αφορά σε θερμικά φορτία της τάξης των 10 MW_t για τις παρακάτω χρήσεις: τηλεθέρμανση 12 κτιρίων δημοσίου ενδιαφέροντος στους οικισμούς Αρίστηνο και Άνθεια και τηλεθέρμανση θερμοκηπιακών μονάδων καλλιέργειας κηπευτικών (50 στρμ.) και καλλιέργειας μικροφυκών (15 στρμ.). Η διαχείριση των γεωθερμικών ρευστών θα γίνεται μέσω ενός κεντρικού θερμικού σταθμού με τρεις πλακοειδείς εναλλάκτες θερμότητας και τοπικούς θερμικούς σταθμούς σε κάθε χρήση. Το γεωθερμικό ρευστό μετά την μετάδοση της θερμικής του ενέργειας θα οδηγείται σε διάταξη δύο γεωτρήσεων επανεισαγωγής.

Λέξεις Κλειδιά: Γεωθερμία χαμηλής ενθαλπίας, Χημισμός ρευστών, Τηλεθέρμανση, Διαχείριση ρευστών

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το γεωθερμικό πεδίο χαμηλής ενθαλπίας στην περιοχή Άνθειας-Αρίστηνου του Δήμου Αλεξανδρούπολης (σχήμα 1) αποτελεί την ανατολικότερη απόληξη μιας σειράς σημαντικών γεωθερμικών πεδίων, στον βορειοελλαδικό χώρο, από τη λεκάνη του Στρυμόνα έως τα νότια δυτικά περιθώρια της εκτεταμένης ιζηματογενούς λεκάνης του Δέλτα του ποταμού Έβρου. Το κυριότερα γεωθερμικά δεδομένα από την περιοχή προέρχονται από την εκτεταμένη έρευνα, του ΙΓΜΕ κατά την περίοδο 1999-2001 [1]. Το γεωθερμικό ενδιαφέρον της περιοχής συνδέεται με την ευνοϊκή στρωματογραφία, την ενεργό τεκτονική με ρήγματα διεύθυνσης N70° και N160°, την αναθόλωση των ισόθερμων καμπυλών προς την επιφάνεια, την ηφαιστειακή δραστηριότητα και τις ηφαιστειακές διεισδύσεις, οι οποίες συνδέονται με την παραγωγή θερμότητας. Στην κύρια ζώνη γεωθερμικού ενδιαφέροντος απαντούν ηφαιστειακά οικοδομήματα και λάβες και πυροκλαστικά της Ολιγο-Μειοκαινικής περιόδου με έντονα εξαλλοιωμένες ζώνες από δευτερογενή υδροθερμική δράση.

Συνολικά κατασκευάστηκαν έως σήμερα 14 γεωτρήσεις έρευνας-παραγωγής σε μια ακτίνα 5.000 m, καλύπτοντας έτσι μια ευρεία περιοχή συνολικής έκτασης άνω των 20.000 m². Τα βάθη των γεωτρήσεων ποικίλλουν από 120 m έως και 420 m. Το βάθος της οροφής του κύριου γεωθερμικού ταμιευτήρα διαφοροποιείται σταδιακά και προσδιορίζεται, με τα έως σήμερα δεδομένα, από τα 240 m έως και τα 400 m σε μια διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ σύμφωνα με μια διάταξη κλιμακωτής βύθισης των γεωλογικών σχηματισμών από τα ΒΔ περιθώρια της λεκάνης προς τα ΝΑ τμήματα αυτής.



Εικόνα 1: Όρια βεβαιωμένου και πιθανού γεωθερμικού πεδίου Αρίστηνου-Αλεξανδρούπολης (κλίμακα 1:50.000)

Τα δεδομένα από τις θερμομετρήσεις των παραπάνω γεωτρήσεων αποτυπώνουν (σχήμα 2) την κατανομή των θερμοκρασιών της οροφής του γεωθερμικού ταμιευτήρα [1]. Οι μέγιστες θερμοκρασίες (89-90 °C) καταγράφονται στο βόρειο τμήμα του γεωθερμικού πεδίου στην περιοχή εμφάνισης των εξαλλοιωμένων ηφαιστειακών διεισδύσεων και οικοδομημάτων (Λύκος και Πασά Λόφος) και περιφερειακά αυτών σε συνδυασμό με τις διασταυρούμενες ζώνες των ενεργών ρηγμάτων διεύθυνσης B70° και B160°.

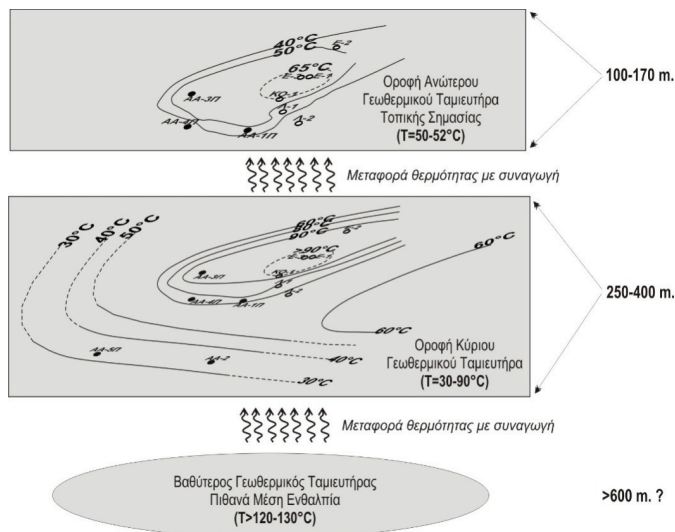
Η δυναμική του παραγωγικού γεωθερμικού σχηματισμού (κύρια διαρρηγμένοι υαλοκλαστίτες) προσεγγίσθηκε για πρώτη φορά το 2013 με την δοκιμαστική άντληση διάρκειας 48 ωρών στην θερμότερη παραγωγική γεώτρηση ΑΑ-3Π. Με σταθερή παροχή στα 90 m³/h και δυναμική στάθμη άντλησης στα 42 m, η συγκεκριμένη γεώτρηση εμφανίζει υδραυλικά χαρακτηριστικά, τα οποία ικανοποιούν τις συνθήκες μακρόχρονης άντλησης.

Ο αρχικός σχεδιασμός για την αξιοποίηση του γεωθερμικού πεδίου Αρίστηνου-Αλεξανδρούπολης βασίζεται στην υπόθεση για αποληψιμότητα τουλάχιστον 150 m³/h με θερμοκρασία νερών 89 °C και θερμοκρασία απόρριψης 32 °C. Με τα έως σήμερα παραγωγικά δεδομένα το παραπάνω σενάριο προϋποθέτει την ανόρυξη τουλάχιστον μιας νέας γεώτρησης. Για λόγους ασφαλούς ανεύρεσης παρόμοιων με τη γεώτρηση AA-3Π γεωλογικών και υδραυλικών χαρακτηριστικών και ορθολογικής συνεκμετάλλευσης, η δεύτερη γεώτρηση θα κατασκευαστεί σε σχετικά μικρή απόσταση (170 m ανατολικότερα) από την υπάρχουσα και σε βάθος κατά 90 m μεγαλύτερο από αυτήν (450 m).

2. ΕΡΕΥΝΑ ΤΟΥ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

2.1. ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ – ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Με τη γεωθερμική έρευνα στην περιοχή Αρίστηνου Έβρου [1] διερευνήθηκε ένας εκτεταμένος γεωθερμικός χώρος στα Δυτικά της Λεκάνης του Δέλτα του ποταμού Έβρου. Στις παρυφές της λεκάνης, σε μια περιοχή όπου αναπτύσσονται βαθύτερα ιζήματα, παράλληλα με ηφαιστειακά προϊόντα, εντοπίστηκε ένας χώρος γεωθερμικού ενδιαφέροντος έκτασης τουλάχιστον 20 km² στην πεδινή και λοφώδη έκταση Άνθειας–Αρίστηνου–Αετοχωρίου. Ο ταμειυτήρας βρίσκεται σε βάθη 250-450 m μέσα σε πυροκλαστικά ηφαιστειακά προϊόντα, με θερμοκρασίες ρευστών που πλησιάζουν τους 90°C και χημική σύσταση Na-Cl.



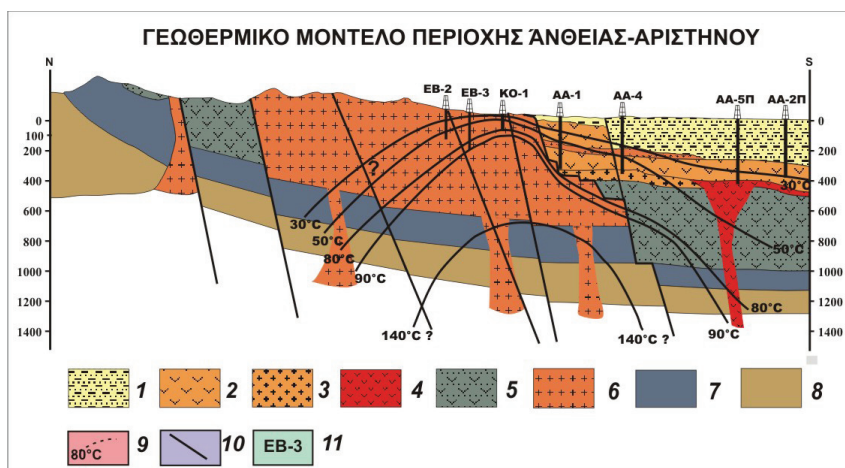
Εικόνα 2: Κατανομή των ισόθερμων καμπυλών του ανώτερου και κατώτερου υδροθερμικού συστήματος του γεωθερμικού πεδίου Αρίστηνου-Αλεξανδρούπολης.

Στην περιοχή του κύριου γεωθερμικού ενδιαφέροντος και σε βάθη από 100 έως 150 m περίπου, αναπτύσσεται δεύτερο υδραυλικό σύστημα με θερμοκρασίες 50-52°C. Η κατανομή των ισόθερμων καμπυλών (σχήμα 2) του ανώτερου και του κατώτερου γεωθερμικού ταμειυτήρα με το βάθος αποτυπώνει τη μορφή μιας θερμικής διεύθυνσης, εντοπισμένης στη ζώνη εμφάνισης των μαγματικών σχηματισμών και στο χώρο, όπου οι κύριες ζώνες ρηγμάτων διαμορφώνουν τις νεότερες τεκτονικές ανακατατάξεις στην περιοχή. Η θερμική ανωμαλία φαίνεται ότι εξελίσσεται ομαλότερα προς τα βόρεια, προς το χώρο επαναφόρτισης του υδραυλικού συστήματος. Νοτιότερα και στα βαθύτερα και στα βαθύτερα ταμειυτήρες με θερμοκρασία έως 32°C αναπτύσσονται στη βάση των Νεογενών σχηματισμών και σε βάθος άνω των 350 m. Με βάση τα γεωχημικά γεωθερμόμετρα και τις ισορροπίες της διαλυτότητας φαίνεται ότι θερμοκρασίες της τάξης των 140 °C είναι πιθανόν να αποτελούν τις

θερμοκρασίες του αρχικού γεωθερμικού ρευστού. Με βάση την ανάπτυξη της γεωθερμικής βαθμίδας στο χώρο, είναι πολύ πιθανό ρευστά αυτού του τύπου να βρίσκονται σε βάθη άνω των 600 m, που στη νοτιότερη περιοχή θα πρέπει να αναπτύσσονται σε βάθη της τάξεως των 1000 m, αλλά με θερμοκρασίες μικρότερες ίσως και από 80°C (σχήμα 3).

2.2. ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ - ΟΙ ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ ΕΡΕΥΝΑΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

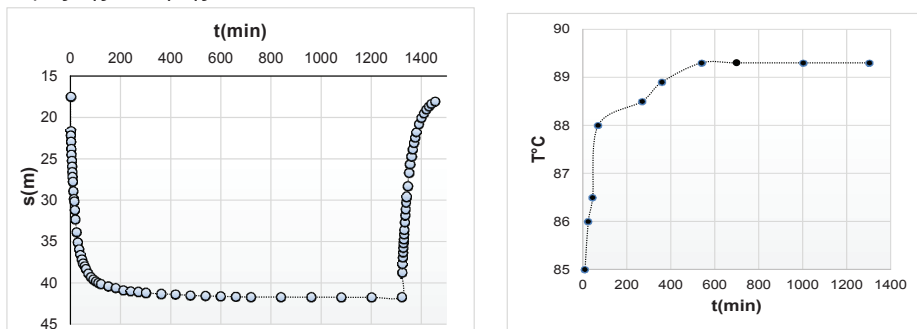
Σύμφωνα με τα έως σήμερα δεδομένα οι γνώσεις μας για τις παραγωγικές δυνατότητες του Γ/Θ πεδίου και τα υδραυλικά χαρακτηριστικά των ταμιευτήρων είναι πολύ περιορισμένες και ασαφείς. Ο ανώτερος υδροφορέας μπορεί να αποδώσει με ασφάλεια 15-18 m³/h με θερμοκρασία νερών 52 °C. Τα χαρακτηριστικά αυτά αφορούν στη ζώνη βόρεια του χωριού Αρίστηνο (γεώτρηση AA-1P). Σε ότι αφορά τον κύριο και βαθύτερο γεωθερμικό ταμιευτήρα, σειρά γεωτρήσεων (EB-3, AA-3, AA-4 και AA-5) αποτυπώνουν την στρωματογραφία, την διάταξη των υδροφόρων ζωνών, την κατανομή των θερμοκρασιών σε μια τομή Β-Ν και μήκος >5000 m. Ιδιαίτερη μνεία οφείλουμε να κάνουμε για την παραγωγική γεώτρηση AA-3P.



Εικόνα 3: Υδροθερμικό μοντέλο του γεωθερμικού πεδίου Αρίστηνου-Αλεξανδρούπολης (1: Ερυθροί άμμοι, αργιλικό άμμοι, χαλίκια, κροκάλες, λατύπες (Πλειστόκαινο), 2: Αργίλοι, Χαλίκια και Κροκάλες ηφαιστειακής προέλευσης (Μειόκαινο), 3: Εξαλιωμένοι άμμοι, μάργες και λεπτομερείς ψαμίτες, όξινοι τόφφοι (Ολιγόκαινο), 4: Ρυόλιθοι (Ολιγόκαινο), 5: Ασβεστοαερίνες Νίψας, τόφφοι και τοφφίτες (Άνω Ηώκαινο), 6: Ανδεσπικοί θόλοι (Άνω Ηώκαινο), 7: Νουμουλικό ασβεστόλιθοι (Μέσω Ηώκαινο), 8: Σειρά αργιλικών μαργών (Μέσω Ηώκαινο), 9: Ισόθερμες καμπύλες οροφής υποβάθρου, 10: Ρήγματα, 11: Γεωτρήσεις έρευνας-παραγωγής) (Πηγή: Kolios et al. [1], Τροποποιημένο)

Η γεώτρηση αυτή σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε σύμφωνα με τα στοιχεία της ερευνητικής γεώτρησης AA-3 και με δεδομένο τις υψηλές θερμοκρασίες, την υψηλή γεωθερμική βαθμίδα (21 °C/100 m), τον εντοπισμό υδροφόρων ζωνών στους ηφαιστειοκλαστικούς σχηματισμούς, σε βάθος 360 m. Όπως προκύπτει από την στρωματογραφική ανάλυση της λιθολογικής στήλης της ερευνητικής γεώτρησης AA-3, η παραγωγική σωλήνωση της γεώτρησης AA-3P, οριακά μόνον, εισέρχεται εντός του παραγωγικού σχηματισμού (6-10 m) των διαρρηγμένων υαλοκλασιτών, οι οποίοι αναπτύσσονται για άλλα 80 m τουλάχιστον στην συγκεκριμένη ζώνη. Το τελευταίο αποτυπώνει την αβεβαιότητα, αλλά και τις ελπίδες για κάτι πιθανά πολύ σημαντικότερο με τα έως σήμερα δεδομένα, σχετικά με το διαθέσιμο και εκμεταλλεύσιμο γεωθερμικό δυναμικό. Για πρώτη φορά το 2013 δοκιμάζεται η παραγωγική ικανότητα της γεώτρησης AA-3P με συστηματική δοκιμή άντλησης τόσο κατά βαθμίδες, όσο και σταθερής παροχής διάρκειας 48 ωρών. Με την βηματική αύξηση της αντλούμενης παροχής διαπιστώνεται ότι η γεώτρηση μπορεί να αντληθεί με σταθερή παροχή 90-100 m³/h. Μετά από 48 ώρες άντληση διαπιστώνονται τα ακόλουθα:

(α) Η χαρακτηριστική καμπύλη της γεώτρησης (σχήμα 4α) αποτελείται από δύο διακριτά τμήματα εκ των οποίων, το πρώτο αφορά στην αρχική φάση άντλησης (100 min) και χαρακτηρίζεται από την απότομη πτώση της δυναμικής στάθμης και το δεύτερο (100-1320 min) αφορά στην φάση εξάντλησης των όποιων μικρότερου βάθους και μικρής ικανότητας επαναφόρτισης υδροφόρων στρωμάτων και την σταδιακή εξομάλυνση της κλίσης της καμπύλης πτώσης στάθμης-χρόνος άντλησης, με κυρίαρχο χαρακτηριστικό την σταθερή επαναφόρτιση του συστήματος αποκλειστικά και μόνον από τον κατώτερο και κύριο ταμιευτήρα. (β) Την σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας του αντλούμενου ρευστού και την εξισορρόπηση της θερμοκρασίας στο επίπεδο των 89,3°C (σχήμα 4β). Η θερμοκρασία αυτή είναι η μέγιστη μετρηθείσα στον πυθμένα της γεώτρησης σε κατάσταση ισορροπίας μετά την ολοκλήρωση της διάτρησης. (γ) Σταθερά χημικά χαρακτηριστικά και (δ) απουσία υπολειμματικής στάθμης κατά τη διαδικασία επαναφοράς της δυναμικής στάθμης μετά το πέρας της άντλησης.



Εικόνα 4: (α) Χαρακτηριστική καμπύλη πτώσης στάθμης(S)-χρόνου άντλησης (t) και καμπύλη επαναφοράς της παραγωγικής γεώτρησης AA-3P. (β) Καμπύλη διακύμανσης της θερμοκρασίας του γ/θ ρευστού στην κεφαλή της AA-3P σε συνάρτηση με τον χρόνο άντλησης.

2.3. ΧΗΜΙΣΜΟΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ

Αναφορικά με τη σύσταση των γεωθερμικών ρευστών μπορούν να λεχθούν τα εξής [1,2]:

(1) Το σύνολο των νερών του γεωθερμικού πεδίου Αρίστηνου ανήκει σε δύο κατηγορίες: (α) νερά του τύπου Na-SO₄, που αντιστοιχούν στον ανώτερο γ/θ ταμιευτήρα και (β) νερά του τύπου Na-Cl που αντιπροσωπεύουν τα νερά του κατώτερου γ/θ ταμιευτήρα. (2) Τα νερά του ανώτερου υδροφόρου είναι μετεωρικής προέλευσης με τα διαλυμένα άλατα να οφείλονται κυρίως στο φαινόμενο της υδρόλυσης των αργιλοπυριτικών ορυκτών. (3) Τα θερμότερα νερά είναι αποτέλεσμα ανάμιξης νερών μετεωρικής και θαλάσσιας προέλευσης. Η μεταλλοποίηση τους οφείλεται βασικά στη συμμετοχή της θαλάσσιας συνιστώσας. (4) Το σύνολο των χημικών γεωθερμομέτρων που χρησιμοποιήθηκαν αποδίδουν πιθανή θερμοκρασία ισορροπίας του γεωθερμικού ρευστού με το πέτρωμα της τάξης των 140 °C για τα νερά του κατώτερου ταμιευτήρα. (5) Ο ταμιευτήρας αυτός αποτελεί θερμική ανάμιξη μεταξύ του γεωθερμικού και του μετεωρικού νερού. Αντίθετα ο αβαθής ταμιευτήρας θερμαίνεται με αγωγή από τον κατώτερο και θερμότερο.

2.4. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΓΙΑ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ ΕΠΙΚΑΘΙΣΕΩΝ

Θεωρητικά, εκτιμήσεις για το αν υπάρχει τάση για δημιουργία επικαθίσεων μπορούν να γίνουν από τον υπολογισμό του βαθμού υπερκορεσμού S, όπως ορίζεται από την εξ. (1) ειδικά για το ανθρακικό ασβέστιο.

$$S = \left[\frac{(Ca^{2+})(CO_3^{2-})}{K_{sp}} \right]^{-1/2} \quad (1)$$

όπου οι παρενθέσεις εκφράζουν τις ενεργότητες των ιόντων και K_{sp} είναι το γινόμενο διαλυτότητας. Για διαλύματα με μικρή ιοντική ισχύ, η ενεργότητα ενός ιόντος ισούται με τη συγκέντρωσή του. Τιμές του S μεγαλύτερες της μονάδας δηλώνουν ότι το νερό είναι υπέρκορο ως προς ανθρακικό ασβέστιο και ότι υπάρχει θεωρητικά τάση του ρευστού να αποβάλει την περίσσεια του $CaCO_3$ με τη μορφή επικαθίσεων. Στον πίνακα 1 παρουσιάζονται οι λόγοι υπερκορεσμού για τα νερά των γεωτρήσεων του γεωθερμικού πεδίου στη θερμοκρασία εξόδου του ρευστού από τη γεώτρηση. Δηλαδή, οι λόγοι αναφέρονται σε συνθήκες μετά την εκτόνωση του γεωθερμικού ρευστού και το διαχωρισμό των δύο φάσεων. Πιστεύεται ότι με το διαχωρισμό των φάσεων απομακρύνεται το μεγαλύτερο ποσοστό του διαλυμένου CO_2 , με αποτέλεσμα την αύξηση του pH του διαλύματος και την αύξηση του λόγου υπερκορεσμού.

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά των νερών από πέντε γεωτρήσεις του πεδίου Αλεξανδρούπολης - Αρίστηνη αναφορικά με τη τάση για σχηματισμό επικαθίσεων ασβεσίτη.					
ΓΕΩΤΡΗΣΗ	AA-1Π*	AA-4Π**	AA-3Π**	KO-1**	EB-3**
Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά γεώτρησης					
Θερμοκρασία (°C)	52	62	89	82	90
pH (στους 25°C)	7.72	8.11	7.58	6.61	7.04
Αγωγιμότητα (μS/cm)(στους 25°C)	15960	13530	15170	14800	15500
Ολικά διαλυμένα στερεά, TDS (g/L)	9,54	10,18	10,51	8,64	9,76
Δείκτες υπερκορεσμού					
Λόγος Υπερκορεσμού (S) - PHREEQC	3,35	6,32	2,99	0,80	2,82
Λόγος Υπερκορεσμού (S) - HYDRAQL	3,28	6,34	2,52	0,73	2,32
Δείκτης Langelier (LSI)	0,57	1,32	1,0	-0,45	0,48
Δείκτης Ryznar (RI)	6,7	5,5	5,6	7,6	6,2

* Ανώτερος Ταμιευτήρας, ** Κατώτερος (Κύριος) Ταμιευτήρας

Οι υπολογισμοί των ενεργοτήτων όλων των χημικών ειδών στα διαλύματα και των λόγων υπερκορεσμού ως προς τον ασβεσίτη έγιναν με τη βοήθεια του λογισμικού PHREEQC, ενώ οι σταθερές ισορροπίας ελήφθησαν από τη βάση δεδομένων θερμοδυναμικών ισορροπιών NIST [3]. Επίσης, δίνονται και οι λόγοι υπερκορεσμού που υπολογίζονται μέσω του κώδικα HYDRAQL. Τέλος, παρουσιάζονται και οι τιμές για τους δείκτες Langelier (LSI) και Ryznar (RI), αν και όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία δεν μπορούν να εφαρμοστούν για νερά με μέση/ύψηλη αλατότητα και οι εκτιμήσεις τους δεν είναι πάντα αξιόπιστες.

Ο πίνακας 2 δείχνει ότι για όλα τα νερά που εξετάστηκαν, με εξαίρεση τη γεώτρηση KO-1, ο λόγος υπερκορεσμού των νερών ως προς το $CaCO_3$ (ασβεσίτη) είναι μεγαλύτερος της μονάδας και, ως εκ τούτου, υπάρχει θεωρητικά τάση για δημιουργία επικαθίσεων. Γενικά παρατηρείται ότι οι λόγοι υπερκορεσμού αυξάνουν με αύξηση της θερμοκρασίας και αύξηση του pH. Οι λόγοι υπερκορεσμού είναι κοντά στο 3 για τα νερά τριών γεωτρήσεων (AA-1Π, AA-3 και EB-3) και πιστεύεται ότι οριακά αυτά τα νερά μπορεί να παρουσιάσουν τάση για σχηματισμό επικαθίσεων, κυρίως στα μέρη με μεγάλη ταχύτητα. Σημειώνεται εδώ 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. Η ελληνική εμπειρία από άλλες μονάδες χαμηλής ενθαλπίας έδειξε ότι ο λόγος αυτός είναι της τάξης του 3 [4]. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι θα υπάρξει έντονο πρόβλημα

καθαλατώσεων με το νερό της γεώτρησης AA-4Π, ενώ είναι οριακά πιθανό να υπάρξει πρόβλημα και με τα νερά των γεωτρήσεων AA-1Π, AA-3Π και EB-3.

2.5. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΔΙΑΒΡΩΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ

Από τις χημικές αναλύσεις των νερών που αναφέρονται σε συνθήκες μετά το διαχωρισμό των φάσεων, φαίνεται ότι το pH ευρίσκεται στην ουδέτερη ζώνη και δεν παρουσιάζει ακραίες τιμές προς την όξινη ή αλκαλική περιοχή. Ιδιαίτερα αυξημένες είναι οι συγκεντρώσεις των χλωριόντων. Επίσης υπάρχει αυξημένη συγκέντρωση θειικών ιόντων και σχετικά χαμηλή συγκέντρωση HCO_3^- . Το διαλυμένο CO_2 , μετά το διαχωρισμό των φάσεων, ευρίσκεται σε χαμηλές συγκεντρώσεις όπως επίσης, και αν υπάρχουν, η NH_3 και το H_2S . Το διαλυμένο οξυγόνο αναμένεται να υπάρχει σε χαμηλές συγκεντρώσεις, λόγω της υψηλής θερμοκρασίας ($>80\text{ }^\circ\text{C}$) στις γεωτρήσεις AA-3Π, KO-1 και EB-3 και σε υψηλότερες συγκεντρώσεις, λόγω της χαμηλότερης θερμοκρασίας ($<80\text{ }^\circ\text{C}$) στις γεωτρήσεις AA-1Π και AA-4Π.

Σύμφωνα με τη σύσταση του γεωθερμικού ρευστού, η διαβρωτικότητά του οφείλεται κυρίως στην παρουσία χλωριόντων, στο διαλυμένο οξυγόνο στις γεωτρήσεις AA-1Π και AA-4Π, καθώς και στο οξυγόνο που μπορεί να εισέλθει στο σύστημα κατά τη διάρκεια επισκευών, συντήρησης κτλ. Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν πιο πάνω, η χρήση των ανοξειδωτών χαλύβων πρέπει να αποκλεισθεί, καθώς οι χάλυβες αυτοί είναι επιρρεπείς σε τρηματική διάβρωση και εργοδιάβρωση παρουσία χλωριόντων, που διασπούν το παθητικό φιλμ. Τα κράματα νικελίου και τα κράματα τιτανίου έχουν υψηλότερη αντίσταση στο συγκεκριμένο γεωθερμικό ρευστό, όμως έχουν απαγορευτικό κόστος για μεταφορά ρευστών με μικρό ενεργειακό περιεχόμενο. Προφανώς συνιστάται η χρήση τέτοιων υλικών σε συγκεκριμένες συσκευές, όπως οι εναλλάκτες θερμότητας. Το fiberglass θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στις συγκεκριμένες θερμοκρασίες, υπό την προϋπόθεση ότι υπάρχει η εμπειρία συναρμο-λόγησης/επισκευής του δικτύου, όσον αφορά στην ψαθυροποίηση που προκύπτει από λανθασμένη σύσφιξη. Προτείνεται ως υλικό κατασκευής ο κοινός ανθρακοχάλυβας κατασκευής δικτύων αγωγών (pipeline steel, π.χ. API 5L grades).

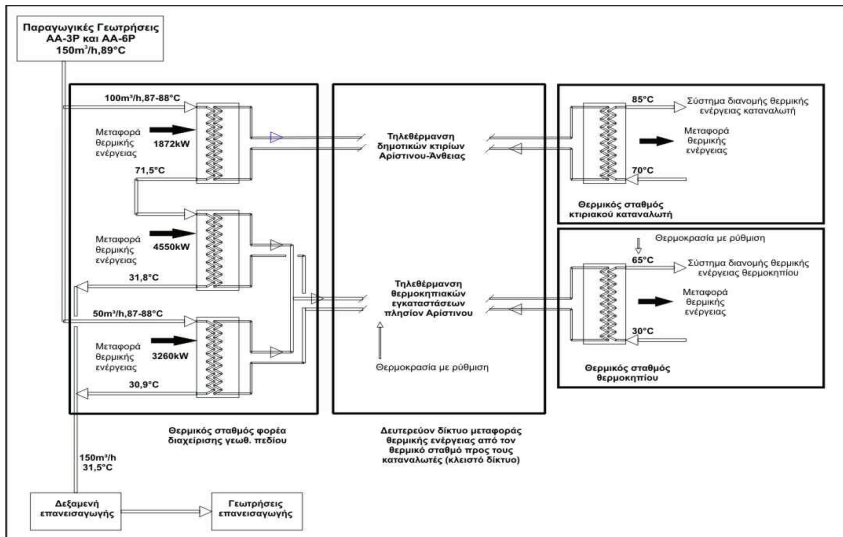
3. ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

Για το γεωθερμικό πεδίο Αρίστηνου-Αλεξανδρούπολης οι γνώσεις μας σχετικά με το αξιοποιήσιμο δυναμικό είναι ακόμη πολύ περιορισμένες. Ο σχεδιασμός της πρώτης φάσης αξιοποίησης μέρους του γεωθερμικού δυναμικού βασίζεται στα εξής δεδομένα:

- Οι θέσεις της παραγωγικής γεώτρησης AA-3Π και της υπό κατασκευή AA-6Π.
- Η συνολική αξιοποιήσιμη παροχή των δύο γεωτρήσεων, η οποία εκτιμάται πως μπορεί να ανέλθει με ασφάλεια σε $150\text{ m}^3/\text{h}$, με πολύ ικανοποιητικά χαρακτηριστικά άντλησης.
- Η θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού. Αυτή λαμβάνεται σε $88-89\text{ }^\circ\text{C}$ στην κεφαλή των δύο γεωτρήσεων.
- Ο χημισμός του γεωθερμικού ρευστού. Όπως έχει αναφερθεί, το ρευστό έχει σχετικά περιορισμένη τάση απόθεσης ανθρακικών αλάτων, ενώ ταυτόχρονα είναι διαβρωτικό για τις μεταλλικές σωληνώσεις.

Η θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού το καθιστά ικανό να προσφέρει θερμική ενέργεια για την θέρμανση κτηρίων αρχικά και θερμοκηπίων ή άλλων αγροτικών χρήσεων στη συνέχεια. Οι επιλεγμένες χρήσεις της γεωθερμικής ενέργειας απευθύνονται, στην πρώτη φάση εκμετάλλευσης, στον κτηριακό (τηλεθέρμανση) και στον αγροτικό (θερμοκήπια) τομέα. Σε δεύτερη μεταγενέστερη φάση αναμένεται η αξιοποίηση των ρευστών και στην μεταποίηση αγροτικών προϊόντων. Ο σχεδιασμός των συστημάτων θέρμανσης των κτηριακών εγκαταστάσεων βασίζεται σε θερμοκρασία προσαγωγής νερού στα θερμομαντικά σώματα $85\text{ }^\circ\text{C}$ και επιστροφής από αυτά $71,5\text{ }^\circ\text{C}$, ενώ με χαμηλότερη (τάξης $65-30\text{ }^\circ\text{C}$) για τις θερμοκηπιακές μονάδες. Βασικός στόχος του παραπάνω μοντέλου αξιοποίησης είναι η επίτευξη της μέγιστης δυνατής θερμοκρασιακής διαφοράς, η οποία αναμένεται να

προσεγγίσει τους ΔT $(89-32)=57\text{ }^{\circ}\text{C}$. Το σενάριο του βέλτιστου θερμοκρασιακού υποβιβασμού παύει να λειτουργεί στην περίπτωση μειωμένης ή και μηδενικής ζήτησης θερμικής ενέργειας από τα θερμοκήπια.



Εικόνα 5: Διάγραμμα ροής για την περίπτωση ταυτόχρονης μέγιστης ζήτησης θερμικής ισχύος σε κτίρια και θερμοκήπια

Ο συνολικός προϋπολογισμός των έργων που αφορούν στη διαχείριση των γεωθερμικών ρευστών ($Q=150\text{ m}^3/\text{h}$, $T_{\text{αρχ}}=88\text{ }^{\circ}\text{C}$), για εγκατεστημένη ισχύ 9,6 MW και για ετήσια παραγωγή θερμικής ενέργειας της τάξης των 16.400.000 kWh, ανέρχεται στα 3.800.000 €. Προκύπτει ως εκ τούτου αρχικό κόστος ανά εγκατεστημένο kW ίσο με 3.960 € και κόστος ανά παραγόμενη kWh ίσο προς 0,01 €.

3.1. ΒΑΣΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ

Η ταυτόχρονη ζήτηση θερμικής ισχύος σε δύο θερμοκρασιακά επίπεδα, ένα μεγαλύτερο των $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ για τις ανάγκες τηλεθέρμανσης των κτιριακών εγκαταστάσεων και ένα μεταξύ $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ και $65\text{ }^{\circ}\text{C}$, επιβάλλει την «εν σειρά» εκμετάλλευση ανάμεσα στα δύο επίπεδα. Έτσι:

- Αρχικά το γ/θ ρευστό θα διέρχεται μέσω εναλλακτών θερμότητας νερού – νερού, ώστε στο δευτερεύον δίκτυο των εναλλακτών να παράγεται νερό της τάξης των $85\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Στη συνέχεια θα διέρχεται μέσω εναλλάκτη θερμότητας σε σειρά, ώστε στην έξοδο του να παράγεται νερό της τάξης των $65\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Από τη συνολική παροχή των $150\text{ m}^3/\text{h}$ των δύο παραγωγικών γεωτρήσεων, με θερμοκρασιακή εκμετάλλευση 15 K για αστική τηλεθέρμανση απαιτείται παροχή της τάξης των $100\text{ m}^3/\text{h}$, το οποίο σημαίνει ότι θα υπάρξει περίσσεια παροχής της τάξης των $50\text{ m}^3/\text{h}$ αμιγώς για εκμετάλλευση στο δίκτυο των θερμοκηπιακών μονάδων. Το τελευταίο προϋποθέτει την ύπαρξη ενός 3^{ου} εναλλάκτη νερού–νερού παράλληλα με τους προαναφερόμενους δύο που είναι εν σειρά. Τελικώς η απόρριψη του γ/θ ρευστού προς τη δεξαμενή επανέγχυσης, στο «ιδανικό σενάριο αξιοποίησης», υπολογίζεται να γίνεται σε θερμοκρασία $32\text{ }^{\circ}\text{C}$. Η χρήση του όρου «ιδανικό σενάριο» προϋποθέτει την μέγιστη θερμοκρασιακή εκμετάλλευση στις θερμοκηπιακές καλλιέργειες και άρα βελτιστοποιημένα συστήματα διανομής της θερμικής ενέργειας στο εσωτερικό των θερμοκηπίων. Ο παραπάνω σχεδιασμός παρουσιάζεται συνοπτικά στο Σχήμα 5 και αντιστοιχεί στο «ιδανικό σενάριο» της

μέγιστης ζήτησης ισχύος τόσο στις κτηριακές εγκαταστάσεις όσο και στις συνδεδεμένες θερμοκηπιακές μονάδες και παράλληλα ύπαρξη εξοπλισμού στα θερμοκήπια ο οποίος να υποβιβάζει τελικά το νερό σε χαμηλά θερμοκρασιακά επίπεδα (πλησίον των 30°C).

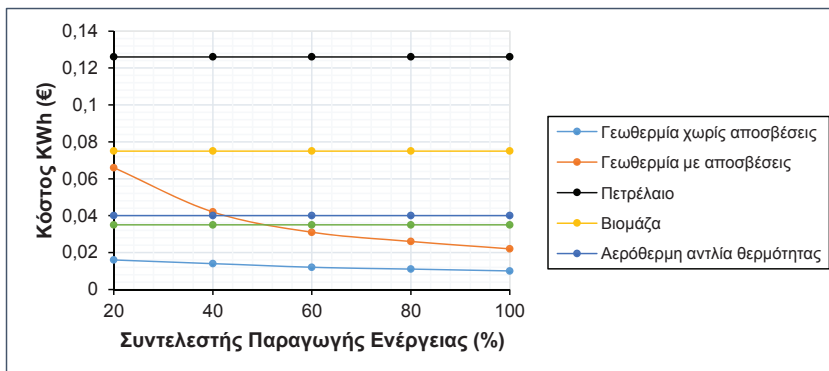
Στο διάγραμμα παρουσιάζεται η πορεία του γεωθερμικού ρευστού από τις παραγωγικές γεωτρήσεις στο θερμικό σταθμό, η θερμοκρασιακή του εκμετάλλευση και τελικώς η όδυσή του προς τη δεξαμενή επανεισαγωγής. Στο κεντρικό τμήμα παρουσιάζονται τα δύο κλειστά, ανεξάρτητα μεταξύ τους δίκτυα τηλεθέρμανσης, για τα κτίρια και για τα θερμοκήπια. Στο δεξιό τμήμα απεικονίζονται οι θερμικοί σταθμοί, τους οποίους θα πρέπει να εγκαταστήσει ο κάθε ανεξάρτητος χρήστης γ/θ ενέργειας στην εκμετάλλευση του. Μετά τους εναλλκτες θερμότητας νερού – νερού στους θερμικούς σταθμούς των τελικών χρήσεων, η θερμοκρασία του νερού στα συστήματα θέρμανσης των κτηρίων αναμένεται να είναι της τάξης των 85°C και των θερμοκηπίων της τάξης των 65°C. Οι θερμοκρασίες αυτές είναι απόλυτα ικανές για την κάλυψη των σχετικών αναγκών. Για τις λειτουργικές ανάγκες του παραγωγικού έργου διακίνησης της θερμικής ενέργειας έχει προταθεί, πέραν του «ιδανικού σεναρίου», πληθώρα εναλλακτικών σεναρίων, τα οποία βασίζονται σε διαφορετικούς συντελεστές ζήτησης ενέργειας είτε από τις κτηριακές εγκαταστάσεις είτε από τα θερμοκήπια.

3.2. ΚΟΣΤΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ kWh – ΣΥΓΚΡΙΣΗ - ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑ

Με βάση λεπτομερείς ενεργειακούς υπολογισμούς έχει προσεγγισθεί η δυναμικότητα του προτεινόμενου εξοπλισμού για την αξιοποίηση του Γ/Θ πεδίου Αρίστηνου-Αλεξανδρούπολης σε ότι αφορά στις δύο παραγωγικές γεωτρήσεις AA-3P και AA-6P. Στον Πίνακα 2 παρουσιάζεται η σύνοψη των αποτελεσμάτων που αφορούν τόσο στις χρήσεις του παρόντος σεναρίου αξιοποίησης όσον και σε μελλοντικές χρήσεις οι οποίες μπορούν να καλυφθούν:

Πίνακας 2: Σύνοψη των ειδικών υπολογισμών ποσοτήτων και ποιοτήτων των διακινούμενων ρευστών			
Χρήση	Ετήσια θερμική ενέργεια [kWh]	Ετήσια ποσότητα νερού [m ³]	
		Πρωτεύον κύκλωμα (γ/θ ρευστό)	Δευτερεύον κύκλωμα (κλειστά δίκτυα προς καταναλωτές)
Δημοτικά κτίρια στην Άνθεια και Αρίστηνο	876.536		51.098
Θερμοκηπιακές εγκαταστάσεις: 8 μονάδες των 5.000 m ²	8×1.956.874		398.913
Σύνολο	16.531.528	286.804	441.011

Παρατηρούμε ότι με τις παραπάνω χρήσεις ο μέσος ετήσιος βαθμός χρήσης του πεδίου ανέρχεται σε: 286.800 m³ ή 21,82%, αν θεωρήσουμε ότι η ικανότητα των παραγωγικών γεωτρήσεων είναι 150 m³/h σε συνεχή και αδιάκοπη λειτουργία. Θα πρέπει να αναφέρουμε ότι υπάρχουν μεγάλες δυνατότητες του πεδίου για κάλυψη άλλων πρόσθετων εφαρμογών, οι οποίες δεν θα λαμβάνουν χώρα κατά την αιχμή των χειμερινών μηνών. Η κάλυψη ανάλογων καταναλώσεων θα επέτρεπε την επέκταση των δραστηριοτήτων του φορέα εκμετάλλευσης και σε ενδιάμεσες εποχές. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω και συνυπολογίζοντας το ετήσιο λειτουργικό κόστος των έργων υποδομής για την άντληση, εναλλαγή, διακίνηση και επανεισαγωγή των γ/θ ρευστών, για μέγιστη ετήσια παραγωγή θερμικής ενέργειας ίσης προς 16.532 MWh, το κόστος παραγωγής της γεωθερμικής kWh διαμορφώνεται στα 0,01 €. Το κόστος αυτό, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6, είναι κατά πολύ μικρότερο από το σύνολο των διάφορων μορφών πηγών παραγωγής ενέργειας. Παραμένει και πολύ μικρότερο ακόμη και στην περίπτωση τιμής πώλησης 0,035 €, η οποία είναι η τιμή που ο φορέας διαχείρισης του γ/θ πεδίου θα διαθέτει την γεωθερμική kWh στους τελικούς χρήστες της πρώτης φάσης αξιοποίησης.



Εικόνα 6: Διάγραμμα κόστους παραγωγής θερμικής kWh από διάφορες πηγές ενέργειας σε σχέση με τον συντελεστή παραγωγής ενέργειας από γεωθερμία στο Γ/Θ πεδίο Αρίστηνου-Αλεξανδρούπολης.

Με υπολογισμό για περίοδο αναφοράς τα 20 έτη, ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης (IRR) είναι 13,0%, δηλ. ικανοποιητικός βαθμός απόδοσης για μια επένδυση. Ένας επίσης σημαντικός δείκτης είναι η καθαρή παρούσα αξία της επένδυσης, NPV (Net Present Value), για μια περίοδο αναφοράς, συνήθως 20ετίας, που λαμβάνει υπόψη και το επιτόκιο αναγωγής. Η καθαρή παρούσα αξία της επένδυσης είναι 4.306.700 € για περίοδο υπολογισμού 20ετίας. Η απλή περίοδος αποπληρωμής της επένδυσης εκτιμάται στα 7,9 έτη, ενώ η έντοκη με βάση επιτόκιο αναφοράς 3,5% είναι 8,6 έτη.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με βάση τις πολύχρονες έρευνες στο γεωθερμικό πεδίο Αρίστηνου-Αλεξανδρούπολης, την πρόσφατη δοκιμαστική άντληση της παραγωγικής γεώτρησης ΑΑ-3Ρ, την λεπτομερή προσέγγιση του χημισμού των ρευστών, την μελέτη σκοπιμότητας και τις οριστικές μελέτες εφαρμογής, αποτυπώνονται συμπερασματικά τα ακόλουθα: (α) Το γ/θ πεδίο Αρίστηνου-Ανθειας καλύπτει έκταση μεγαλύτερη των 50 km², αποτελείται από δύο ταμειούτρες και το δυναμικό του φαίνεται να είναι μεγάλο. (β) Τα γ/θ ρευστά έχουν μετεωρική και θαλάσσια προέλευση με κύρια χημική σύσταση Na-Cl. (γ) Απαιτείται προσοχή στην επιλογή των υλικών των σωληνώσεων λόγω της διαβρωτικότητας των ρευστών. (δ) Με τις υπάρχουσες γεωτρήσεις μία συνολική εγκατεστημένη ισχύς των 10 MWt θεωρείται ρεαλιστική και μπορεί να ικανοποιήσει φορτία τόσο για θέρμανση κτιριακών εγκαταστάσεων όσο και για αγροτικές χρήσεις και υδατοκαλλιέργειες.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Kolios, N., Koutsinos, S., Arvanitis, A. and Karydakias, G., 2005, "Geothermal Situation in Northeastern Greece", Proceedings, World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, 24-29 April 2005, 14 pp.
- [2] Πουτούκης, Δ. & Ντότσινα, Ε., 1998, "Συμβολή της ισοτοπικής υδρολογίας και της υδρογεωχημείας στη μελέτη του γεωθερμικού πεδίου Αρίστηνου ν. Έβρου", Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας, Τόμος 32, Αρ. 4, σελ. 69-79.
- [3] NIST Database 46, "Critically Selected Stability Constants of Metal Complexes", Ver. 6.
- [4] Ανδρίτσος, Ν. και Καραμπέλας, Α.Ι. (1996) "Σχηματισμός Επικαθίσεων και Διάβρωση σε Γεωθερμικές Εγκαταστάσεις Χαμηλής Ενθαλπίας", 5^ο Συνέδριο για τις Ήπιες Μορφές Ενέργειας, Πρακτικά Τόμος Β, σελ. 141-148, Αθήνα.

ΣΥΣΤΗΜΑ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΝΤΛΙΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΤΗ ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΑΝΑΨΥΚΤΗΡΙΟΥ ΣΤΗ ΝΕΑ ΠΑΡΑΛΙΑ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

Δ. Α. Μπόζης^{1*}, Κ. Γ. Ντένη²

^{1*} Δρ. Μηχανολόγος Μηχανικός Α.Π.Θ., Μελετητής,
Κασσάνδρου 37^Α, 546 33 Θεσσαλονίκη, e-mail: dmbosis@otenet.gr

² Μηχανολόγος Μηχανικός Α.Π.Θ., MSc., Μελετήτρια

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Παρουσιάζονται τα δεδομένα σχεδίασης των συστημάτων γεωθερμικών αντλιών θερμότητας τύπου νερού – αέρα για τη θέρμανση των αναψυκτηρίων στη Νέα Παραλία της Θεσσαλονίκης. Το πρωτεύον κύκλωμα των μονάδων αντλιών θερμότητας που εγκαθίστανται είναι το νερό γεωτρήσεων, που προσωρινά αποθηκεύεται σε υπόγεια γραμμική δεξαμενή νερού που κατασκευάστηκε για την άρδευση των εκτάσεων πρασίνου και την πλύση των λεκανών των δημόσιων χώρων υγιεινής στην περιοχή. Παρουσιάζονται στοιχεία σχεδίασης και κατασκευής της εγκατάστασης και δίνονται αναμενόμενα ενεργειακά δεδομένα λειτουργίας των συστημάτων.

Λέξεις κλειδιά: Γεωθερμία, γεωναλλάκτης, αντλία θερμότητας, Νέα Παραλία Θεσσαλονίκης

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα γεωθερμικά συστήματα με αντλίες θερμότητας (ΑΘ) κατατάσσονται σύμφωνα με τη βιβλιογραφία σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη αποτελείται από τα συστήματα στα οποία η εναλλαγή θερμότητας με το έδαφος πραγματοποιείται μέσω κλειστών υπόγειων δικτύων υγρού, τους γεωεναλλάκτες, οριζόντιους ή κατακόρυφους, ανάλογα με τη διάταξη των σωλήνων υγρού στο έδαφος. Η δεύτερη κατηγορία αποτελείται από αυτά τα συστήματα στα οποία το κύριο ανταλλάσσει θερμότητα με το υπέδαφος, μέσω νερού που αντλείται από υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες και στη συνέχεια επανεγχύεται σε αυτούς. Την πρώτη κατηγορία συστημάτων με αντλίες θερμότητας την ονομάζουμε «κλειστά γεωθερμικά συστήματα» ενώ την δεύτερη «ανοιχτά». Περισσότερες από 30 χιλιάδες μονάδες αντλιών θερμότητας γεωθερμικού τύπου εγκαθίσταντο στην Ευρώπη κάθε χρόνο στα τέλη της προηγούμενης δεκαετίας [1]. Στην Ελλάδα έχουν εγκατασταθεί και λειτουργούν πολλά συστήματα αυτού του τύπου, ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια, με πρώτη σημαντική από άποψη τεχνολογίας και μεγέθους εγκατάσταση, αυτήν του Δημαρχείου της Πυλαίας το 1996 [2]. Παραλλαγές ανοιχτών και κλειστών συστημάτων με αξιοποίηση υδάτων λιμνών και ακτών έχουν επίσης αναφερθεί στη βιβλιογραφία [3, 4].

Στη Νέα Παραλία της Θεσσαλονίκης θα δοκιμαστεί η λειτουργία γεωθερμικών συστημάτων αντλιών θερμότητας που δεν κατατάσσονται εύκολα σε κάποια από τις παραπάνω κατηγορίες, ή μάλλον μπορούν να καταταγούν άνετα σε οποιαδήποτε από αυτές. Είναι συστήματα στα οποία δεν κατασκευάστηκαν γεωεναλλάκτες αλλά αξιοποιούνται ως τέτοιοι κατασκευές και διατάξεις που έγιναν για λόγους άσχετους με τη «γεωθερμική χρήση».

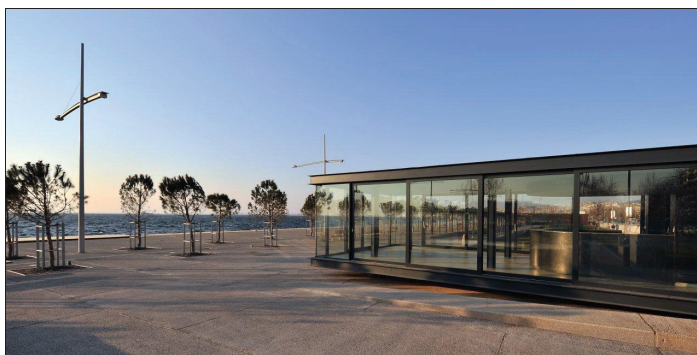
2. Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΚΑΙ ΤΑ ΚΤΙΡΙΑ

Η περιοχή της Νέας Παραλίας της Θεσσαλονίκης δημιουργήθηκε από την επιχωμάτωση της ακτής τη δεκαετία του '50. Έχει συνολική έκταση περίπου 250 στρέμματα και κύρια χαρακτηριστικά το μεγάλο μήκος (περίπου 3 χιλιόμετρα), το μικρό πλάτος και την άμεση επαφή με τη θάλασσα. Η μελέτη ανάπτυξης της Νέας Παραλίας [5] ανατέθηκε μετά από αρχιτεκτονικό διαγωνισμό και εκπονήθηκε την περίοδο 2001 - 2004. Τα έργα εξελίχθηκαν σε δύο φάσεις και ολοκληρώθηκαν το 2013. Μελετήθηκαν και κατασκευάστηκαν κατά μήκος του κρηπιδώματος η αλέα και επάνω από αυτήν κήποι με περιοχές πρασίνου, άθλησης και αναψυχής.

Στους κήπους κατασκευάστηκαν επτά όμοια μικρά κτίρια αναψυκτηρίων. Κάθε ένα από αυτά (Εικόνα 1) έχει έκταση 94 m², είναι κατασκευασμένο με μεταλλικό φορέα, υαλοστάσια σε όλη την έκταση των όψεών του, δάπεδο ελαφρά υπερυψωμένο από το έδαφος και επίπεδη οροφή. Κατά τη θερινή περίοδο το αναψυκτήριο προβλέπεται να λειτουργεί με την περίμετρο του ανοιχτή ενώ κατά την χειμερινή περίοδο τα υαλοστάσιά του θα παραμένουν κλειστά. Έχει προβλεφθεί μηχανικός αερισμός – εξαερισμός με μέγιστη παροχή 1600 m³/h και θέρμανση με συνολική ισχύ 14 kW (με τον αερισμό).

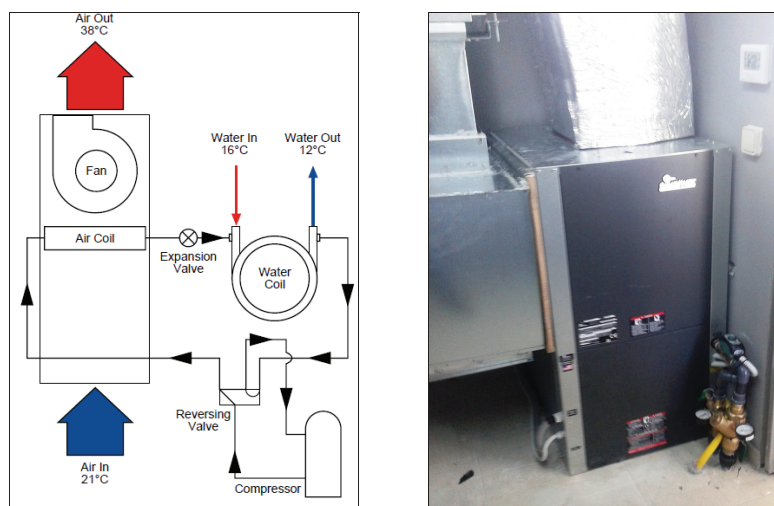
3. ΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Η λύση της εγκατάστασης μονάδας θέρμανσης στα κτίρια που θα στηρίζεται στο αέριο καύσιμο απορρίφθηκε, γιατί απαιτούσε σύνδεση με το δίκτυο χαμηλής πίεσης του φυσικού αερίου, που ήταν δύσκολο να κατασκευαστεί. Η λύση αυτή απορρίφθηκε επίσης για λόγους αισθητικής (απαιτήσεις για μετρητές, εξωτερικές εγκαταστάσεις λεβήτων και σωληνώσεων). Διερευνήθηκαν δύο εναλλακτικές στην παραπάνω λύσεις: αντλία θερμότητας αέρα – αέρα και γεωθερμική αντλία θερμότητας. Προκρίθηκε τελικά η ιδέα της εγκατάστασης γεωθερμικού συστήματος με ηλεκτροκίνητη αυτόνομη μονάδα αντλίας θερμότητας νερού - αέρα.



Εικόνα 1: Το τυπικό κτίριο του αναψυκτηρίου στη Νέα Παραλία της Θεσσαλονίκης

Κατά τη λειτουργία της ΑΘ νερού – αέρα σε θέρμανση, θερμότητα μεταφέρεται από ένα δίκτυο νερού προς το ψυκτικό μέσο της αντλίας θερμότητας μέσω ενός εναλλάκτη ψυκτικού μέσου – νερού που λειτουργεί ως εξατμιστήρας. Αναβαθμισμένη θερμοκρασιακά η θερμότητα αυτή με την προσθήκη της απορροφούμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τον συμπιεστή, αποδίδεται στο χώρο μέσω ενός εναλλάκτη ψυκτικού μέσου – αέρα που λειτουργεί ως συμπυκνωτής. Η ΑΘ που εγκαταστάθηκε σε κάθε αναψυκτήριο (Εικόνα 2) είναι κατακόρυφη με αναρρόφηση του αέρα από κάτω και προσαγωγή προς το χώρο από επάνω μέσω μικρού δικτύου αεραγωγών.



Εικόνα 2: Αντλίες θερμότητας νερού - αέρα για τη θέρμανση των αναψυκτηρίων.
Σχηματική διάταξη εξοπλισμού της ΑΘ κατά τη λειτουργία σε θέρμανση και φωτογραφία της μονάδας όπως εγκαταστάθηκε. Πηγή [6]

Κάθε σύστημα εκτός από τη θέρμανση είναι δυνατό να λειτουργήσει και για την ψύξη του χώρου, καθώς οι ΑΘ είναι πλήρως αντιστρεπτού κύκλου, μπορούν δηλαδή να εναλλάσσουν τους ρόλους μεταξύ του συμπυκνωτή και του εξατμιστήρα. Έτσι ΑΘ είναι σε θέση να

προσφέρουν ψύξη στο χώρο, τους τελευταίους μήνες της άνοιξης και τους πρώτους μήνες του φθινοπώρου όταν τα αναψυκτήρια λειτουργούν με κλειστά τα ανοίγματά τους.

Το ρόλο του γεωεναλλάκτη στις διατάξεις των συστημάτων αντλιών θερμότητας των αναψυκτηρίων έχει αναλάβει μια γραμμική υπόγεια δεξαμενή νερού που κατασκευάστηκε κατά μήκος της αλέας. Η δεξαμενή αυτή είναι για την αποθήκευση μη πόσιμου νερού και κατασκευάστηκε ως βασικό στοιχείο του συστήματος διαχείρισης νερού. Τροφοδοτείται με νερό από μικρό αριθμό γεωτρήσεων του Δήμου που υπάρχουν στην περιοχή και μια αρτεσιανή πηγή. Εναλλακτικά, στην περίπτωση που οι γεωτρήσεις δεν επαρκούν, η δεξαμενή τροφοδοτείται με νερό από το δίκτυο πόσιμου νερού της πόλης. Η γραμμική δεξαμενή τροφοδοτεί μέσω αντλιών που έχουν εγκατασταθεί κατά μήκος της αλέας τα δίκτυα άρδευσης των περιοχών πρασίνου αλλά και τις λήψεις μη πόσιμου νερού για τις πλύσεις των λεκανών των χώρων υγιεινής και την καθαριότητα στον περιβάλλοντα χώρο.

Η γραμμική δεξαμενή τοποθετήθηκε μέσα στα ορύγματα που ανοίχτηκαν κατά την κατασκευή της αλέας για την τοποθέτηση των δενδροδόχων της. Κατασκευάστηκε από τυποποιημένα κιβώτια πολυπροπυλενίου που τυλίχτηκαν με στεγανή μεμβράνη (Εικόνα 3). Κατασκευές αυτού του τύπου έχουν επικρατήσει τα τελευταία χρόνια κυρίως για την υπεδάφια διήθηση βρόχινων νερών. Η δεξαμενή είναι τοποθετημένη λοιπόν ανάμεσα στις δύο δενδροστοιχίες, με τον πυθμένα της σε βάθος περίπου 1,30m. Έχει διατομή 0,80 m², συνολικό μήκος περίπου 1500 m και χωρητικότητα νερού περί τα 1200 m³.

Η γραμμική δεξαμενή νερού είναι ένας ιδιότυπος γεωεναλλάκτης που

- ανταλλάσσει θερμότητα με το υπέδαφος αφού δέχεται νερό από τα υπόγεια υδροφόρα στρώματα που βρίσκονται σε βάθη 25 – 50 m μέσω των γεωτρήσεων,
- ανταλλάσσει θερμότητα με τα επιφανειακά στρώματα του εδάφους και τη θάλασσα, αφού επάνω από την οροφή της δεξαμενής είναι οι τελικές στρώσεις δαπέδων, ενώ κάτω από τον πυθμένα της δεξαμενής το έδαφος διαβρέχεται από το νερό της θάλασσας που εισχωρεί στο χαλαρό υπέδαφος της επιχωματωμένης ακτής,
- ανταλλάσσει θερμότητα με το δίκτυο πόσιμου νερού της πόλης αφού δέχεται νερό και από αυτό, αποτελώντας έτσι επέκταση του τεράστιου γεωεναλλάκτη που σχηματίζει το δίκτυο νερού της πόλης,
- εξομαλύνει τις ανταλλαγές νερού και θερμότητας που λαμβάνουν χώρα όλη τη διάρκεια μιας ημέρας, με την μεγάλη χωρητικότητα που έχει.

Σύμφωνα με τα παραπάνω δε φαίνεται να είναι εύκολη η κατάταξη του συστήματος που έχει κατασκευαστεί. Είναι βέβαια δεδομένο ότι το σύστημα είναι γεωθερμικό, βασισμένο σε έναν γεωεναλλάκτη μεγάλης έκτασης που κατασκευάστηκε για λόγους που δεν έχουν σχέση με τη γεωθερμία.

4. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Έγινε προσπάθεια να προσδιοριστούν τα βασικά ενεργειακά δεδομένα του συστήματος που προτάθηκε. Επιχειρήθηκε προσομοίωση της θερμικής συμπεριφοράς του κτιρίου και της απόδοσης του συστήματος της ΑΘ μέσω του TRNSYS. Δείκτης της ενεργειακής απόδοσης του συστήματος είναι η απορροφούμενη ηλεκτρική ενέργεια από το συμπιεστή της ΑΘ κατά τη λειτουργία της σε θέρμανση (Οκτώβριος – Απρίλιος). Έγινε επίσης η σύγκριση της απόδοσης του συστήματος με ένα σύστημα ΑΘ αέρα – αέρα αντίστοιχης ισχύος. Η σύγκριση έγινε για τα ίδια δεδομένα απαιτήσεων, μέσω της αντιστοίχησης του μεγέθους της απορροφούμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τους συμπιεστές.

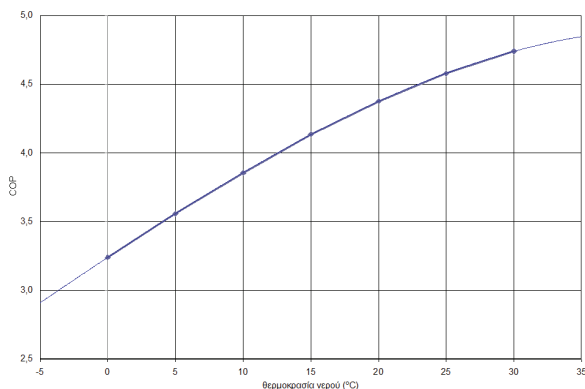
Το κτίριο θεωρήθηκε με τα δεδομένα κατασκευής του, τη λειτουργία του κάθε ημέρα τις ώρες 8 έως 24 και τα αναμενόμενα ωριαία προφίλ παρουσίας ατόμων, φωτισμού και λειτουργίας συσκευών.



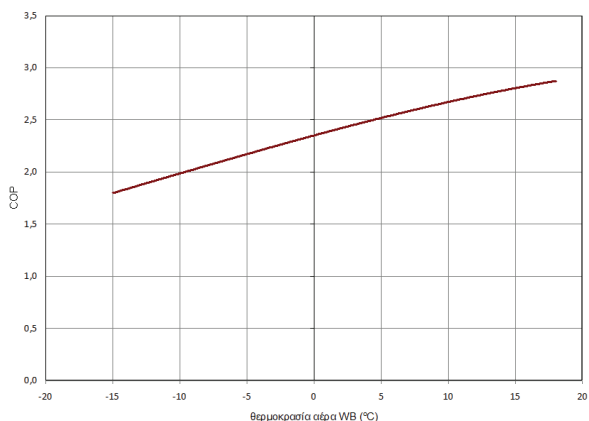
Εικόνα 3: Η γραμμική δεξαμενή νερού κατά μήκος της αλέας της Νέας Παραλίας
Σχέδιο εγκάρσιας τομής και φωτογραφίες κατά την κατασκευή

Θεωρήθηκε ότι η τιμή της θερμοκρασίας της δεξαμενής νερού είναι ίση με τη μέση τεσσάρων θερμοκρασιών: της θερμοκρασίας του υπεδάφους (μέση θερμοκρασία έτους για τη Θεσσαλονίκη) [7], της θερμοκρασίας της επιφάνειας του εδάφους (τιμές σε μηνιαία βάση) [7], της θερμοκρασίας του νερού της θάλασσας [8] και της θερμοκρασίας του νερού του δικτύου πόλης [7].

Για την απόδοση των αντλιών θερμότητας νερού – αέρα χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα του κατασκευαστή τους [9]. Ο βαθμός θερμικής συμπεριφοράς (COP) των ΑΘ για λειτουργία σε θέρμανση, με σταθερή θερμοκρασία αέρα χώρου (20°C) και σταθερή παροχή νερού στον εξατμιστήρα (0,90 L/s) είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας εισόδου του νερού στον εξατμιστήρα. Με βάση τα δεδομένα του κατασκευαστή ο COP της ΑΘ θεωρήθηκε όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 1 (οι υπολογισμοί έγιναν σε μηνιαία βάση). Ο COP της αντλίας θερμότητας αέρα - αέρα για λειτουργία σε θέρμανση, με θερμοκρασία χώρου 20°C, θεωρήθηκε συνάρτηση θερμοκρασίας υγρού βολβού του αέρα του περιβάλλοντος, όπως στο Διάγραμμα 2, και υπολογίστηκε σε ωριαία βάση. Και εδώ χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα συγκεκριμένου προϊόντος.



Διάγραμμα 1: COP ΑΘ νερού – αέρα σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία εισόδου νερού πρωτεύοντος κυκλώματος σε αυτήν. Δεδομένα από [9]



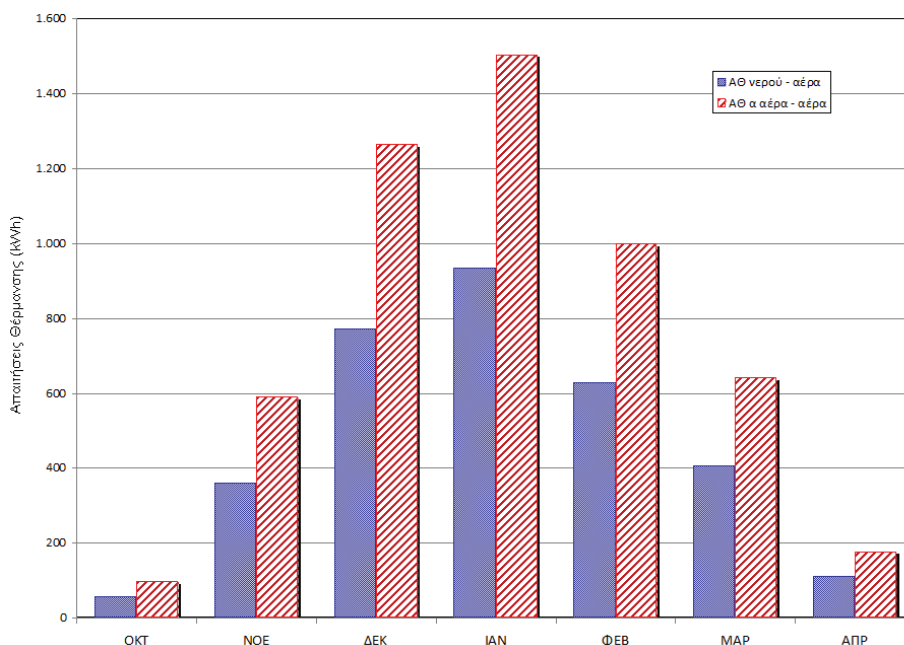
Διάγραμμα 2: COP ΑΘ αέρα – αέρα σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία υγρού βολβού του αέρα του περιβάλλοντος.

Στον Πίνακα 1 και στο Διάγραμμα 3 δίνονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών για τα δύο συστήματα.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παραπάνω ανάλυσης η λειτουργία της αντλίας θερμότητας που έχει εγκατασταθεί (γεωθερμικού τύπου) θα απορροφήσει όλη τη χειμερινή περίοδο 3.274 kWh ηλεκτρικής ενέργειας, λειτουργώντας με ετήσιο βαθμό συμπεριφοράς (SPF) ίσο περίπου με 4,0 (3,994). Η κατανάλωση αυτή ηλεκτρικής ενέργειας είναι το 62% αυτής που θα κατανάλωνε ένα όμοιο σύστημα αντλίας θερμότητας τύπου αέρα – αέρα (SPF=2,480). Η αντλία θερμότητας που εγκαταστάθηκε σύμφωνα με την ανάλυση και τους εθνικούς συντελεστές μετατροπής ενέργειας [10] θα καταναλώνει 9,5 MWh πρωτογενούς ενέργειας, έναντι 15,3 MWh που θα κατανάλωνε ένα σύστημα αντλίας θερμότητας αέρα – αέρα και 14,5 MWh που θα κατανάλωνε ένα συμβατικό σύστημα θέρμανσης με μονάδα καύσης αερίου καυσίμου βαθμού απόδοσης 0,95.

Πίνακας 1: Δεδομένα λειτουργίας συστημάτων αντλιών θερμότητας την περίοδο θέρμανσης των αναψυκτηρίων

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΝΤΛΙΩΝ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ						
ΜΗΝΑΣ	Μέση θερμοκρασία εξωτερικού αέρα (DB) (°C)	Μέση θερμοκρασία εξωτερικού αέρα (WB) (°C)	Εκτιμώμενη μέση θερμοκρασία νερού της δεξαμενής (°C)	Απατούμενη ενέργεια για τη θέρμανση αναψυκτηρίου (kWh)	Απορροφούμενη ηλεκτρική ενέργεια από ΑΘ νερού - αέρα (kWh)	Απορροφούμενη ηλεκτρική ενέργεια από ΑΘ αέρα - αέρα (kWh)
ΟΚΤ	15,4	12,2	17,9	254	58	97
ΝΟΕ	10,6	8,4	15,1	1508	360	590
ΔΕΚ	6,6	4,7	12,3	3111	773	1265
ΙΑΝ	4,9	2,9	10,4	3650	936	1504
ΦΕΒ	6,6	4,3	10,7	2463	628	999
ΜΑΡ	9,5	6,9	12,0	1630	407	642
ΑΠΡ	14,0	10,6	14,4	462	111	176
ΠΕΡΙΟΔΟΣ	9,7	7,1	13,2	13077	3274	5272



Διάγραμμα 3: Μηνιαία διακύμανση της απορροφούμενης ηλεκτρικής ισχύος από τους συμπειστές των αντλιών θερμότητας την περίοδο θέρμανσης των αναψυκτηρίων

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μικρά γεωθερμικά συστήματα αντλιών θερμότητας για θέρμανση χώρων εγκαταστάθηκαν στη Νέα Παραλία της Θεσσαλονίκης αξιοποιώντας ως γεωεναλλάκτη μια γραμμική δεξαμενή νερού που εγκαταστάθηκε για την άρδευση των εκτάσεων πρασίνου της περιοχής. Η λειτουργία των συστημάτων αυτών φαίνεται ότι θα είναι εξαιρετικά αποδοτικότερη από ενεργειακή σκοπιά σε σχέση με συμβατικά συστήματα που εξετάστηκαν ως λύσεις.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Burkhard Sanner, Overview of Shallow Geothermal Systems, Geotrained Training Manual for Designers of Shallow Geothermal Systems, Geotrained EFG, 2011
- [2] A. Michopoulos, D. Bozis, P. Kikidis, K. Papakostas, N. Kyriakis, Three - years operation experience of a ground source heat pump system in Northern Greece, Energy and Buildings, 39 (2007).
- [3] ASHRAE, Commercial / Institutional Ground Source Heat Pump , Engineering Manual, 1995.
- [4] ASHRAE, Handbook of Applications 2011, Ch.34 Geothermal Energy, 2011.
- [5] Δήμος Θεσσαλονίκης, Δ/ση Μελετών Αρχιτεκτονικών Έργων, Πολεοδομική, Αρχιτεκτονική, Γεωτεχνική, Στατική, ΗΛ/Μ, Φυτοτεχνική Μελέτη και Τεύχη Δημοσίευσής για την ΑΝΑΠΛΑΣΗ ΤΟΥ ΜΕΤΩΠΟΥ ΤΗΣ ΝΕΑΣ ΠΑΡΑΛΙΑΣ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ, 2001 – 2009.
- [6] CLIMATE MASTER, Water-Source Heat Pump Systems, Applications Guide, Rev 2, 2010.
- [7] Υ.Π.Ε.Κ.Α. – Τ.Ε.Ε., Τεχνική Οδηγία Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-3/2010, Κλιματικά Δεδομένα Ελληνικών Περιοχών.
- [8] <http://www.sailingissues.com/seawater-temperatures-greece.html>
- [9] CLIMATE MASTER, Tranquility 16 Compact (TC) Series Submittal Data, Rev 4, Nov. 2009B
- [10] Υ.Π.Ε.Κ.Α. – Κανονισμός Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων, 2010.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΡΕΥΣΤΑ ΜΕΣΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Α. Σταμάτης, Ν. Ανδρίτσος

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Πεδίον Άρεως,
383 34, Βόλος, e-mail: tastamat@uth.gr, nandrits@uth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στη Βόρεια Ελλάδα και σε ορισμένα νησιά του Βόρειου Αιγαίου υπάρχει μεγάλος αριθμός γεωθερμικών πεδίων χαμηλής ενθαλπίας με θερμοκρασίες νερού 30-90 °C. Τα πεδία αυτά βρίσκονται σε πολύ μικρά βάθη (συνήθως 100-500 m) στις ιζηματογενείς λεκάνες της Βόρειο-ανατολικής Ελλάδας (π.χ. λεκάνες απορροής των ποταμών Στρυμόνα, Νέστου και Έβρου) και στα νησιά της Σαμοθράκης, Χίου και Λέσβου. Η εργασία αυτή ασχολείται με την παραμετρική διερεύνηση των δυαδικών κύκλων που μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την εκμετάλλευση των γεωθερμικών πόρων μέσης θερμοκρασίας στη Βόρεια Ελλάδα. Έχουν αναπτυχθεί μοντέλα για μικρές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με τον κύκλο KALINA (KCS34) και τον Οργανικό Κύκλο Rankine (ORC). Η μοντελοποίηση των μονάδων έγινε με τη χρήση του λογισμικού Aspen Plus. Τα αποτελέσματα αυτών των μοντέλων συγκρίνονται ικανοποιητικά με πειραματικά δεδομένα από δύο μικρές εμπορικές εγκαταστάσεις. Τα μοντέλα αυτά χρησιμοποιήθηκαν για την παραμετρική μελέτη της απόδοσης των μονάδων για ένα τυπικό φάσμα κλιματικών και γεωθερμικών συνθηκών σε ένα ελληνικό γεωθερμικό πεδίο. Οι κύριες παράμετροι που εξετάζονται είναι η θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού (κυμαίνεται από 90 μέχρι 120 °C) και η θερμοκρασία επανεισαγωγής του ρευστού (70-80 °C).

Λέξεις Κλειδιά: Παραγωγή ισχύος, εξεργειακή ανάλυση, κύκλος Kalina, Οργανικός Κύκλος Rankine, Aspen Plus

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το γεωθερμικό (γ/θ) δυναμικό υψηλής ενθαλπίας στην Ελλάδα υπερβαίνει τα 250 MWe, παρόλο που το δυναμικό αυτό βρίσκεται σε κάποια μη-διασυνδεδεμένα νησιά του ενεργού ηφαιστειακού τόξου του Αιγαίου. Επιπλέον, υπάρχουν πολλά γ/θ πεδία χαμηλής ενθαλπίας με θερμοκρασίες νερού μεγαλύτερες από 90 °C, κυρίως στη Βόρεια Ελλάδα και σε ορισμένα νησιά του Αιγαίου, τα οποία αξιοποιούνται κυρίως για θέρμανση θερμοκηπίων και υδροθεραπεία. Τα πεδία αυτά βρίσκονται σε πολύ μικρά βάθη (100-500 m) σε ιζηματογενείς λεκάνες (π.χ. λεκάνες των ποταμών Νέστου, Στρυμόνα και Έβρο) και στα νησιά της Σαμοθράκης, Χίου και Λέσβου [1,2]. Οι γεωλογικές και τεκτονικές συνθήκες στις περιοχές αυτές είναι ευνοϊκές για την παρουσία ρευστών μέσης ενθαλπίας (T=90-120 °C) σε μεγαλύτερα βάθη. Ειδικότερα, στην περιοχή του Ερατεινού-Χρυσούπολης (Δέλτα του ποταμού Νέστου), μια περιοχή που χαρακτηρίζεται από αυξημένη γεωθερμική βαθμίδα (τέσσερις φορές υψηλότερη από την κανονική), έχουν εντοπιστεί δύο ξεχωριστοί ταμιευτήρες. Ο κύριος γ/θ ταμιευτήρας εκτιμάται ότι βρίσκεται σε βάθος 1500 m. Κατά τη διάρκεια διερευνητικών εργασιών το 1986 από τη Δημόσια Επιχείρηση Πετρελίου μετρήθηκε θερμοκρασία 122 °C σε βάθος 1377 m. Το δεύτερο πεδίο βρίσκεται σε βάθος 650-700 m, όπου ένα δίκτυο υποδομής βρίσκεται υπό κατασκευή κυρίως για θέρμανση θερμοκηπίων. Η θερμότητα μεταφέρεται από το κύριο ταμιευτήρα στον ανώτερο, στον οποίο τα νερά έχουν θερμοκρασία 70-80 °C.

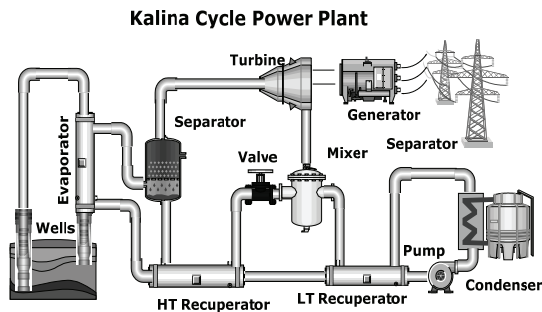
Συστήματα μετατροπής ενέργειας με τον δυαδικό κύκλο χρησιμοποιούνται σήμερα με επιτυχία για την αξιοποίηση γ/θ ρευστών μέσης ενθαλπίας [3]. Τα συστήματα αυτά αποτελούνται συνήθως από μικρές αρθρωτές μονάδες και μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας τόσο για μη-διασυνδεδεμένα νησιά όσο και για το διασυνδεδεμένο δίκτυο. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να αναλύσει και να αξιολογήσει παραμετρικά δύο δυαδικούς κύκλους που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την αξιοποίηση των γ/θ ρευστών χαμηλής/μέσης ενθαλπίας στη Βόρεια Ελλάδα. Για το σκοπό αυτό έχουν αναπτυχθεί μοντέλα που προσομοιώνουν μικρές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με τον κύκλο Kalina (KCS34) και με τον Οργανικό Κύκλο Rankine (ORC). Η μοντελοποίηση πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού AspenPlus. Τα μοντέλα έχουν επικυρωθεί με δεδομένα από δύο γ/θ μονάδες, με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης να συμφωνούν πολύ καλά με τα εργασιακά δεδομένα. Μετά το στάδιο της επικύρωσης, τα μοντέλα αυτά χρησιμοποιήθηκαν για την παραμετρική ανάλυση της απόδοσης των μονάδων για ένα ευρύ φάσμα κλιματικών και γ/θ συνθηκών του πεδίου Ερατεινού-Χρυσούπολης. Η θερμοκρασία εισόδου του γ/θ ρευστού θεωρείται ότι βρίσκεται στην περιοχή 90-120 °C, ενώ η θερμοκρασία επανεισαγωγής του ρευστού υποτίθεται ότι είναι μεταξύ 70 και 80 °C. Προκειμένου να καθοριστούν οι περιορισμοί στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας επιχειρείται μία ενεργειακή (και εξεργειακή) ανάλυση των μονάδων. Επίσης, γίνεται ανάλυση ευαισθησίας των μονάδων για να προσδιοριστεί η επίδραση των κυριότερων παραμέτρων (π.χ. του κλάσματος μάζας της αμμωνίας για το KRS34 και του ψυκτικού μέσου που χρησιμοποιείται για το ORC, της πίεσης του κύκλου και της θερμοκρασίας) στην παραγόμενη ισχύ και στην απόδοση και στο μέγεθος των μονάδων.

2. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΔΥΑΔΙΚΩΝ ΚΥΚΛΩΝ

Το πρώτο βήμα για την παραμετρική διερεύνηση είναι η ανάπτυξη των κατάλληλων μοντέλων για τον κύκλο KALINA (KCS34) και τον Οργανικό Κύκλο Rankine (ORC). Ο τελευταίος κύκλος χρησιμοποιείται συστηματικά με γ/θ ρευστά χαμηλής/μέσης ενθαλπίας, ενώ ο πρώτος θεωρείται ότι παρουσιάζει υψηλότερη θερμική απόδοση ισχύος και μέχρι τώρα έχει χρησιμοποιηθεί σε λίγες γ/θ περιοχές.

Η Εικόνα 1 παρουσιάζει το σχηματικό διάγραμμα της διεργασίας του κύκλου Kalina. Θερμότητα από ρευστά με χαμηλή/μέση θερμοκρασίας μεταφέρεται διαμέσου ενός αναλλάκτη θερμότητας σε ένα κυκλοφορούν μίγμα αμμωνίας και νερού. Το σημείο βρασμού

και η θερμοκρασία συμπύκνωσης μεταβάλλονται με τη σύσταση του μίγματος αμμωνίας-νερού. Κατά τη διάρκεια της εξάτμισης η αναλογία του μίγματος αλλάζει. Μετά τον διαχωριστή των φάσεων, ο πλούσιος σε αμμωνία ατμός διέρχεται διαμέσου του στροβίλου και μία γεννήτρια παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Το κορεσμένο υγρό από τον διαχωριστήρα ψύχεται στον αναγεννητήρα σε υψηλή θερμοκρασία (HT), όπου η αισθητή θερμότητα στο ρεύμα αυτό χρησιμοποιείται για την προθέρμανση του ρεύματος τροφοδοσίας προς τον εξατμιστήρα. Αυτό το υγρό ρεύμα στη συνέχεια κατευθύνεται προς την είσοδο ενός αναγεννητήρα χαμηλής θερμοκρασίας (LT), όπου συνενώνεται με τον ατμό από την έξοδο του στροβίλου. Το διαφασικό ρευστό ψύχεται στον αναγεννητήρα LT που προθερμαίνει το ρεύμα τροφοδοσίας και συμπυκνώνεται στο συμπυκνωτή. Λόγω της αλλαγής της σύστασης του μίγματος, η θερμοκρασία εξάτμισης αυξάνει συνεχώς στην περιοχή του υγρού ατμού, ενώ μειώνεται κατά τη συμπύκνωση. Κατά συνέπεια, η μέθοδος μπορεί εύκολα να προσαρμοστεί στη σχετικά χαμηλή θερμοκρασία του υπό εξέταση γ/θ ρευστού και στη σχετικά υψηλή θερμοκρασία του νερού ψύξης, μειώνοντας την μη-αντιστρεπτότητα του εναλλάκτη θερμότητας. Οι περιορισμοί του κύκλου υπαγορεύονται από το σημείο δρόσου του μίγματος, δηλαδή όταν ο βρασμός του μίγματος είναι πλήρης, και από τη θερμοκρασία φυσαλίδας του μίγματος, καθώς για να εξασφαλιστεί ασφαλής λειτουργία του κύκλου αυτή θα πρέπει να είναι χαμηλότερη ή ίση με τη θερμοκρασία εξόδου του αρχικού ρευστού.



Εικόνα 1: Απλοποιημένο σχηματικό διάγραμμα του κύκλου Kalina KCS34.

Ένας απλός ORC είναι ένας κύκλος Rankine στον οποίο χρησιμοποιείται ως εργαζόμενο ρευστό μία οργανική ουσία με χαμηλό σημείο ζέσεως. Λόγω των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων του εργαζόμενου μέσου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν γ/θ ρευστά μέσης ενθαλπίας. Πολλές οργανικές ενώσεις έχουν χρησιμοποιηθεί στους ORC για να συνδυαστούν με τη θερμοκρασία της διαθέσιμης πηγής θερμότητας. Οι οργανικές ουσίες που χρησιμοποιούνται έχουν γενικά υψηλό μοριακό βάρος, με αποτέλεσμα τη χρήση σχετικά μικρών ογκομετρικών παροχών, κάτι που κάνει το μέγεθος της μονάδας ORC να είναι σχετικά μικρό. Ένα άλλο πλεονέκτημα ορισμένων οργανικών ενώσεων είναι ότι δεν χρειάζεται να είναι υπέρθερμα, όπως με τον ατμό, καθώς δεν σχηματίζουν υγρά σταγονίδια κατά την εκτόνωση τους στο στρόβιλο. Αυτό αποτρέπει τη διάβρωση των περιφυίων του στροβίλου και παρέχει ευελιξία στο σχεδιασμό των εναλλακτών θερμότητας. Σε αντίθεση με τον κύκλο Kalina, η εξάτμιση και η συμπύκνωση πραγματοποιούνται σε σταθερές θερμοκρασίες, επιτρέποντας την παραγωγή ισχύος σε υψηλότερη εντροπία.

Η καθαρή παραγωγή ισχύος από το κύκλο, P_{NET}, δίνεται από τη σχέση

$$P_{NET} = P_G - P_P \quad (1)$$

όπου, P_G και P_P είναι η συνολική ισχύς που παράγεται στη γεννήτρια και η συνολική ισχύς που καταναλώνεται από την αντλία, αντίστοιχα.

Ο συνήθης ορισμός της θερμικής απόδοσης, $\eta_{thermal}$, είναι

$$\eta_{thermal} = \frac{P_{NET}}{Q_{BRINE}} = \frac{P_{NET}}{\dot{m}_{BRINE} \cdot (h_{BRINE,in} - h_{BRINE,out})} \quad (2)$$

όπου Q , m , και h είναι η γ/θ θερμότητα που προσφέρεται (εισροή θερμότητα στον κύκλο), η μαζική παροχή του γ/θ νερού και η ειδική ενθαλπία, αντίστοιχα.

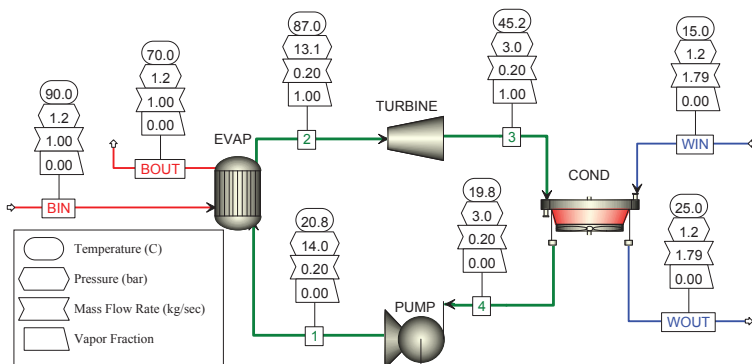
Μια πιο αντιπροσωπευτική μέτρηση της απόδοσης των μονάδων μπορεί να δοθεί με την εξεργειακή απόδοση, η_{Ex} , η οποία ορίζεται ως

$$\eta_{Ex} = \frac{P_{NET}}{Ex_{BRINE,in} - Ex_{BRINE,out}} \quad (3)$$

όπου Ex δηλώνει τη διαθέσιμη εξέργεια.

Η μοντελοποίηση σε αυτή την εργασία έγινε χρησιμοποιώντας το λογισμικό Aspen Plus. Το λογισμικό αυτό περιλαμβάνει μεγάλο αριθμό βιβλιοθηκών και μεθόδων για τον υπολογισμό των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων των εργαζόμενων ρευστών, καθώς και ενσωματωμένα «μπλοκ» που προσομοιώνουν τις βασικές διεργασίες (όπως οι μετατροπές πίεσης, εναλλάκτες θερμότητας και διαχωριστές) που απαιτούνται για την μοντελοποίηση των κύκλων. Στις ενότητες που ακολουθούν περιγράφεται η μεθοδολογία μοντελοποίησης όλων των στοιχείων των συστημάτων χρησιμοποιώντας την ορολογία της Aspen Plus (λέξεις με πλάγιους χαρακτήρες).

Ο Στρόβιλος και η Αντλία προσομοιώνονται στο Aspen Plus χρησιμοποιώντας το μπλοκ *Compr* με τον καθορισμό της πίεσης εξόδου και των ισεντροπικών αποδόσεων. Ο εξατμιστήρας, ο συμπυκνωτής και οι αναγεννητήρες προσομοιώνονται χρησιμοποιώντας το μπλοκ *HeatX* με μια απλοποιημένη μέθοδο υπολογισμού που επιλέγεται. Τα μπλοκ λαμβάνουν υπόψη τις απώλειες πίεσης και στα δύο ρεύματα. Στον εξατμιστήρα καθορίζεται η μείωση της θερμοκρασίας του θερμού ρεύματος, ενώ στο συμπυκνωτή απαιτείται ότι το κλάσμα του ατμού στην έξοδο να είναι μηδέν. Καθορίζονται επίσης δύο επιπλέον παράμετροι: η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ θερμής εξόδου και ψυχρής εισόδου στον αναγεννητήρα HT και η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ θερμής εισόδου και ψυχρής εξόδου στον αναγεννητήρα LT. Ο διαχωριστής προσομοιώνεται χρησιμοποιώντας το μπλοκ *Flash2* χωρίς τον καθορισμό της πτώσης πίεσης. Τα μπλοκ *Mixer* και *Valve* χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση της ανάμιξης και των διεργασιών ελέγχου της πίεσης. Στην Εικόνα 2 παρουσιάζεται το μοντέλο ORC που αναπτύχθηκε στο Aspen Plus.



Εικόνα 2: Διάγραμμα ροής του μοντέλου ORC με την Aspen Plus.

3. ΕΠΙΚΥΡΩΣΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

Τα μοντέλα για τους κύκλους Kalina και ORC έχουν επικυρωθεί επιτυχώς με πειραματικά δεδομένα από δύο υφιστάμενες γ/θ εγκαταστάσεις. Η μονάδα στο Husavík της Ισλανδίας λειτουργεί με τον κύκλο KCS34 με ένα μίγμα από 82% αμμωνία και νερό [4]. Η θερμοκρασία του ρευστού στο Husavík είναι 121 °C και αυτό εξέρχεται από τη μονάδα σε θερμοκρασία 80 °C, κατάλληλη για εφαρμογές τηλεθέρμανσης. Η εγκατεστημένη ισχύς του εργοστασίου είναι 1,7 MWe. Στην περίπτωση της μονάδας στο Chena της Αλάσκας χρησιμοποιείται γ/θ ρευστό χαμηλής ενθαλπίας για την παραγωγή 210 kWe ισχύος με τη χρήση κύκλου ORC με εργαζόμενο ρευστό το R134a [5]. Και στις δύο μονάδες, ο συμπυκνωτής τροφοδοτείται με νερό 5 °C. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τις δύο αυτές μονάδες βρίσκονται σε πολύ καλή συμφωνία με τα διαθέσιμα δεδομένα της βιβλιογραφίας.

Μετά το στάδιο της επικύρωσης, τα μοντέλα χρησιμοποιούνται για τη διερεύνηση της απόδοσης μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στο πεδίο Ερατεινού-Χρυσούπολης για ένα ευρύ φάσμα κλιματικών και γεωθερμικών συνθηκών. Η περιοχή θερμοκρασιών εισόδου στην μονάδα του γ/θ ρευστού που διερευνάται είναι 90-120 °C, ενώ η θερμοκρασία εξόδου του ρευστού υποτίθεται ότι είναι μεταξύ 70 και 80 °C. Τρεις διαφορετικές περιπτώσεις έχουν εξεταστεί και αξιολογηθεί, οι λεπτομέρειες των οποίων δίνονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Περιπτώσεις που θεωρούνται για την παραμετρική διερεύνηση.			
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ	A	B	Γ
Θερμοκρασία εισόδου γ/θ ρευστού (°C)	120	105	90
Θερμοκρασία εξόδου γ/θ ρευστού (°C)	80	75	70
Θερμοκρασία νερού ψύξης (°C)	15	15	15
Θερμοκρασία εξόδου νερού ψύξης (°C)	20	20	20
Θερμοκρασία συμπύκνωσης (°C)	25	25	25

Η περίπτωση A είναι αντιπροσωπευτική της μέγιστης διαθέσιμης θερμότητας εισόδου, όταν η θερμοκρασία εξόδου του ρευστού διατηρείται σε μια θερμοκρασία κατάλληλη για εφαρμογές τηλεθέρμανσης. Η περίπτωση Γ αντιπροσωπεύει την ελάχιστη θερμοκρασία του γ/θ ρευστού, σε συνδυασμό με τη χαμηλότερη δυνατή θερμοκρασία εξόδου του ρευστού από τη μονάδα (70 °C). Τέλος, η περίπτωση B αντιστοιχεί στη μέση θερμοκρασία γεωτρήσεων παραγωγής και επανεισαγωγής. Για όλες τις περιπτώσεις γίνονται οι ακόλουθες εύλογες υποθέσεις: θερμοκρασία εισόδου νερού ψύξης 15 °C (μέση ετήσια θερμοκρασία του νερού στην περιοχή του Ερατεινού-Χρυσούπολης), θερμοκρασία εξόδου νερού ψύξης 20 °C και θερμοκρασία συμπύκνωσης 25 °C. Για την παραμετρική διερεύνηση θεωρούνται και οι ακόλουθες πρόσθετες τυπικές παραδοχές: ισεντροπική απόδοση του στρόβιλου 0,8, απόδοση αντλίας 0,7, απόδοση ηλεκτρικής γεννήτριας και εναλλακτήρα 0,95 και ελάχιστη διαφορά θερμοκρασίας στους αναγεννητές 5 °C. Οι παράμετροι που μεταβάλλονται και απαιτούνται για τον υπολογισμό κάθε κύκλου είναι η πίεση και η θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο και το κλάσμα μάζας της αμμωνίας για τη μονάδα KCS34 ή το οργανικό υγρό που χρησιμοποιείται για τη μονάδα ORC.

Η δυναμικότητα μιας μονάδας για την παραγωγή ηλεκτρισμού συνήθως αξιολογείται σε σχέση με την καθαρή ισχύ και με τη θερμική και εξεργειακή απόδοση [6]. Σε αυτή την εργασία χρησιμοποιήθηκαν και ορισμένα άλλα κριτήρια για την αξιολόγηση της απόδοσης των μονάδων:

- Η μαζική παροχή λειτουργίας (ενδεικτική για τα κόστη του στρόβιλου και της αντλίας).

- Το UA , δηλαδή το γινόμενο του U και A για κάθε εναλλάκτη θερμότητας, όπου το U είναι ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας και A η επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας. Η

παράμετρος αυτή υποδηλώνει το κόστος των εναλλακτών θερμότητας που απαιτούνται στη μονάδα [7].

- Ο συνολικός δείκτης κόστους, CI , που ορίζεται ως:

$$CI = \dot{m}_{wf} \cdot UA_{total} \quad (4)$$

- Ο δείκτης κόστους επιτευξιμότητας (performance cost index), PCI :

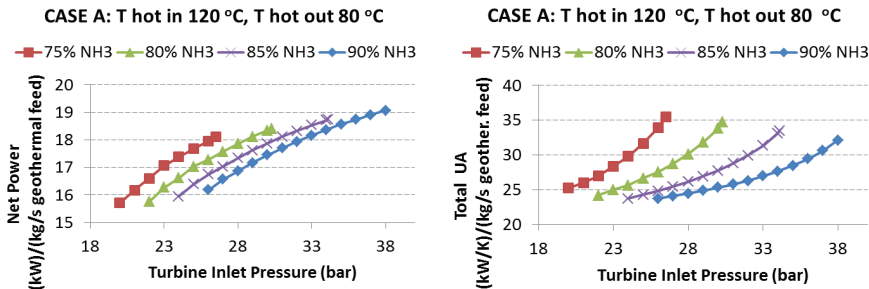
$$PCI = \frac{P_{NET}}{\dot{m}_{wf} \cdot UA_{total}} \quad (5)$$

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

4.1. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΚΑΛΙΝΑ

Τα κλάσματα μάζας της αμμωνίας που διερευνήθηκαν είναι 0.75, 0.8, 0.85 και 0.9. Τα αποτελέσματα για αυτά τα κλάσματα παρουσιάζονται στις Εικόνες 3 έως 5. Οι διάφορες καμπύλες στην Εικόνα 3 αντιπροσωπεύουν την καθαρή ισχύ και το συνολικό UA για τα τέσσερα μίγματα αμμωνίας-νερού ως συνάρτηση της πίεσης στην είσοδο του στροβίλου.

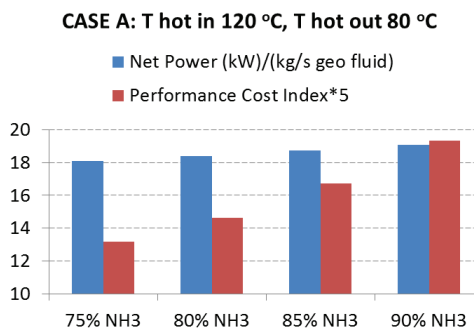
Η θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο έχει καθορισθεί να είναι χαμηλότερη από τη θερμοκρασία εισόδου του θερμού νερού κατά 5°C , δεδομένου ότι για μια συγκεκριμένη συγκέντρωση αμμωνίας και μία συγκεκριμένη πίεση στην είσοδο του στροβίλου, όσο χαμηλότερη είναι η θερμοκρασία τόσο μικρότερη είναι η καθαρή ισχύς που παράγεται. Όπως ήταν αναμενόμενο, η ισχύς, η μαζική παροχή και η απαιτούμενη επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας αυξάνουν με αύξηση της πίεσης. Η αντίθετη τάση παρατηρείται όσον αφορά στη συγκέντρωση του μίγματος για μία δεδομένη πίεση. Όσο είναι μεγαλύτερο το κλάσμα της αμμωνίας στο μίγμα, τόσο μειώνεται η ισχύς, η μαζική παροχή και η απαιτούμενη επιφάνεια. Ωστόσο, με αύξηση της συγκέντρωσης της αμμωνίας, η μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση αυξάνει και, ως εκ τούτου, η μέγιστη ισχύς επιτυγχάνεται στην υψηλότερη συγκέντρωση αμμωνίας.



Εικόνα 3: Αποτελέσματα για την περίπτωση A με θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο 115°C .

Ένα άλλο ενδιαφέρον αποτέλεσμα προκύπτει όταν εξετάζεται ο δείκτης κόστους επιτευξιμότητας σε σχέση με την αντίστοιχη μέγιστη ισχύ για κάθε συγκέντρωση της αμμωνίας, όπως φαίνεται καθαρά στην Εικόνα 4. Παρατηρείται ότι με αύξηση του κλάσματος μάζας της αμμωνίας κατά 5%, παίρνουμε μια αύξηση της μέγιστης ισχύος κατά 1,5-2%, ενώ η αντίστοιχη αύξηση του δείκτη κόστους επιτευξιμότητας είναι 10-15%. Και τα δύο κριτήρια υποδηλώνουν ότι η βέλτιστη επιλογή είναι η τιμή του κλάσματος μάζας της NH_3 90%, με μέγιστη επιτρεπτή πίεση 38 bar. Η μέγιστη συγκέντρωση της αμμωνίας (90%) στην ανάλυση επιβλήθηκε από την απαίτηση ότι το ποσοστό της υγρής φάσης του μίγματος στην έξοδο του στροβίλου να είναι μικρότερη ή ίση του 5%. Ποσοστό συμπύκνωσης μεγαλύτερο του 5% στην έξοδο του στροβίλου δεν θεωρείται αποδεκτό, δεδομένου ότι θα μπορούσε να οδηγήσει σε διάβρωση των πτερυγίων του στροβίλου. Με αύξηση της πίεσης για μια δεδομένη συγκέντρωση αμμωνίας, το κλάσμα ατμού μειώνεται, φθάνοντας σε ένα ελάχιστο κατά την

μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση. Καθώς αυξάνεται η συγκέντρωση, το ελάχιστο κλάσμα ατμού γίνεται όλο και μικρότερο φθάνοντας στο όριο του 95% για συγκέντρωση αμμωνίας 90%.

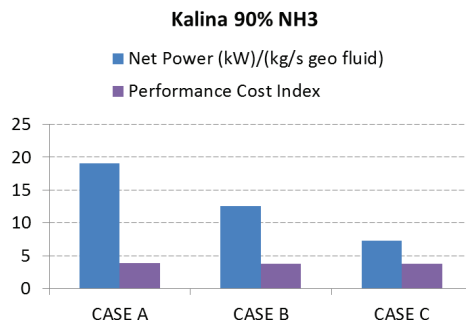


Εικόνα 4: Μέγιστη καθαρή ισχύς και ο αντίστοιχος δείκτης κόστους επιτευξιμότητας για διάφορα κλάσματα μάζας της αμμωνίας.

Παρόμοια τάση παρατηρείται και για τις περιπτώσεις Β και Γ. Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα της διερεύνησης. Όπως είναι αναμενόμενο, περισσότερη ισχύς παράγεται με αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου και της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ εισόδου και εξόδου του γ/θ ρευστού. Είναι ενδιαφέρον ότι, όπως προκύπτει από την Εικόνα 5, ο δείκτης κόστους επιτευξιμότητας είναι σχεδόν σταθερός, περίπου στο 3,8, ανεξάρτητα από την εξεταζόμενη περίπτωση. Αυτό υποδηλώνει ότι το κόστος του εξοπλισμού ανά kW δεν αλλάζει σημαντικά με το μέγεθος της εγκατάστασης.

Πίνακας 2: Τα βέλπιστα αποτελέσματα του KCS34 για τις διάφορες περιπτώσεις που εξετάζονται.

Περίπτωση	A	B	Γ
Μέγιστη καθαρή ισχύς (kW)	19.06	12.57	7.25
Θερμική απόδοση (%)	11.38	10.02	8.68
Εξεργειακή απόδοση (%)	50.13	48.64	47.24
UA (kW/K)	32.13	26.49	20.49
Μαζική παροχή μίγματος (kg/s)	0.153	0.124	0.094
Πίεση εξάτμισης (bar)	38	33.1	28.7
Πίεση συμπύκνωσης (bar)	8.68	8.68	8.68
Θερμοκρασία εισόδου στον στρόβιλο.(°C)	115	100	85

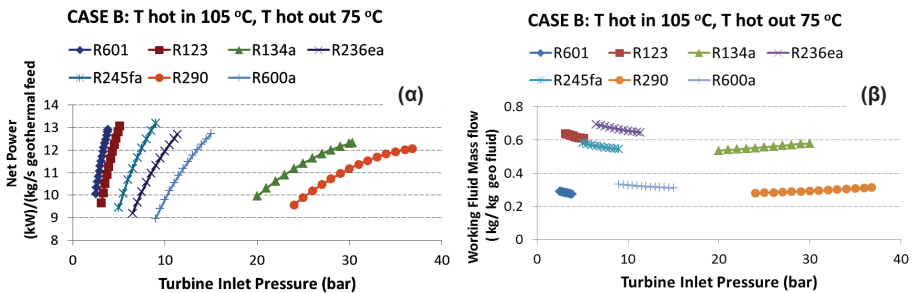


Εικόνα 5: Μέγιστη ισχύς και ο αντίστοιχος δείκτης κόστους επιτευξιμότητας για τις τρεις περιπτώσεις που θεωρούνται.

4.2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ORC

Στην παρούσα μελέτη εξετάζονται επτά οργανικά υγρά με διαφορετικά χαρακτηριστικά: R134a, R123, R236ea, R245fa, R123, ισοβουτάνιο (R600a), προπάνιο (R290) και n-πεντάνιο (R601). Οι φυσικοχημικές ιδιότητές τους βρίσκονται στην αναφορά [8]. Τα σημεία βρασμού τους κυμαίνονται από -42 μέχρι 36 °C και τα μοριακά τους βάρη από 58 έως 153. Η κρίσιμη θερμοκρασία είναι στην περιοχή 96-197 °C, ενώ η κρίσιμη πίεση στα 33-40 bar. Τα περισσότερα από τα οργανικά ρευστά (R123, R236ea, R245fa, R600a και R601) είναι «ξηρά» ρευστά, ενώ το R134a και το προπάνιο είναι «υγρά» ρευστά.

Με την επιλογή του εργαζόμενου ρευστού οι παράμετροι που απαιτούνται για την αξιολόγηση του κύκλου είναι η πίεση και η θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο, με τις άλλες παραμέτρους να παραμένουν σταθερές. Οι περιορισμοί για την πίεση και τη θερμοκρασία που επιβάλλονται από την ελάχιστη διαφορά θερμοκρασία στους εναλλάκτες θερμότητας, και η θερμοκρασία φυσαλίδας και δρόσου του εργαζόμενου ρευστού. Στην Εικόνα 6α παρουσιάζεται η καθαρή ισχύς που παράγεται με τα διάφορα υγρά ως συνάρτηση της πίεσης στην είσοδο του στρόβιλου. Η θερμοκρασία στην είσοδο του στρόβιλου έχει καθοριστεί χαμηλότερη κατά 5 °C από την θερμοκρασία της θερμής εισόδου για τα «υγρά» ρευστά (R134a και R290), αφού έχει διαπιστωθεί ότι παράγεται χαμηλότερη καθαρή ισχύς σε χαμηλότερη θερμοκρασία για συγκεκριμένη πίεση εισόδου στον στρόβιλο. Για τα «ξηρά» ρευστά η θερμοκρασία εισόδου του στρόβιλου είναι η θερμοκρασία κορεσμού για τη συγκεκριμένη πίεση. Επιβεβαιώθηκε επίσης ότι για αυτά τα υγρά η προσέγγιση αυτή φαίνεται να είναι πιο αποτελεσματική από ό,τι για μία σταθερή θερμοκρασία [9]. Όπως αναμένεται, η παραγόμενη ισχύς αυξάνεται με αύξηση της πίεσης. Συνεπώς, η μέγιστη ισχύς για κάθε ρευστό επιτυγχάνεται στη μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση για δεδομένη θερμοκρασία συμπύκνωσης και δεδομένες θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου του γ/θ ρευστού.

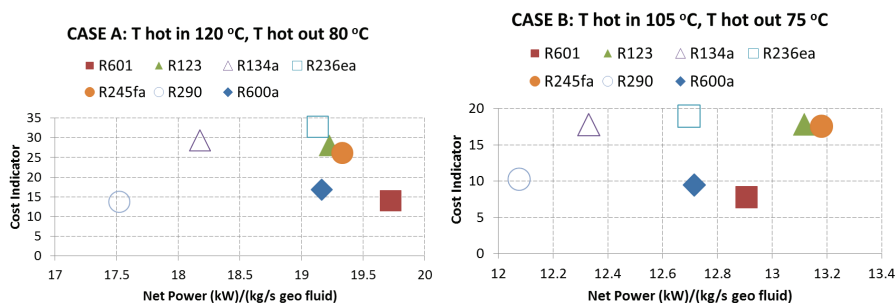


Εικόνα 6: (α) Ισχύς vs πίεσης στην είσοδο του στρόβιλου για τα διάφορα ρευστά. (β) Μαζική ροή vs πίεσης στην είσοδο του στρόβιλου για τα διάφορα ρευστά.

Όπως είναι αναμενόμενο, η ισχύς αυξάνει με την αύξηση της πίεσης. Συνεπώς, η μέγιστη ισχύς για κάθε ρευστό επιτυγχάνεται κατά τη μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση για μία δεδομένη θερμοκρασία συμπύκνωσης και θερμοκρασία του γ/θ ρευστού στην είσοδο και την έξοδο. Η Εικόνα 6β δείχνει ότι η απαιτούμενη μαζική ροή του εργαζόμενου ρευστού είναι μικρότερη για τα ελαφρύτερα ρευστά (τα ρευστά με μικρότερο μοριακό βάρος). Είναι επίσης προφανές ότι υπάρχει αντίθετη τάση για τα «υγρά» και για τα «ξηρά» ρευστά. Με την αύξηση της πίεσης, η μαζική παροχή για τα «ξηρά» ρευστά μειώνεται, ενώ αυξάνει ελαφρώς για τα «υγρά» ρευστά.

Στην Εικόνα 7 παρουσιάζεται η μέγιστη ισχύς που λαμβάνεται για κάθε ρευστό μαζί με το σχετικό δείκτη του κόστους. Παρατηρείται ότι, σε γενικές γραμμές, τα ρευστά που «παράγουν» περισσότερη ισχύ είναι τα «ξηρά» ρευστά, με το υψηλότερο σημείο ζέσεως μεταξύ των ρευστών που εξετάστηκαν (R123, R601, R245fa). Η παρατήρηση αυτή είναι σε συμφωνία με την παρατήρηση του Mago et al. [10]. Από την άλλη πλευρά, τα ρευστά με τη χειρότερη απόδοση είναι τα ρευστά με το χαμηλότερο σημείο βρασμού (R134a, R290). Σε

σχέση με το δείκτη κόστους (το οποίο σχετίζεται με το μέγεθος των μονάδων), μπορεί να δείχθει ότι σχετίζεται με το μοριακό βάρος των ρευστών. Τα ελαφρύτερα ρευστά (R601, R600a και R290) εμφανίζουν το μικρότερο δείκτη κόστους. Η κατάταξη των ρευστών για τις τρεις περιπτώσεις που θεωρήθηκαν φαίνεται να αλλάζει για την μέγιστη ισχύ που παράγεται. Το R601 δίνει την υψηλότερη ισχύ στην περίπτωση Α, το R245fa στην περίπτωση Β και το R123 στην περίπτωση Γ.



Εικόνα 7: Ισχύς vs Δείκτης Κόστους για τα διάφορα υγρά για τις περιπτώσεις Α και Β.

4.3. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΚΥΚΛΩΝ ΚΑΛΙΝΑ ΚΑΙ ORC

Η σύγκριση των δύο κύκλων με τα βέλτιστα αποτελέσματα παρουσιάζεται στον Πίνακα 3. Σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα αυτά αντιστοιχούν στη μέγιστη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με τις παραμέτρους να αναφέρονται σε μαζική παροχή 1 kg/s (με εξαίρεση βεβαίως τις αποδόσεις). Είναι προφανές ότι σε όλες τις περιπτώσεις, ο κύκλος ORC πλεονεκτεί του KCS34 αναφορικά με την ισχύ και την απόδοση. Το πλεονέκτημα του ORC είναι σαφέστερο στις χαμηλότερες θερμοκρασίες του γ/θ ρευστού (περίπτωση Γ), όπου ο ORC παράγει περίπου 8% περισσότερη ισχύ από ό,τι ο KCS34. Ωστόσο, σε όλες τις περιπτώσεις, ο κύκλος Kalina απαιτεί σημαντικά μικρότερο συνολικό UA και 2 έως 4 φορές λιγότερη ποσότητα εργαζόμενου ρευστού. Δεδομένου ότι αυτές οι δύο παράμετροι σχετίζονται με το μέγεθος και το κόστος των μονάδων, τελικά η επιλογή του κύκλου θα πρέπει να συνοδεύεται από μια λεπτομερή οικονομική ανάλυση, λαμβάνοντας επίσης υπόψη τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και την ασφάλεια της μονάδας. Με την υπόθεση ότι μία ρεαλιστική παροχή γ/θ ρευστού είναι 100 kg/s, η ηλεκτρική ενέργεια που μπορεί να παραχθεί είναι μεταξύ 700 kW και 2 MWe.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται μία παραμετρική διερεύνηση και αξιολόγηση δύο δισυγκρινών κύκλων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση γ/θ ρευστών χαμηλής/μέσης ενθαλπίας στην Βόρεια Ελλάδα. Τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται στη διερεύνηση έχουν αναπτυχθεί σε περιβάλλον Aspen Plus και προσομοιώνουν μικρές μονάδες παραγωγής ισχύος με τον κύκλο ΚΑΛΙΝΑ (KCS34) και τον Οργανικό Κύκλο Rankine (ORC). Αυτά τα μοντέλα έχουν επικυρωθεί επιτυχώς με πειραματικά δεδομένα από δύο υφιστάμενες εγκαταστάσεις. Τα επικυρωμένα μοντέλα χρησιμοποιήθηκαν για την παραμετρική μελέτη της απόδοσης μονάδας για ευρύ φάσμα των κλιματικών και των γεωθερμικών συνθηκών που επικρατούν στο πεδίο Ερατεινού-Χρυσούπολης. Η ανάλυση έδειξε ότι, σε αντίθεση με τη γενική πεποίθηση, ένας κύκλος ORC με το κατάλληλο εργαζόμενο ρευστό είναι πιο αποτελεσματικός από τον κύκλο Kalina. Ωστόσο, υπάρχει ισχυρή ένδειξη ότι το απαιτούμενο μέγεθος της μονάδας είναι μεγαλύτερο για τον ORC και, συνεπώς, το κόστος είναι σημαντικά υψηλότερο.

Πίνακας 3: Βέλτιστα αποτελέσματα για τις μονάδες ORC και KCS34 για τις τρεις περιπτώσεις.			
	ORC	KCS34	% σχετ. Διαφ.
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ Α			
Εργαζόμενο ρευστό	R601	90% NH ₃	
Μέγιστη καθαρή ισχύς (kW)	19.72	19.06	3.46
Θερμική απόδοση (%)	11.73	11.38	3.07
Εξεργειακή απόδοση (%)	51.68	50.13	3.09
Ολικό <i>UA</i> (kW/K)	40	32.13	24.5
Μαζική παροχή εργ. ρευστού (kg/s)	0.35	0.1535	128
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ Β			
Εργαζόμενο ρευστό	R245fa	90% NH ₃	
Μέγιστη καθαρή ισχύς (kW)	13.18	12.57	4.85
Θερμική απόδοση (%)	10.47	10.02	4.49
Εξεργειακή απόδοση (%)	50.8	48.64	4.44
Ολικό <i>UA</i> (kW/K)	32.28	26.5	21.8
Μαζική παροχή εργ. ρευστού (kg/s)	0.543	0.1245	336
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ Γ			
Εργαζόμενο ρευστό	R123	90% NH ₃	
Μέγιστη καθαρή ισχύς (kW)	7.81	7.25	7.72
Θερμική απόδοση (%)	9.30	8.68	7.14
Εξεργειακή απόδοση (%)	50.64	47.2	7.28
Ολικό <i>UA</i> (kW/K)	22.79	20.49	11.2
Μαζική παροχή εργ. ρευστού (kg/s)	0.416	0.094	342

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Kolios, N., Koutsinos, S., Arvanitis, A. and Karydakos, G., 2005, "Geothermal Situation in Northeastern Greece", Proceedings, World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, pp. 14.
- [2] Mendrinou, D., Choropanitis, I., Polyzou, O., Karytsas, C., 2010, "Exploring for geothermal resources in Greece", Geothermics, 39, pp. 124-137.
- [3] DiPippo, R., 2004, "Second Law assessment of binary plants generating power from low-temperature geothermal fluids", Geothermics, 33, pp. 565-586.
- [4] Mlacak, H.A., Mirololi, M., Hjartarson, H., Húsavíkur, O., and Ralph, M., Notes from the north: a report on the debut year of the 2 MW Kalina cycle® geothermal power plant in Húsavík, Iceland. Geothermal Res. Council Trans. 26, (2002), 715-718.
- [5] Aneke, M., Agnew, B., and Underwood, C., 2011, Performance analysis of the Chena binary geothermal power plant, Applied Thermal Engineering, 31, pp. 1825-1832.
- [6] Nasruddin, Usvika, R., Rifaldi, M., Noor, A.: Energy and exergy analysis of Kalina cycle system (KCS) 34 with mass fraction ammonia-water mixture variation, Journal of Mechanical Science and Technology, 23, (2009), 1871-1876.
- [7] Madhawa Hettiarachchi, H.D., Golubovic, M., Worek, W.M., and Ikegami, Y., 2007, "Optimum design criteria for an Organic Rankine cycle using low-temperature geothermal heat sources", Energy, 32, pp. 1698-1706.
- [8] Chen, H., Goswami, D.Y., and Stefanakos, E.K., 2010, "A review of thermodynamic cycles and working fluids for the conversion of low-grade heat", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14, pp. 3059-3067.
- [9] Dai, Y., Wang, J., and Gao, L., 2009, "Parametric optimization and comparative study of organic Rankine cycle (ORC) for low grade waste heat recovery", Energy Conversion and Management, 50, pp 576-582.
- [10] Mago, P.J., Chamra, L.M., and Somayaji, C., 2007, "Performance analysis of different working fluids for use in organic Rankine cycles", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 221, pp 255-263.

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ, ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΚΑΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΟΦΕΛΗ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΒΑΘΟΥΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ ΣΕ ΚΤΙΡΙΑ ΤΟΥ ΤΡΙΤΟΓΕΝΟΥΣ ΤΟΜΕΑ ΤΗΣ ΚΥΠΡΟΥ

A. Μιχόπουλος*, **B. Βούλγαρη¹**, **A. Τσικαλουδάκη²**, **Θ. Ζαχαριάδης¹**

*Τμήμα Επιστήμης και Τεχνολογίας Περιβάλλοντος, Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου, Τ.Θ. 50329, Τ.Κ. 3603 Λεμεσός, Κύπρος.

² Εργαστήριο Οικοδομικής και Φυσικής των Κτιρίων, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ., Τ.Θ. 429, Τ.Κ. 54 124 Θεσσαλονίκη, Ελλάδα.

a.michopoulos@cut.ac.cy, vvoulgar@hotmail.com, katgt@civil.auth.gr,
t.zachariadis@cut.ac.cy

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εγκατάσταση συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας αποτελεί μία από τις βασικές επιλογές συστημάτων θέρμανσης και ψύξης, η οποία συμβάλλει στη μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας των κτιριακών μονάδων. Παράλληλα τα συστήματα αυτά συμβάλλουν και στη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) του κτιριακού τομέα ενισχύοντας με τον τρόπο αυτό την αειφορία του.

Στην εργασία αυτή μελετάται και αξιολογείται η εγκατάσταση ενός αβαθούς γεωθερμικού συστήματος με κατακόρυφο γεωεναλλάκτη και αντλίες θερμότητας νερού-νερού σε ένα τυπικό κτίριο γραφείων της Κύπρου. Το κτίριο σχεδιάστηκε έτσι ώστε να ακολουθεί την τυπολογία του κτιριακού αποθέματος με τη συγκεκριμένη χρήση της Κύπρου και να ικανοποιεί τις ελάχιστες απαιτήσεις θερμομονωτικής προστασίας σύμφωνα με τον Κυπριακό Οδηγό Θερμομόνωσης των Κτιρίων. Οι θερμικές και ψυκτικές ανάγκες του κτιριακού κελύφους υπολογίστηκαν σε ωριαία βάση με τη βοήθεια του προγράμματος ενεργειακής προσομοίωσης EnergyPlus για πέντε χαρακτηριστικές περιοχές της Κύπρου. Στη συνέχεια με βάση τις απαιτήσεις αυτές και με τη χρήση του λογισμικού EED 3.16, διαστασιολογήθηκε ο κατακόρυφος γεωεναλλάκτης για κάθε χαρακτηριστική περιοχή. Η ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας του αβαθούς γεωθερμικού συστήματος προσδιορίστηκε μέσω εικοσαετούς ενεργειακής ανάλυσης του συστήματος με τη βοήθεια ίδιου κώδικα ενεργειακής προσομοίωσης των συστημάτων αυτών, ο οποίος αναπτύχθηκε και αξιολογήθηκε κατά το παρελθόν. Η ηλεκτρική κατανάλωση του συστήματος ανάχθηκε κατόπιν σε κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας και στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα από τη λειτουργία του αβαθούς γεωθερμικού συστήματος με βάση τους συντελεστές εκπομπής του Κυπριακού ενεργειακού συστήματος. Τα αποτελέσματα αυτά συγκρίθηκαν με την αντίστοιχη κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας και εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα που προκύπτουν από τη χρήση του τυπικού συστήματος θέρμανσης και ψύξης των Κυπριακών κτιρίων. Ως τυπικό σύστημα θεωρήθηκε λέβητας πετρελαίου ή υγραερίου και αερόψυκτες αντλίες θερμότητας. Η εργασία ολοκληρώνεται με την οικονομική αξιολόγηση της χρήσης των δυο συστημάτων με βάση τη μεθοδολογία του Κανονισμού 244/2012/ΕΚ μέσω της οποίας προσδιορίζεται το οικονομικό όφελος από τη χρήση συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας με κατακόρυφο γεωεναλλάκτη στα κτίρια του τριτογενούς τομέα της Κύπρου.

Λέξεις κλειδιά: Συστήματα αβαθούς γεωθερμίας, ενεργειακή αξιολόγηση, περιβαλλοντική αξιολόγηση, οικονομική αξιολόγηση.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η χρήση των συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας αναγνωρίζεται σήμερα ως μία από τις πλέον αποδοτικές τεχνολογίες θέρμανσης και ψύξης κτιρίων [1-2] που βασίζεται στην αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Είναι χαρακτηριστικό πως τα συστήματα αυτά προσφέρουν το 47,2% της ενέργειας που καταναλώνεται στις άμεσες χρήσεις της γεωθερμίας σε παγκόσμιο επίπεδο [3]. Τη δυναμική αυτή ενισχύουν και εμπειριστατωμένες επιστημονικές μελέτες, οι οποίες παρουσιάζουν αποτελέσματα αποδοτικής λειτουργίας υφιστάμενων εγκαταστάσεων και παρέχουν χρήσιμα συμπεράσματα για τον τρόπο σχεδιασμού και λειτουργίας των εν λόγω συστημάτων ως συνάρτηση των κλιματολογικών ιδιαιτεροτήτων της κάθε περιοχής [4-5]. Ωστόσο, σε κάποιες χώρες η εμπειρία στο σχεδιασμό συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας είναι περιορισμένη λόγω έλλειψης κατάλληλων μελετών και ενημέρωσης. Μεταξύ των χωρών αυτών συγκαταλέγεται σήμερα και η Κύπρος. Είναι χαρακτηριστικό πως η πρώτη εγκατάσταση συστήματος αβαθούς γεωθερμίας πραγματοποιήθηκε το 2006 και μέχρι σήμερα υπάρχουν περί τα 160 συστήματα, τα οποία λειτουργούν κυρίως σε αυτόνομες μονοκατοικίες.

Αντικείμενο της παρούσας μελέτης είναι η διερεύνηση του ενεργειακού, περιβαλλοντικού και οικονομικού οφέλους που προκύπτει από τη χρήση συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας σε κτίρια γραφείων της Κυπριακής επικράτειας. Στην κατεύθυνση αυτή και λαμβάνοντας υπόψη τα αρχιτεκτονικά χαρακτηριστικά των κτιρίων με χρήση γραφείων στην Κύπρο, σχεδιάζεται ένα τυπικό κτίριο γραφείων και προσδιορίζεται η ενέργεια που απαιτεί για θέρμανση και ψύξη. Οι απαιτήσεις αυτές θεωρείται πως καλύπτονται με την εγκατάσταση και χρήση συστήματος αβαθούς γεωθερμίας με κατακόρυφο γεωεναλλάκτη ή με το συμβατικό σύστημα καυστήρα-λέβητα πετρελαίου/υγραερίου και αερόψυκτου ψύκτη. Στη συνέχεια για κάθε εναλλακτικό σύστημα προσδιορίζεται η κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας που απαιτείται για την πλήρη κάλυψη των αναγκών θέρμανση και ψύξης του κτιρίου, καθώς και οι συνεπαγόμενες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Επιπρόσθετα το τελευταίο μέρος της μελέτης περιλαμβάνει την οικονομική αξιολόγηση της χρήσης των εναλλακτικών συστημάτων στη διάρκεια ζωής τους, η οποία γίνεται με τη χρήση του οικονομικού δείκτη της καθαρής παρούσης αξίας. Εκτιμάται πως τα αποτελέσματα της μελέτης θα αποτελέσουν χρήσιμους δείκτες τόσο για την πολιτεία όσο και για τους τοπικούς μελετητές και δυνητικούς χρήστες και θα συμβάλουν στην περαιτέρω διάδοση και αποδοτική χρήση των συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας στο ενεργειακό σύστημα της Κύπρου.

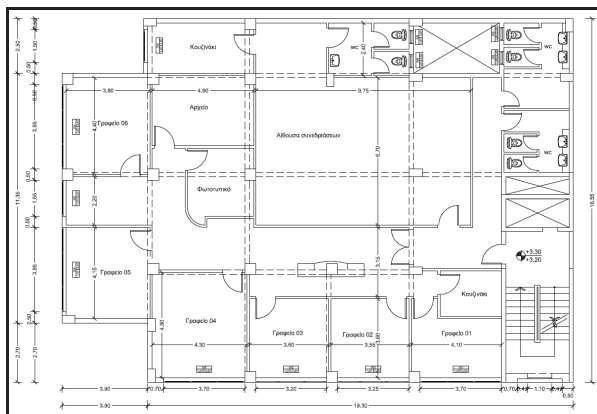
2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ

Ο προσδιορισμός των γεωμετρικών και μορφολογικών χαρακτηριστικών του τυπικού κτιρίου γραφείων στην Κύπρο βασίστηκε στην ανάλυση της τυπολογίας του κτιριακού δυναμικού της χώρας με τη συγκεκριμένη χρήση, αντλώντας πληροφορίες από την Κυπριακή Στατιστική Υπηρεσία, από μελετητές και κατασκευαστές μηχανικούς, καθώς και από επιτόπιες επισκέψεις.

Τα κτίρια του τριτογενούς τομέα αποτελούν το 34% του κτιριακού αποθέματος, με τα καταστήματα και τα γραφεία να υπερβαίνουν το 50% αυτών [6]. Συναντώνται κυρίως στις αστικές περιοχές και το ύψος τους ποικίλει ανάλογα με την πολεοδομική ζώνη που εντάσσονται. Κατά μέσο όρο αναπτύσσονται σε 4 ορόφους επάνω από το ισόγειο, το οποίο συνήθως διαμορφώνεται ως ανοικτός υπόστυλος χώρος. Η επιφάνεια που καλύπτουν δεν υπερβαίνει συχνά τα 1500m² ενώ στα τυπολογικά τους χαρακτηριστικά αναφέρονται οι μεγάλες επιφάνειες διαφανών δομικών στοιχείων και η απουσία εξωστών.

Με γνώμονα αυτά τα χαρακτηριστικά σχεδιάστηκε εκ νέου ένα κτίριο γραφείων ώστε να μπορεί να θεωρηθεί αντιπροσωπευτικό του κτιριακού αποθέματος αυτής της κατηγορίας. Πρόκειται για τετραώροφο κτίριο με πυλωτή στο ισόγειο και ορθογωνική κάτοψη εμβαδού περίπου 365 m², Εικόνα 1, η οποία επαναλαμβάνεται σε όλους τους ορόφους. Το κτίριο έχει δύο ελεύθερες πλευρές, τη νότια και τη δυτική, ενώ η βορεινή και η ανατολική πλευρά

έρχονται σε επαφή με όμορες ιδιοκτησίες και φιλοξενούν τους βοηθητικούς και τους κοινόχρηστους χώρους. Τα γραφεία αναπτύσσονται κατά μήκος των ελεύθερων πλευρών, ενώ στον πυρήνα του κτιρίου βρίσκεται η αίθουσα συνεδριάσεων.



Εικόνα 1: Κάτοψη τυπικού ορόφου

Το κτίριο έχει φέροντα οργανισμό από οπλισμένο σκυρόδεμα και τοιχοποιίες πλήρωσης από διάτρητες οπτόπλινθους. Τα εξωτερικά κατακόρυφα δομικά στοιχεία είναι θερμομονωμένα με εξηλασμένη πολυστερίνη ($\lambda = 0,035 \text{ W}/(\text{m K})$), η οποία τοποθετείται στην εξωτερική τους πλευρά. Το ίδιο υλικό χρησιμοποιείται στην επιστέγαση του κτιρίου, η οποία γίνεται με αντεστραμμένο οριζόντιο δώμα, καθώς και στα δάπεδα του πρώτου ορόφου που είναι επάνω από τον εξωτερικό αέρα. Το πάχος της θερμομονωτικής προστασίας σε κάθε δομικό στοιχείο προέκυψε με βάση τις αντίστοιχες απαιτήσεις για το μέγιστο επιτρεπόμενο συντελεστή θερμοπερατότητας του ισχύοντος κανονισμού [7] και παρουσιάζεται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Πάχη και συντελεστές θερμοπερατότητας δομικών στοιχείων του τυπικού κτιρίου			
Δομικό στοιχείο	Πάχος θερμομόνωσης [m]	U-value [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]	U _{max} [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]
Κατακόρυφα στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα σε επαφή με εξωτερικό αέρα	0,035	0,691	0,72
Εξωτερική οπτοπλινθοδομή	0,030	0,586	0,72
Κατακόρυφα στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα σε επαφή με μη θερμαινόμενο χώρο	0,035	0,648	0,72
Οπτοπλινθοδομή σε επαφή με μη θερμαινόμενο χώρο	0,030	0,651	0,72
Δάπεδο επάνω από πυλωτή	0,040	0,591	0,63
Δάπεδο επάνω στο έδαφος	0,040	0,610	2,00
Οροφή	0,040	0,610	0,63

Τα κουφώματα είναι τοποθετημένα κατά μήκος των ελεύθερων πλευρών και καταλαμβάνουν το 35% με 40% της επιφάνειάς τους. Φέρουν πλαίσιο από αλουμίνιο με θερμοδιακοπή με συντελεστή θερμοπερατότητας U_f ίσο με $2,8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ και δίδυμο υαλοπίνακα με συντελεστή

θερμοπερατότητας U_g ίσο με $2,8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Οι συντελεστές θερμοπερατότητας όλων των κουφωμάτων υπολογίστηκαν με βάση τις επιμέρους τιμές για το πλαίσιο και τον υαλοπίνακα, λαμβάνοντας υπόψη τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά κάθε κουφώματος, καθώς και τη γραμμική θερμογέφυρα που αναπτύσσεται μεταξύ υάλωσης και πλαισίου, σύμφωνα με τον Κυπριακό Κανονισμό [8].

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

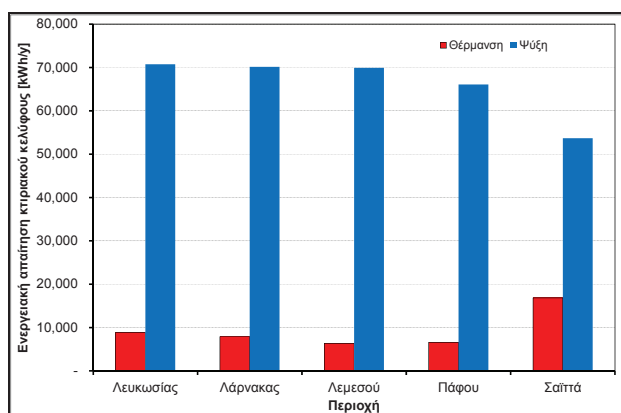
3.1 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΚΤΙΡΙΑΚΟΥ ΚΕΛΥΦΟΥΣ

Η ενεργειακή ανάλυση του κτιριακού κελύφους πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του προγράμματος ενεργειακής προσομοίωσης EnergyPlus. Ο τυπικός όροφος διαιρέθηκε σε 16 ανεξάρτητες θερμικές ζώνες λαμβάνοντας υπόψη τη χρήση του κάθε χώρου και τον προσανατολισμό του. Προέκυψαν με αυτόν τον τρόπο 65 θερμικές ζώνες στο σύνολο του κτιρίου, καθώς το κλιμακοστάσιο θεωρήθηκε επίσης ως μία ανεξάρτητη θερμική ζώνη. Σε κάθε θερμική ζώνη θεωρήθηκαν με βάση τις υποδείξεις της ASHRAE [9] και του προτύπου EN 15251:2007 οι αντίστοιχες επιθυμητές τιμές των εσωκλιματικών συνθηκών, δηλαδή της θερμοκρασίας χειμώνα-θέρος, το ρυθμό αερισμού, το επίπεδο φωτισμού, καθώς και οι τιμές που αφορούν στον αριθμό των ατόμων και στην ισχύ των ηλεκτρικών συσκευών. Στη συνέχεια λαμβάνοντας υπόψη και πάλι τις συστάσεις της ASHRAE δημιουργήθηκαν οι αντίστοιχες ημερήσιες, εβδομαδιαίες και μηνιαίες κατανομές χρήσης των παραπάνω μεγεθών, θεωρώντας πως ως κτίριο γραφείων λειτουργεί σε πενήνήμερη εβδομαδιαία βάση μεταξύ των ωρών 07:00-17:00. Επιπρόσθετα απαραίτητο στοιχείο για την ενεργειακή ανάλυση του κτιριακού κελύφους είναι η περιγραφή του κτιριακού κελύφους με τα γεωμετρικά και θερμοφυσικά χαρακτηριστικά των δομικών του στοιχείων, τα οποία ελήφθησαν από τα αρχιτεκτονικά σχέδια και τη μελέτη της θερμομονωτικής προστασίας του κτιρίου.

Απαραίτητο δεδομένο για την ενεργειακή προσομοίωση είναι επίσης και τα κλιματολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής της μελέτης. Ειδικότερα, κρίθηκε αναγκαία η επιλογή χαρακτηριστικών περιοχών, δεδομένου ότι στόχος της παρούσας μελέτης ήταν η κάλυψη του συνόλου των κλιματικών συνθηκών της Κύπρου και λαμβάνοντας υπόψη το γεωγραφικό ανάγλυφο της νήσου, το οποίο δημιουργεί διαφορετικά τοπικά κλίματα [10]. Στην κατεύθυνση αυτή επιλέχθηκαν περιοχές με τη μεγαλύτερη συγκέντρωση πληθυσμού (Λευκωσία, Λεμεσός, Λάρνακα, Πάφος και το χωριό του Σαϊττά), οι οποίες μπορούν να θεωρηθούν χαρακτηριστικές του Κυπριακού κλίματος. Κατά συνέπεια το κλίμα αυτών των πόλεων θεωρείται στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης ως αντιπροσωπευτικό των αντίστοιχων περιοχών-επαρχιών, και τα αποτελέσματα της κάθε πόλης θεωρούνται αντιπροσωπευτικά για την ευρύτερη γεωγραφική περιοχή. Οι πόλεις της Λεμεσού, Λάρνακας και Πάφου, πρωτεύουσες των αντίστοιχων επαρχιών, βρίσκονται στη νότια ακτογραμμή της νήσου και χαρακτηρίζονται από θερμό και υγρό κλίμα. Αντίστοιχα η πόλη της Λευκωσίας, πρωτεύουσα της ομώνυμης επαρχίας και πρωτεύουσα του Κυπριακού κράτους, βρίσκεται στο κεντρικό τμήμα του νησιού και παρουσιάζει θερμά και ξηρά καλοκαίρια και ήπιους χειμώνες. Τέλος ο Σαϊττάς αποτελεί ένα τυπικό χαρακτηριστικό χωριό του Τροόδου και κλιματολογικά αντιπροσωπεύει το ορεινό κλίμα της νήσου με ψυχρούς χειμώνες και ήπια καλοκαίρια. Κριτήριο επίσης για την επιλογή των χαρακτηριστικών πόλεων ήταν αυτές να διαθέτουν αξιόπιστο κλιματολογικό αρχείο στη μετεωρολογική βάση του προγράμματος METEONORM, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ενεργειακή προσομοίωση των κτιρίων στις αντίστοιχες περιοχές.

Στην Εικόνα 2 παρουσιάζεται η ετήσια απαίτηση ενέργειας του κτιριακού κελύφους για θέρμανση και ψύξη για τις πέντε χαρακτηριστικές περιοχές της Κύπρου, όπως αυτή προέκυψε από την προσομοίωση με το πρόγραμμα ενεργειακής ανάλυσης EnergyPlus. Σύμφωνα με την εικόνα αυτή οι ενεργειακές απαιτήσεις για ψύξη είναι πάντοτε σημαντικά υψηλότερες από τις αντίστοιχες της θέρμανσης. Ειδικότερα η υψηλότερη ενεργειακή απαίτηση για ψύξη παρουσιάζεται στην περιοχή της Λευκωσίας με 70.730 kWh , έναντι 8.860 kWh για θέρμανση, και η χαμηλότερη στην περιοχή του Σαϊττά με 53.680 kWh , έναντι 16.850

kWh για θέρμανση. Αντίστοιχα οι απαιτήσεις ψύξης για τις περιοχές της Λάρνακας, της Λεμεσού και της Πάφου κυμαίνονται μεταξύ 66.000 kWh έως 70.150 kWh, έναντι 6.340 kWh έως 7.900 kWh για θέρμανση. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί πως οι σημαντικές διαφοροποιήσεις που εμφανίζονται στις ανάγκες θέρμανσης και ψύξης είναι αναμενόμενες, καθώς η περιοχή στην οποία εστιάζεται η παρούσα μελέτη εκτείνεται κατά μέσο όρο 5^ο υψηλότερα του βόρειου τροπικού παραλλήλου, όπου το κλίμα της χαρακτηρίζεται κυρίως από ήπιους χειμώνες και ιδιαίτερα θερμά και υγρά καλοκαίρια.



Εικόνα 2: Ετήσια απαίτηση ενέργειας για θέρμανση και ψύξη του κτιριακού κελύφους

3.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΒΑΘΟΥΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ

Ο σχεδιασμός του συστήματος αβαθούς γεωθερμίας περιλαμβάνει την επιλογή των αντλιών θερμότητας, τη διαστασιολόγηση του κατακόρυφου γεωεναλλάκτη κλειστού βρόχου και της αντλίας κυκλοφορίας. Ειδικότερα, η επιλογή των αντλιών θερμότητας του αβαθούς γεωθερμικού συστήματος πραγματοποιήθηκε με βάση τα θερμικά και ψυκτικά φορτία του κτιρίου, όπως αυτά προσδιορίστηκαν με τη βοήθεια του λογισμικού Elite Chvac. Επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν αντλίες θερμότητας υψηλής απόδοσης της εταιρίας Rhoss τύπου THHEY-230 και THHEY-240.

Η διαστασιολόγηση του κατακόρυφου γεωεναλλάκτη σε κάθε χαρακτηριστική πόλη πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του λογισμικού EED 3.16. Σύμφωνα με αυτό, ο υπολογισμός του απαιτούμενου μήκους του γεωεναλλάκτη βασίζεται στις μηνιαίες καταναλώσεις θερμικής και ψυκτικής ενέργειας του κτιρίου, στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της γεώτρησης, στον αριθμό των σωλήνων ανά γεώτρηση και στις θερμοφυσικές ιδιότητες του υλικού πλήρωσης της γεώτρησης και του εδάφους. Οι μηνιαίες ενεργειακές καταναλώσεις προσδιορίστηκαν με βάση τις ενεργειακές απαιτήσεις του κτιριακού κελύφους όπως αυτές υπολογίστηκαν από το λογισμικό ενεργειακής προσομοίωσης EnergyPlus, λαμβάνοντας υπόψη τους βαθμούς απόδοσης των συστημάτων εκπομπής και διανομής της θερμότητας με βάση τα Ευρωπαϊκά πρότυπα EN 15316-2-1:2008 και EN 15316-2-3:2008. Ως σύστημα εκπομπής της θερμότητας θεωρήθηκε η τερματική μονάδα ανεμιστήρα-στοιχείου (fan-coil) με βαθμό απόδοσης 0,93. Αντίστοιχα ως σύστημα διανομής της θερμότητας θεωρήθηκε το δισωλήνιο σύστημα με επαρκή θερμομονωτική προστασία και με βαθμό απόδοσης 0,96.

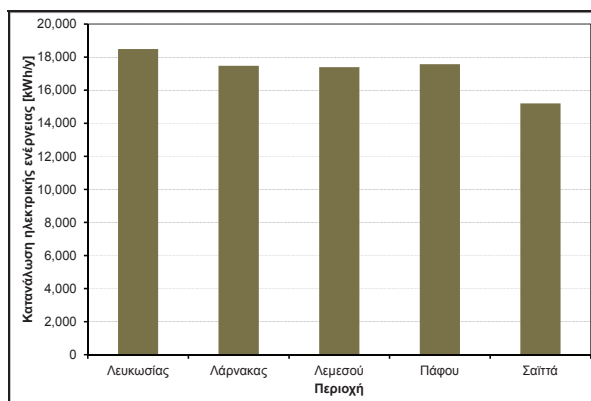
Ο κατακόρυφος γεωεναλλάκτης επιλέχθηκε να κατασκευαστεί με γεωτρήσεις διπλού βρόχου σωλήνα (u-tube). Ως υλικό κατασκευής του γεωεναλλάκτη επιλέχθηκε ο πλαστικός σωλήνας πολυαιθυλενίου υψηλής πυκνότητας (HDPE) με αντοχή στα 16 bar και ως μέσο πλήρωσης

της κάθε γεώτρησης το θερμικά βελτιωμένο ρευστοκόκκιο Fischer GeoSolid 240, με συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας $2,4 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Τέλος όσο αφορά στα γεωλογικά χαρακτηριστικά της κάθε περιοχής επιλέχθηκαν να χρησιμοποιηθούν οι μέσες τιμές χαρακτηριστικών εδάφους σύμφωνα με την υφιστάμενη βιβλιογραφία [11]. Η επιλογή του μήκους και της διάταξης του κανάβου των γεωτρήσεων του γεωεναλλάκτη πραγματοποιήθηκε μετά από εικοσαετή ανάλυση της λειτουργίας του συστήματος με ελάχιστη και μέγιστη αποδεκτή θερμοκρασία του νερού στο γεωεναλλάκτη τους 5°C και τους 38°C αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα για κάθε χαρακτηριστική περιοχή παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2: Μήκος γεωεναλλάκτη ανά χαρακτηριστική περιοχή					
Περιοχή	Λευκωσίας	Λάρνακας	Λεμεσού	Πάφου	Σαίπτά
Μήκος γεωεναλλάκτη [m]	1440	1512	1476	1180	1125

Η επιλογή της αντλίας κυκλοφορίας του ρευστού στο γεωεναλλάκτη σε κάθε χαρακτηριστική περιοχή πραγματοποιήθηκε με βάση την πτώση πίεσης που το δίκτυο και η αντλία θερμότητας εισήγαγε σε κάθε περίπτωση. Ειδικότερα θεωρήθηκε πως κάθε γεώτρηση συνδέεται ανεξάρτητα από τις υπόλοιπες σε κοινό συλλέκτη και στη συνέχεια το ρευστό οδηγείται στην αντλία θερμότητας. Με βάση αυτό το σχεδιασμό και τα χαρακτηριστικά του συστήματος αβαθούς γεωθερμίας σε κάθε χαρακτηριστική περιοχή επιλέχθηκε η αντλία κυκλοφορίας υψηλής απόδοσης Wilo Stratos 65/1-16 για τα συστήματα της Λευκωσίας και της Πάφου και η αντλία Wilo Stratos 50/1-16 για τα συστήματα στις υπόλοιπες περιοχές.

Η προσομοίωση του συστήματος αβαθούς γεωθερμίας αποσκοπεί στον υπολογισμό της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται για την πλήρη κάλυψη των θερμικών και ψυκτικών απαιτήσεων του κτιρίου σε κάθε χαρακτηριστική περιοχή. Κατά τη λειτουργία του αβαθούς γεωθερμικού συστήματος απαιτείται κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για τη λειτουργία των αντλιών θερμότητας και της αντλίας κυκλοφορίας του ρευστού στο γεωεναλλάκτη. Ο υπολογισμός της ηλεκτρικής κατανάλωσης των αντλιών θερμότητας πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια κώδικα προσομοίωσης της λειτουργίας κατακόρυφων συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας που αναπτύχθηκε και επαληθεύτηκε παλαιότερα από συγγραφέα της εργασίας [12]. Αντίστοιχα για τον υπολογισμό της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας της αντλίας κυκλοφορίας χρησιμοποιήθηκε η μεθοδολογία που προτάθηκε από τους Sfeir et. al. [13] για τα αποκεντρωμένα αντλητικά συστήματα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.



Εικόνα 3: Ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας συστήματος αβαθούς γεωθερμίας

Από την Εικόνα 3 προκύπτει πως για το τυπικό κτίριο γραφείων η μέγιστη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας εμφανίζεται στην περιοχή της Λευκωσίας με 18.490 kWh ετησίως και η ελάχιστη στην περιοχή του Σαϊπτά με 15.200 kWh. Παρατηρείται επίσης πως οι περιοχές της Λάρνακας, της Λεμεσού και της Πάφου παρουσιάζουν αντίστοιχες καταναλώσεις ηλεκτρισμού της τάξης των 17.400 kWh με 17.600 kWh.

3.3 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΒΑΘΟΥΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ

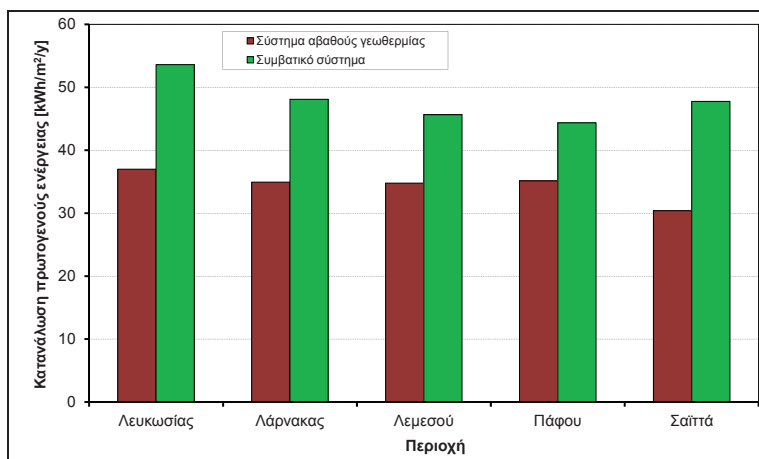
Η ενεργειακή αξιολόγηση του συστήματος αβαθούς γεωθερμίας πραγματοποιήθηκε μέσω της σύγκρισης της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας του συστήματος με την αντίστοιχη κατανάλωση ενέργειας που παρουσιάζει το συμβατικό σύστημα θέρμανσης και ψύξης, το οποίο χρησιμοποιείται εκτεταμένα στα κτίρια γραφείων της Κύπρου. Ως συμβατικό σύστημα θεωρήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης η λύση που περιλαμβάνει λέβητα-καυστήρα πετρελαίου ή υγραερίου για την κάλυψη των αναγκών σε θέρμανση και αερόψυκτο ψύκτη για την κάλυψη αντίστοιχα των αναγκών της ψύξης.

Ειδικότερα, για τη θέρμανση θεωρήθηκε σύστημα λέβητα-καυστήρα πετρελαίου ή υγραερίου υψηλής απόδοσης ισχύος 70 kW που καλύπτει τον ελάχιστο αποδεκτό βαθμό απόδοσης σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή οδηγία 92/42/EC, ο οποίος για την περίπτωση αυτή προκύπτει ίσος με 0,93. Με βάση αυτό το βαθμό απόδοσης και την αντίστοιχη κατανάλωση θερμικής ενέργειας για κάθε χαρακτηριστική πόλη προσδιορίστηκε η κατανάλωση τελικής ενέργειας και στη συνέχεια με τη χρήση του νομοθετημένου συντελεστή μετατροπής της τελικής κατανάλωσης πετρελαίου ή υγραερίου σε πρωτογενή (1.1) για το Κυπριακό ενεργειακό σύστημα, υπολογίστηκε η κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας του συμβατικού συστήματος θέρμανσης σε κάθε χαρακτηριστική πόλη.

Για τον υπολογισμό αντίστοιχα της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας του συμβατικού συστήματος ψύξης με αερόψυκτο ψύκτη, αρχικά επιλέχθηκαν οι συσκευές που θα εγκατασταθούν στο κτίριο σε κάθε χαρακτηριστική περιοχή με βάση την απαιτούμενη ψυκτική ισχύ του κάθε χώρου, όπως αυτή πρόκυψε κατά τον υπολογισμό της ψυκτικής ισχύος σχεδιασμού. Ειδικότερα επιλέχθηκε η εγκατάσταση ψυκτών της εταιρίας RC Group S.p.A. τύπος ΡΥΧΙΣ U 102 για τις πόλεις της Λάρνακας και της Λεμεσού, ΡΥΧΙΣ U 146 για την πόλη της Λευκωσίας, ΡΥΧΙΣ U 128 για την πόλη της Πάφου και ΡΥΧΙΣ U 80 για την περιοχή του Σαϊπτά. Στη συνέχεια από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κατασκευαστή δημιουργήθηκαν οι καμπύλες του δείκτη αποδοτικότητας (EER) ως συνάρτηση της θερμοκρασίας του αέρα περιβάλλοντος. Με βάση αυτές τις καμπύλες, τη θερμοκρασία του αέρα περιβάλλοντος, όπως αυτή προκύπτει από το αντίστοιχο για κάθε πόλη κλιματικό αρχείο του Meteoport σε ωριαία βάση, και την ωριαία ζήτηση ψυκτικής ενέργειας, όπως αυτή υπολογίστηκε με τη βοήθεια του λογισμικού ενεργειακής προσομοίωσης EnergyPlus, προσδιορίστηκε η τελική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας των ψυκτών σε κάθε χαρακτηριστική πόλη. Η ηλεκτρική κατανάλωση ανάχθηκε και πάλι σε κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας με τη βοήθεια του αντίστοιχου συντελεστή μετατροπής (2.7) που ισχύει για το Κυπριακό ενεργειακό σύστημα. Η κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας για την κάλυψη των ψυκτικών αναγκών του κάθε κτιρίου προστέθηκε στη συνέχεια με την αντίστοιχη κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας για θέρμανση και προέκυψε έτσι η συνολική κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας για το συμβατικό σύστημα. Η συνολική κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας ανάχθηκε τελικά ανά τετραγωνικό μέτρο θερμαινόμενης/ψυχόμενης επιφάνειας και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.

Ο υπολογισμός της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας του αβαθούς γεωθερμικού συστήματος πραγματοποιήθηκε με βάση την ηλεκτρική κατανάλωση του συστήματος για κάθε χαρακτηριστική περιοχή, όπως αυτή παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα. Η ηλεκτρική ενέργεια ανάχθηκε και πάλι σε πρωτογενή με βάση το συντελεστή μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας σε πρωτογενή (2.7) που δίδεται για το Κυπριακό ενεργειακό σύστημα. Η πρωτογενής ενέργεια ανάχθηκε τελικά σε κατανάλωση ανά τετραγωνικό μέτρο

θερμαινόμενης/ψυχόμενης επιφάνειας κτιρίου και αποτελέσματα παρουσιάζονται επίσης στην Εικόνα 4.



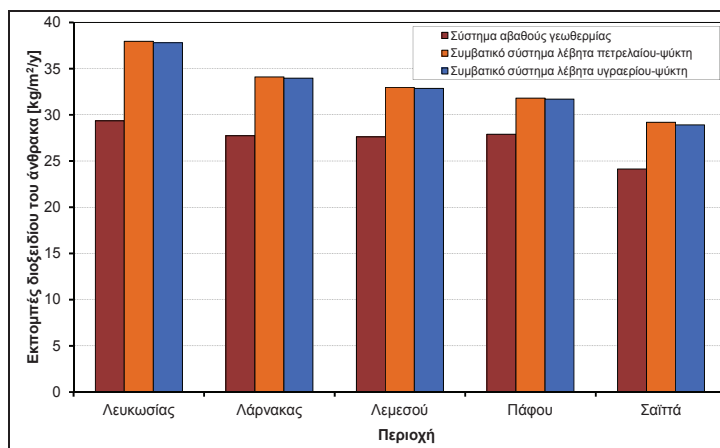
Εικόνα 4: Κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας

Σύμφωνα με την Εικόνα 4 η κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας του αβαθούς γεωθερμικού συστήματος παρουσιάζεται σημαντικά χαμηλότερη από την κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας του συμβατικού συστήματος που αποτελείται από λέβητα πετρελαίου/υγραερίου και αερόψυκτο ψύκτη. Ειδικότερα, η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας παρουσιάζεται υψηλότερη στις βορειότερες και ψυχρότερες περιοχές, στο Σαϊπτά και στη Λευκωσία με 36,4% και 31% αντίστοιχα, ενώ στις περιοχές με θερμότερο κλίμα, όπως π.χ. στις νότιες πόλεις, η διαφοροποίηση κυμαίνεται μεταξύ 20,8% και 27,8%.

3.4. ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΒΑΘΟΥΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ

Η περιβαλλοντική αξιολόγηση και ποσοτικοποίηση του αντίστοιχου οφέλους που προκύπτει από την εφαρμογή συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας στα κτίρια γραφείων της Κύπρου πραγματοποιήθηκε μέσω του υπολογισμού και της σύγκρισης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα που προκύπτουν από τη χρήση του συστήματος αβαθούς γεωθερμίας και του συμβατικού συστήματος. Οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα υπολογίστηκαν από την κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας των δύο συστημάτων με τη χρήση των νομοθετημένων συντελεστών εκπομπής ανά καύσιμο για το ενεργειακό σύστημα της Κύπρου. Στην Εικόνα 5 παρουσιάζονται αντίστοιχα οι εκπομπές των δύο συστημάτων σε κάθε χαρακτηριστική περιοχή.

Από την Εικόνα 5 προκύπτει καταρχήν πως οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα για το συμβατικό σύστημα δεν διαφοροποιούνται σημαντικά για τα δύο εναλλακτικά καύσιμα (πετρέλαιο και υγραέριο). Αντιθέτως η σύγκριση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα μεταξύ του συστήματος αβαθούς γεωθερμίας και του συμβατικού παρουσιάζει σημαντική διαφοροποίηση. Ειδικότερα οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα του αβαθούς γεωθερμικού συστήματος προκύπτουν πάντα χαμηλότερες από τις αντίστοιχες εκπομπές των συμβατικών συστημάτων σε ποσοστό που κυμαίνεται από 13,6% για την περιοχή του Σαϊπτά έως και 28,8% για την περιοχή της Λευκωσίας.



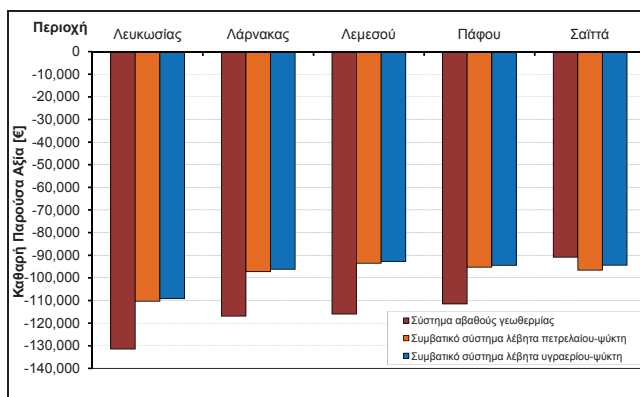
Εικόνα 5: Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα

3.5. ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΒΑΘΟΥΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ

Η οικονομική αξιολόγηση της εγκατάστασης συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας σε κτίρια γραφείων της Κύπρου πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του οικονομικού δείκτη της καθαρής παρούσας αξίας σύμφωνα με την προβλεπόμενη μεθοδολογία του Ευρωπαϊκού Κανονισμού 244/2012/ΕΚ και του προτύπου EN 15459:2007 για οικονομική διάρκεια ζωής της επένδυσης τα 15 έτη και επιτόκιο αναγωγής 6%. Το αρχικό κόστος κατασκευής, τόσο του συστήματος αβαθούς γεωθερμίας όσο και των εναλλακτικών συμβατικών συστημάτων με λέβητα πετρελαίου ή υγραερίου και αερόψυκτο ψύκτη για κάθε χαρακτηριστική περιοχή προσδιορίστηκε με βάση τις τιμές της αγοράς, οι οποίες προσδιορίστηκαν από τοπικούς κατασκευαστές και εμπόρους αυτών των συστημάτων κατά την περίοδο της άνοιξης του 2014.

Ο υπολογισμός του ετήσιου κόστους καυσίμου βασίστηκε στις μέσες καταναλισκόμενες ποσότητες ηλεκτρισμού, πετρελαίου και υγραερίου, όπως αυτές προέκυψαν από τα αποτελέσματα της ενεργειακής ανάλυσης. Οι ποσότητες αυτές ανάχθηκαν στη συνέχεια με βάση την πρόβλεψη της εξέλιξης της τιμής του αντίστοιχου καυσίμου σε εθνικό επίπεδο [14] σε χρηματική αξία για κάθε οικονομικό έτος της αξιολόγησης. Σε αυτό το κόστος προστέθηκε και το ετήσιο κόστος συντήρησης, θεωρώντας το ως ποσοστό του αρχικού κόστους εγκατάστασης του κάθε συστήματος, ίσο με 3% για τους ψύκτες και τις αντλίες θερμότητας και 2% για τους λέβητες, με βάση τις υποδείξεις του προτύπου EN 15459:2007. Από το άθροισμα των τιμών αυτών προέκυψε τελικά το τρέχον συνολικό ετήσιο κόστος χρήσης του κάθε εναλλακτικού συστήματος για κάθε χαρακτηριστική περιοχή.

Με βάση τα αποτελέσματα του οικονομικού δείκτη της καθαρής παρούσας αξίας, όπως αυτά παρουσιάζονται στην Εικόνα 6, προκύπτει ότι για τις κεντρικές και νότιες περιοχές της Κύπρου, το σύστημα αβαθούς γεωθερμίας παρουσιάζει υψηλότερο κόστος σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα γεγονός που το καθιστά ως επένδυση οικονομικά μη αποδεκτή. Ειδικότερα για την περιοχή της Λευκωσίας η εγκατάσταση του συστήματος αβαθούς γεωθερμίας οδηγεί σε αύξηση συνολικού κόστους κατά 16% (21.120 €) και 17% (22.250 €) σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα. Αντίστοιχα στις νότιες περιοχές η χρήση του συστήματος αβαθούς γεωθερμίας εμφανίζει αύξηση συνολικού κόστους από 14,5% (16.230 €) έως και 20,0% (21.800 €). Αντιθέτως για την περιοχή του Σαίπτα το σύστημα αβαθούς γεωθερμίας παρουσιάζει σημαντικά καλύτερο οικονομικό αποτέλεσμα, έως και 6,5% (5.725 €) μείωση κόστους, με αποτέλεσμα η εγκατάστασή του να είναι ελκυστική.



Εικόνα 6: Δείκτης καθαρής παρούσας αξίας για τα εναλλακτικά συστήματα

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή μελετήθηκε το ενεργειακό, περιβαλλοντικό και οικονομικό όφελος από την εγκατάσταση συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας με κατακόρυφο γεωεναλλάκτη στα κτίρια γραφείων της Κύπρου. Με βάση τα αποτελέσματα της ενεργειακής αξιολόγησης προέκυψε πως για το σύνολο των κλιματικών χαρακτηριστικών της νήσου τα αβαθή γεωθερμικά συστήματα εξοικονομούν πρωτογενή ενέργεια σε ποσοστό που κυμαίνεται μεταξύ 20,8% και 36,4%. Σημαντικό είναι επίσης και το περιβαλλοντικό όφελος που προκύπτει από την εγκατάσταση αυτών των συστημάτων, καθώς παρατηρείται μείωση από 13,6% έως και 29,3% στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Αντιθέτως το συνολικό κόστος χρήσης των συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας είναι σημαντικά υψηλότερο σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα, εξαιρέση αποτελούν οι ψυχρές περιοχές της νήσου, καθώς με βάση το δείκτη της καθαρής παρούσας αξίας εμφανίζουν αύξηση του κόστους μεταξύ 14,5% (16.230 €) και 20,0% (21.800 €).

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία αυτή χρηματοδοτήθηκε από το Ίδρυμα Προώθησης Έρευνας της Κύπρου μέσω του προγράμματος «ΔΕΣΜΗ 2009-2010» (πρόγραμμα Νο. ΔΙΔΑΚΤΩΡ/0311/37), το οποίο συγχρηματοδοτείται από την Κυπριακή Δημοκρατία και το Ευρωπαϊκό Ταμείο Περιφερειακής Ανάπτυξης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Luo, J., Rohn, J., Bayer, M., Priess, A., Wilkmann, L., Xiang, W., 2015, "Heating and cooling performance analysis of a ground source heat pump system in Southern Germany", *Geothermics*, 53, pp. 57-66.
- [2] Michopoulos, A., Zachariadis, T., Kyriakis, N., 2013, "Operation characteristics and experience of a ground source heat pump system with a vertical ground heat exchanger", *Energy*, 51, pp. 349-357.
- [3] Lund, J.W., Freeston, D.H., Boyd, T.L., 2011, "Direct utilization of geothermal energy 2010 worldwide review", *Geothermics*, 40, pp. 159-180.

- [4] Stafford, A., 2011, "Long-term monitoring and performance of ground source heat pumps", *Build. Res. Inf.*, 39(6), pp. 566-573.
- [5] Lee, J.U., Kim, T., Leigh, S.B., 2013, "Thermal performance analysis of a ground-coupled heat pump integrated with building foundation in summer", *Energ. Buildings*, 59, pp. 37-43.
- [6] Κυπριακή Στατιστική Υπηρεσία, 2011, Στατιστικές κατασκευών και στέγασης, Τυπογραφείο της Κυπριακής Δημοκρατίας.
- [7] ΚΔΠ 432/2013, 2013, Ο περί ρύθμισης της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων νόμος, Διάταγμα δυνάμει του άρθρου 15, Λευκωσία.
- [8] Υπηρεσία Ενέργειας Κύπρου, 2010, Οδηγός Θερμομόνωσης Κτιρίων, Λευκωσία.
- [9] ASHRAE Handbook-Fundamentals, 2013, American Society of Heating Refrigeration and Air Conditioning Engineers, Inc., Atlanta.
- [10] Hadjinicolaou, P., Giannakopoulos, C., Zerefos, C., Lange, M. A., Pashiardis, S., Lelieveld, J., 2011, "Mid-21st century climate and weather extremes in Cyprus as projected by six regional climate models", *Reg. Environ. Change*, 11, pp. 441-457.
- [11] Morgan, P., 1973, Terrestrial heat flow studies in Cyprus and Kenya, PhD thesis published by Imperial College, University of London.
- [12] Michopoulos, A., Kyriakis, N., 2009, "A new energy analysis tool for ground source heat pump systems", *Energ. Buildings*, 41, pp. 937-941.
- [13] Sfeir, A., Bernier, M., Million, T., Joly, A., 2005, "A methodology to evaluate pumping energy consumption in GCHP systems", *ASHRAE Tran.*, 111(1), pp. 714-729.
- [14] Zachariadis, T., Michael, M., 2013, Update of National Energy Forecasts for the Republic of Cyprus, Report submitted to the Ministry of Energy of Cyprus.

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥ 1983-2012 ΣΕ ΑΘΗΝΑ ΚΑΙ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ ΣΤΙΣ ΕΛΛΗΝΙΚΕΣ ΠΟΛΕΙΣ

Θ. Σλίνη*, Κ.Τ. Παπακώστας

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, ΑΠΘ
541 24 Θεσσαλονίκη, *e-mail: lora@aix.meng.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η κλιματική αλλαγή επιδρά σημαντικά στο αστικό περιβάλλον, ενώ θα εξακολουθήσει να θέτει προκλήσεις μελλοντικά. Οι καταγεγραμμένες παρατηρήσεις πάνω στην κλιματική αλλαγή είναι σύμφωνες με την προβλεπόμενη αύξηση της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας στην Ευρώπη κατά 2÷4°C μέχρι το τέλος του αιώνα, και τη μεταβολή των μοντέλων βροχόπτωσης με ξηρότερες συνθήκες τους καλοκαιρινούς μήνες στη Μεσόγειο και πιο υγρούς χειμώνες στις βόρειες χώρες. Η συχνότητα εμφάνισης και η ένταση ακραίων καιρικών φαινομένων, όπως καύσωνες και πλημμύρες, αναμένεται να αυξηθεί τα επόμενα χρόνια. Οι κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στα αστικά κέντρα θα είναι επίσης ιδιαίτερα σημαντικές. Οι δημογραφικές αλλαγές, όπως η αύξηση του μέσου όρου ζωής των ανθρώπων και η συνεχιζόμενη αστικοποίηση θα αυξήσουν το ποσοστό των ανθρώπων που είναι ευάλωτοι σε συνθήκες υψηλών τιμών θερμοκρασίας και καύσωνα, με αρνητικές επιδράσεις στην υγεία, στην παραγωγικότητα της εργασίας, στην κοινωνική ζωή και στη χρήση ανοιχτών δημόσιων χώρων. Επίσης, οι υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να δημιουργήσουν προβλήματα στις υποδομές μεταφορών, ενέργειας, παροχής νερού, με έμμεση επίδραση στην γεωργία και τον τουρισμό. Σημαντικές επίσης είναι οι επιπτώσεις της αλλαγής του κλίματος στο μικροκλίμα και στην ποιότητα του αέρα του αστικού περιβάλλοντος. Στην παρούσα εργασία επιχειρείται μια ανάλυση της θερμοκρασίας του εξωτερικού αέρα στην Αθήνα και τη Θεσσαλονίκη για την τριακονταετία 1983-2012, με στόχο την καταγραφή των τάσεων στα δύο μεγαλύτερα ελληνικά αστικά κέντρα. Με βάση τις ωριαίες μετρήσεις των μετεωρολογικών σταθμών του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών και του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης για την αντίστοιχη περίοδο, υπολογίζονται και αναλύονται στοιχεία περιγραφικής στατιστικής, όπως οι ελάχιστες, μέσες και μέγιστες μηνιαίες τιμές της θερμοκρασίας, οι ελάχιστες, μέσες και μέγιστες τιμές των τριών δεκαετιών '80, '90 και '00 και η αθροιστική συχνότητα των ωριαίων θερμοκρασιών ανά δεκαετία. Παρουσιάζονται διαγράμματα διασποράς θερμοκρασίας και διαγράμματα αθροιστικής συχνότητας. Καταγράφεται ο αριθμός των ημερών με μέγιστη τιμή θερμοκρασίας μεγαλύτερη των 25°C (καλοκαιρινή μέρα), και μεγαλύτερη ή ίση των 35°C, σύμφωνα με διεθνώς αναγνωρισμένους δείκτες και κριτήρια. Τα αποτελέσματα δείχνουν μια στατιστικά σημαντική ανοδική τάση της θερμοκρασίας στα αστικά κέντρα της χώρας από δεκαετία σε δεκαετία, αλλά και μια στατιστικά σημαντική αύξηση του πλήθους των ημερών με μέση τιμή άνω των 25°C και με μέγιστη τιμή μεγαλύτερη ή ίση των 35°C. Τα δεδομένα αυτά είναι ιδιαίτερα χρήσιμα για την εφαρμογή μιας πολιτικής προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή σε διάφορους τομείς.

Λέξεις κλειδιά: κλιματική αλλαγή, θερμοκρασία του αέρα, αθροιστική συχνότητα θερμοκρασίας, ακραίες θερμοκρασίες

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αλλαγή του κλίματος έχει προσελκύσει ευρέως την προσοχή τα τελευταία χρόνια και είναι ένα θέμα που μελετάται από πολλούς επιστήμονες σε διάφορες κλίμακες, τόσο χωρικά όσο και χρονικά. Οι αιτίες για την αλλαγή του κλίματος είναι πολύπλοκες και υπάρχουν διάφορες απόψεις από την επιστημονική κοινότητα. Η κύρια αιτία είναι οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από τα κτίρια, τις επιχειρήσεις, τη γεωργία και τις μεταφορές. Σε όλες αυτές τις ανθρώπινες δραστηριότητες χρησιμοποιείται ενέργεια, κυρίως από μη ανανεώσιμες πηγές (υγρά, αέρια και στερεά καύσιμα), και παράγονται αέρια που προκαλούν το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Είναι κοινώς αποδεκτό στις μέρες μας, ότι η αύξηση των συγκεντρώσεων των αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα είναι η κυρίαρχη κινητήρια δύναμη της υπερθέρμανσης του πλανήτη και της κλιματικής αλλαγής. Η κλιματική αλλαγή και οι επιπτώσεις της είναι πλέον εμφανείς με διάφορους τρόπους: την αύξηση της θερμοκρασίας, την αλλαγή της κατανομής των βροχοπτώσεων με πλημμύρες, ερημοποίηση και μείωση υδάτινων αποθεμάτων, τις δασικές πυρκαγιές, τη συρρίκνωση των παγετώνων, την άνοδο της στάθμης της θάλασσας.

Κατά τα τελευταία 100 χρόνια η αύξηση της παγκόσμιας μέσης θερμοκρασίας ήταν περίπου 0.74°C και έντεκα από τα δώδεκα χρόνια της περιόδου 1995-2006 περιλαμβάνονται μεταξύ των κορυφαίων 12 θερμότερων ετών με βάση την ιστορική έναρξη καταγραμμένων μετρήσεων με επιστημονικά όργανα, δηλαδή από το 1880 [1]. Επίσης, σύμφωνα με τα πρόσφατα στοιχεία [2], σε παγκόσμια κλίμακα η δεκαετία 2001-2010 ήταν η θερμότερη που έχει καταγραφεί. Η περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας θα συνεχιστεί, αν συνεχιστούν και οι εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου. Εκτιμάται ότι η αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα στον 21ο αιώνα για ένα «σενάριο χαμηλών εκπομπών» θα είναι 1.8°C , με ένα πιθανό εύρος $1.1 - 2.9^{\circ}\text{C}$, ενώ για ένα «σενάριο υψηλών εκπομπών» η αύξηση θα είναι 4.0°C με ένα πιθανό εύρος από 2.4 έως 6.4°C . Μια αύξηση της θερμοκρασίας κατά 0.1°C ανά δεκαετία, θα πρέπει να αναμένεται για τις επόμενες δύο δεκαετίες, ακόμη και αν οι συγκεντρώσεις των αερίων του θερμοκηπίου και αερολυμάτων κρατηθούν στα επίπεδα του έτους 2000 [3]. Ειδικότερα, η μέση παγκόσμια θερμοκρασία αυξάνεται μετά το 1978 με μέσο ρυθμό 0.14°C ανά δεκαετία, ενώ κατά το φετινό Απρίλιο (2014) η συνδυασμένη μέση παγκόσμια θερμοκρασία στην ξηρά και τη θάλασσα ισοφάρισε το ρεκόρ υψηλότερης θερμοκρασίας του Απριλίου 2010 φθάνοντας στους 14.47°C , δηλαδή αύξηση 0.77°C σε σύγκριση με το μέσο όρο του 20ού αιώνα (13.7°C). Η μέση παγκόσμια θερμοκρασία του Απριλίου 2014 στην ξηρά ήταν 9.45°C , δηλαδή 1.35°C πάνω από τον μέσο όρο του 20ού αιώνα (8.1°C), ενώ η μέση παγκόσμια θερμοκρασία του Απριλίου 2014 στις θάλασσες ήταν 16.55°C , δηλαδή 0.55°C πάνω από τον μέσο όρο του 20ού αιώνα (16°C).

Αναφορικά με την Ελλάδα, σύμφωνα με έρευνα της Επιτροπής Μελέτης των Επιπτώσεων της Κλιματικής Αλλαγής της Τράπεζας της Ελλάδας [4] και του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών [5] τα αστικά κέντρα (π.χ. Θεσσαλονίκη, Πάτρα, Λάρισα και Λαμία) αναμένεται να επιβαρυνθούν ετησίως με εκτεταμένο αριθμό ημερών με πολύ υψηλή θερμοκρασία, κατά τις οποίες η μέγιστη θερμοκρασία υπερβαίνει τους 35°C , καθώς και με αριθμό «θερμών» νυχτών, κατά τις οποίες η θερμοκρασία διατηρείται άνω των 20°C , με βάση αναφοράς την περίοδο 1961-90.

Δημοσιευμένες έρευνες για την Ελλάδα έχουν δείξει ότι κατά τις τελευταίες δεκαετίες η συχνότητα εμφάνισης των χαμηλότερων θερμοκρασιών μειώνεται ενώ αντίθετα η συχνότητα εμφάνισης των υψηλότερων θερμοκρασιών αυξάνεται [6,7]. Επίσης ότι το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας (Urban Heat Island) παρατηρείται πλέον σε αρκετές ελληνικές πόλεις [8,9,10,11].

Οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς ακόμη και η ελάχιστη μεταβολή της θερμοκρασίας αποτυπώνεται άμεσα σε κοινωνικοοικονομικούς τομείς, όπως είναι ο τουρισμός, η αγροτική παραγωγή, η εξορυκτική βιομηχανία, οι μεταφορές, το δομημένο περιβάλλον, η ποιότητα ζωής και η υγεία [12] και η κατανάλωση ενέργειας στα κτίρια [6,7,8,13].

Καθώς η ισχύουσα επίσημη βάση αναφοράς για τα μετεωρολογικά μοντέλα σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Μετεωρολογίας (ΠΟΥ) είναι η τριακονταετία 1961-90 με βασική επιδίωξη την αναθεώρηση των «τιμών βάσης», παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον η μελέτη και αποτίμηση των πλέον πρόσφατων μετεωρολογικών δεδομένων [14]. Η προτεινόμενη βάση αναφοράς είναι το διάστημα 1981-2010, η οποία ήδη χρησιμοποιείται από αρκετούς μετεωρολογικούς οργανισμούς, ώστε να παρέχουν περισσότερο επικαιροποιημένες και αξιόπιστες υπηρεσίες τόσο στους πολίτες όσο και στους φορείς χάραξης πολιτικής, αναφορικά με θέματα π.χ. ενέργειας και φορτίου αιχμής, συστάσεις πολιτικής προστασίας μέχρι την επιλογή των καλλιεργειών και φύτευσης.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η χρονοσειρά ωριαίων τιμών της θερμοκρασίας εξωτερικού αέρα των τριών δεκαετιών 1983-2012 για τις πόλεις της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης αποτέλεσε τη βάση της παρούσας εργασίας. Τα στοιχεία των μετρήσεων προέρχονται από το μετεωρολογικό σταθμό του Εθνικού Αστεροσκοπείου στο Θησείο (με συντεταγμένες 37° 58' Β, 23° 43' Α και υψόμετρο 107m) για την Αθήνα, και αντίστοιχα το σταθμό που τηρεί το Μετεωροσκοπείο του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης εντός της Πανεπιστημιούπολης (με συντεταγμένες 40° 37' Β, 22° 57' Α και υψόμετρο 31m) για τη Θεσσαλονίκη. Οι μετρήσεις ελέγχθηκαν ως προς την ομοιογένειά τους ενώ οι ελλείπουσες τιμές ήταν ελάχιστες και δεν επηρέασαν την αξιοπιστία και την ποιότητα των αποτελεσμάτων. Συγκεκριμένα, για την περιοχή της Αθήνας καταγράφηκαν περίπου 30 κενές παρατηρήσεις (ποσοστό 0.0114%) και για τη Θεσσαλονίκη περίπου 42 στο σύνολο των (ποσοστό 0.016%).

Για την ανάγκη της μελέτης υπολογίστηκαν δείκτες περιγραφικής στατιστικής, η μέση τιμή, η τυπική απόκλιση, η συχνότητα εμφάνισης, τα τεταρτημόρια σε ωριαία, ημερήσια, μηνιαία, ετήσια και δεκαετή κλίμακα. Ακόμη αναπαραστάθηκαν γραφικά οι κατάλληλοι δείκτες ώστε να ανιχνευθούν και να αποτυπωθούν με εύληπτο τρόπο τάσεις, εποχικότητες και ιδιαίτερες ή ακραίες τιμές.

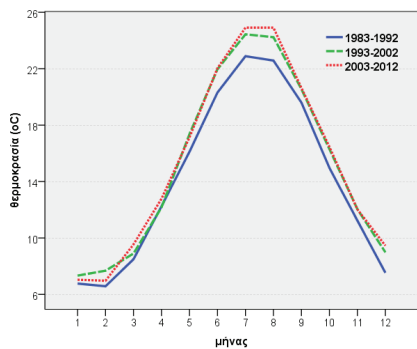
Ο κλιματικός μέσος όρος της περιόδου 1961-90 χρησιμοποιήθηκε ως αναφορά για την διερεύνηση ακραίων τιμών και αποκλίσεων από τον κανονικό μέσο όρο. Παράλληλα, σύμφωνα με το Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), οι δείκτες μεταβολής υπολογίζονται κυρίως ως αποκλίσεις από τη μέση τιμή ή από τη συνήθη κατάσταση. Στην παρούσα μελέτη υιοθετήθηκαν οι δείκτες που χρησιμοποιήθηκαν σε αναφορές του IPCC (2007) [1] και Joint Research Centre (2008) [15]. Συγκεκριμένα υπολογίστηκαν ο αριθμός των ημερών με μέση τιμή μεγαλύτερη των 25°C και με μέγιστη θερμοκρασία άνω των 35°C.

Τέλος πραγματοποιήθηκαν στατιστικοί έλεγχοι για την ανίχνευση στατιστικά σημαντικών μεταβολών της θερμοκρασίας σε επίπεδο σημαντικότητας 0.05.

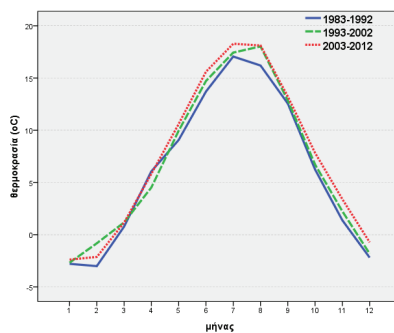
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα κυριότερα αποτελέσματα της ανάλυσης παραθέτονται στα γραφήματα των εικόνων 1-5 όπου παρουσιάζονται για τις δύο υπό εξέταση περιοχές ελάχιστες, μέσες και μέγιστες μηνιαίες τιμές της θερμοκρασίας (°C), το πλήθος των ημερών με μέση ημερήσια τιμή της θερμοκρασίας άνω των 25°C, με μέγιστη τιμή μεγαλύτερη ή ίση των 35°C, καθώς και οι καμπύλες αθροιστικής συχνότητας των θερμοκρασιών ανά δεκαετία. Είναι χαρακτηριστική η διαφοροποίηση των θερμοκρασιών κυρίως μεταξύ των δεκαετιών 1983-92 και 2003-12 σε όλα τα γραφήματα κατά τους θερινούς μήνες.

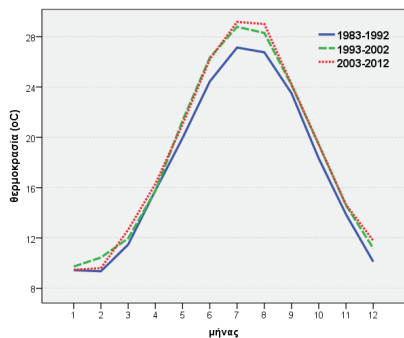
Πιο αναλυτικά (Εικόνα 1), παρατηρείται μια σταδιακή αύξηση των μέσων ελάχιστων, της μέσων και της μέσων μέγιστων μηνιαίων τιμών της θερμοκρασίας από δεκαετία σε δεκαετία. Σημειώνεται ότι στην Αθήνα, η διαφοροποίηση της θερμοκρασίας μεταξύ των δεκαετιών αποδεικνύεται ισχυρά στατιστικά σημαντική τόσο στο σύνολο των 12 μηνών, όσο και μεμονωμένα κατά τη θερινή περίοδο, με βάση τον μη-παραμετρικό έλεγχο Kruskal–Wallis



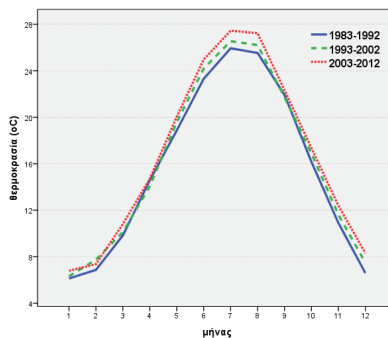
(α)



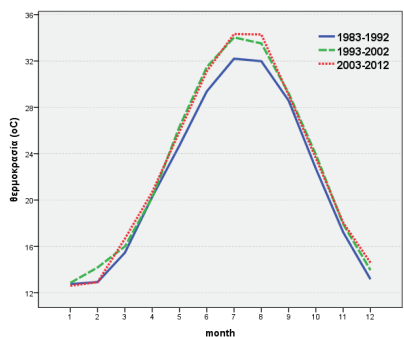
(β)



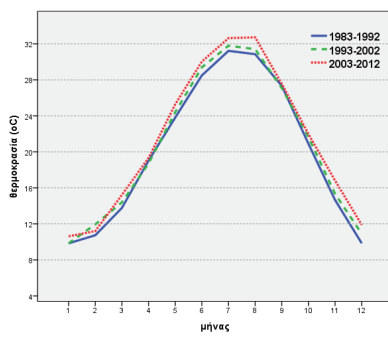
(γ)



(δ)



(ε)

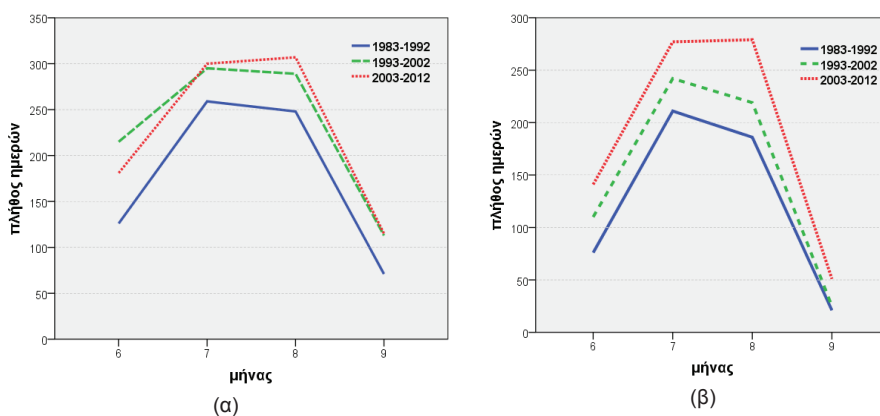


(στ)

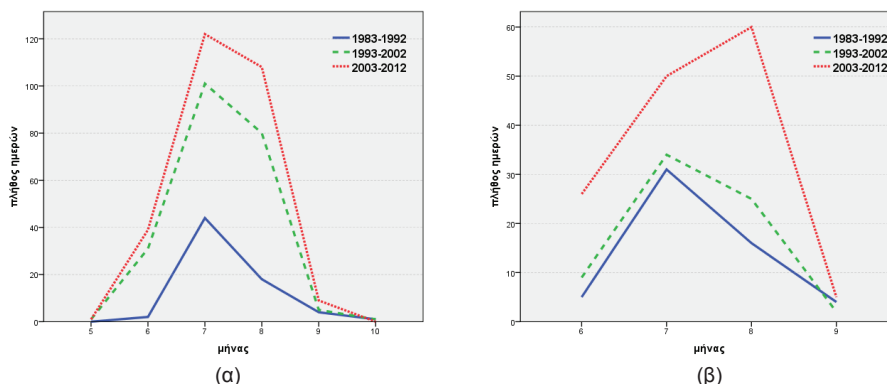
Εικόνα 1: Μέση ελάχιστη, μέση και μέση μέγιστη μηνιαία θερμοκρασία για την περίοδο 1983-2012 ανά δεκαετία, για την Αθήνα (α,γ,ε) και τη Θεσσαλονίκη (β,δ,στ).

($p < 0.05$), υποδηλώνοντας τη μη τυχαιότητα της μεταβολής αυτής. Αντίστοιχα είναι και τα αποτελέσματα για τη Θεσσαλονίκη όπου παρατηρείται στατιστικά σημαντική διαφοροποίηση τόσο των ελαχίστων όσο και των μεγίστων τιμών.

Ειδικότερα, η μεταβολή από τη δεκαετία 1983-1992 στη δεκαετία 2003-2012 για τις μέσες ελάχιστες μηνιαίες θερμοκρασίες στην Αθήνα κυμαίνεται από 0.27°C (μήνας Ιανουάριος) έως 2.33°C (μήνας Αύγουστος), για τις μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες κυμαίνεται από 0.03°C (μήνας Ιανουάριος) έως 2.31°C (μήνας Αύγουστος), ενώ για τις μέσες μέγιστες θερμοκρασίες κυμαίνεται από -0.14°C (μήνας Ιανουάριος) έως 2.30°C (μήνας Αύγουστος). Στη Θεσσαλονίκη, η μεταβολή στις μέσες ελάχιστες μηνιαίες θερμοκρασίες κυμαίνεται από 0.24°C (μήνας Απρίλιος) έως 1.90°C (μήνας Αύγουστος), στις μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες κυμαίνεται από 0.13°C (μήνας Απρίλιος) έως 1.66°C (μήνας Αύγουστος), ενώ στις μέσες μέγιστες θερμοκρασίες κυμαίνεται από 0.16°C (μήνας Ιανουάριος) έως 2.02°C (μήνας Αύγουστος). Επίσης παρατηρείται ότι η σημαντικότερη αύξηση σημειώθηκε στην Αθήνα από την πρώτη (1983-1992) στη δεύτερη δεκαετία (1993-2002) ενώ από τη δεύτερη στην τρίτη (2003-2012) η διαφοροποίηση των θερμοκρασιών ήταν πολύ μικρότερη. Αντίθετα, στη Θεσσαλονίκη η αύξηση των μέσων θερμοκρασιών από δεκαετία σε δεκαετία ήταν περισσότερο ομαλή.



Εικόνα 2: Πλήθος ημερών με μέση ημερήσια θερμοκρασία άνω των 25°C για την περίοδο 1983-2012 ανά δεκαετία (α) για την Αθήνα και (β) τη Θεσσαλονίκη.



Εικόνα 3: Πλήθος ημερών με μέγιστη θερμοκρασία μεγαλύτερη ή ίση των 35°C για την περίοδο 1983-2012 ανά δεκαετία (α) για την Αθήνα και (β) τη Θεσσαλονίκη.

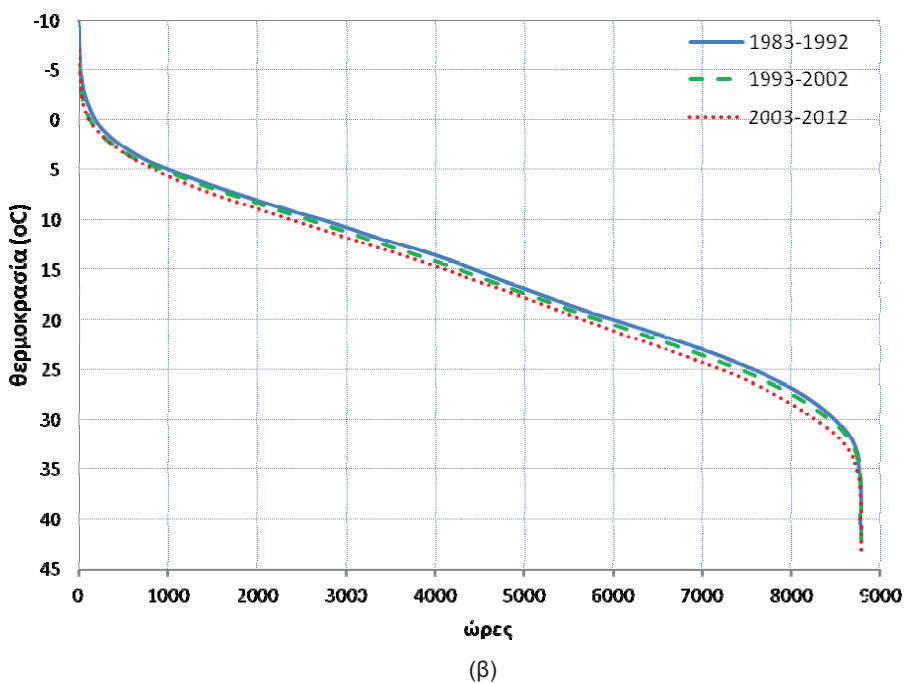
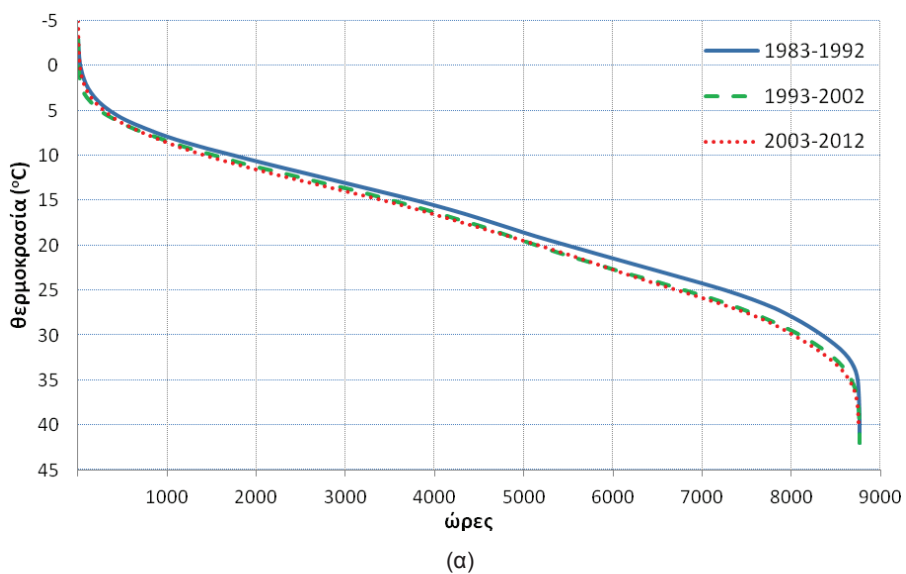
Αναφορικά με τον αριθμό των ημερών με μέση ημερήσια τιμή της θερμοκρασίας άνω των 25°C, όπως αποτυπώνεται στα διαγράμματα της Εικόνας 2, εμφανίζεται μια αυξητική τάση του πλήθους των ημερών και για τις δύο περιοχές. Αναλυτικά, καταγράφηκαν 704 ημέρες κατά την πρώτη δεκαετία, 912 τη δεύτερη και 903 την τρίτη στο πολεοδομικό συγκρότημα της Αθήνας (τουλάχιστον στην περιοχή των μετρήσεων). Δηλαδή η αύξηση των ημερών με μέση ημερήσια θερμοκρασία άνω των 25°C από την πρώτη στην τρίτη δεκαετία ήταν 28.3%. Παρομοίως, καταγράφηκαν 494 ημέρες την πρώτη δεκαετία, 596 τη δεύτερη και 748 ημέρες την τρίτη δεκαετία στην περιοχή της Θεσσαλονίκης (τουλάχιστον στην περιοχή των μετρήσεων), όπου η αυξητική τάση ήταν περισσότερο έντονη (51.4%) και πιο σταθερή. Αξίζει να σημειωθεί πως τα τελευταία χρόνια και στις δύο περιοχές διαφαίνεται μια ελαφρά μετατόπιση των θερμότερων ημερών από τον μήνα Ιούλιο στο μήνα Αύγουστο.

Παράλληλα και σε σχέση με το πλήθος των ημερών με μέγιστη τιμή που ισούται ή υπερβαίνει τους 35°C, η ανάλυση των δεδομένων παρουσιάζεται στα διαγράμματα της εικόνας 3 από όπου εξάγονται ανάλογα συμπεράσματα. Στην περιοχή της Αθήνας ο αριθμός των ημερών με μέγιστη θερμοκρασία άνω ή ίση των 35 βαθμών υπολογίστηκε σε 69, 219 και 279 για κάθε δεκαετία αντίστοιχα (αύξηση 217% στη δεύτερη δεκαετία και 27.3% στην τρίτη), ενώ στη Θεσσαλονίκη σε 56, 70 και 141 (αύξηση 2.5% στη δεύτερη δεκαετία και 101% στην τρίτη). Κατά την τρίτη δεκαετία (2003-2012) καταγράφονται οι περισσότερες χαρακτηριστικές ημέρες, με την κατανομή τους να διαφοροποιείται σημαντικά κατά τις τρεις δεκαετίες μόνο στην περιοχή της Αθήνας (έλεγχος Kruskal–Wallis).

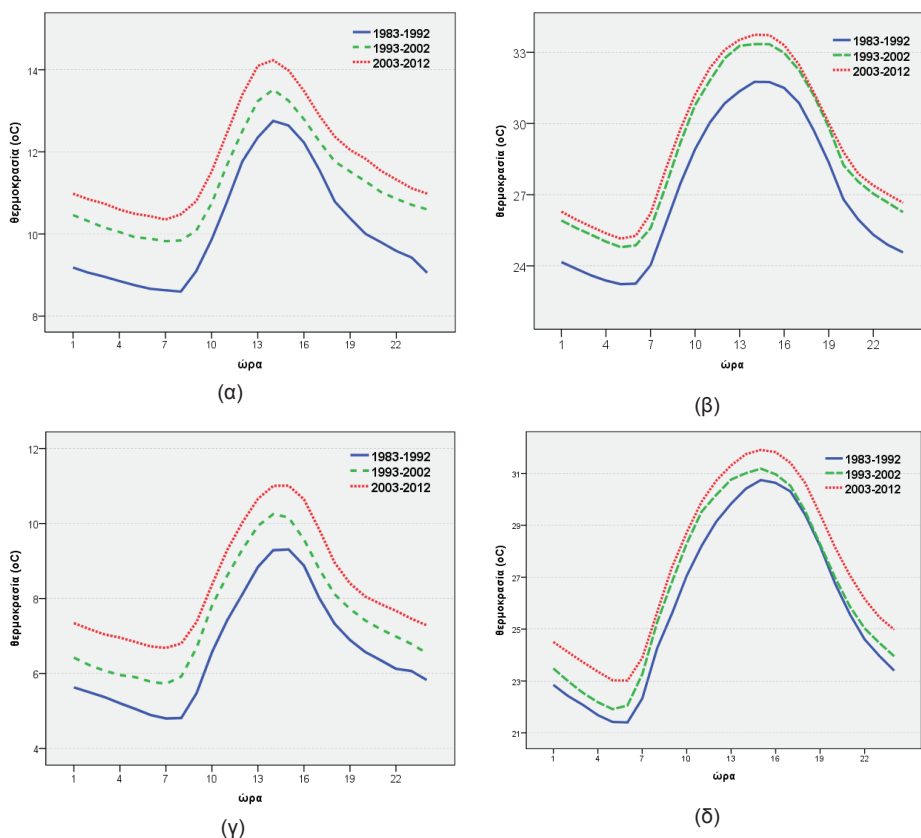
Από τις καμπύλες αθροιστικής συχνότητας της θερμοκρασίας (Εικόνα 4) για την Αθήνα (α) και τη Θεσσαλονίκη (β) είναι επίσης εμφανές ότι η συχνότητα εμφάνισης (h) των χαμηλών θερμοκρασιών ελαττώνεται, ενώ αντίθετα η συχνότητα των υψηλών θερμοκρασιών αυξάνεται από δεκαετία σε δεκαετία. Το γεγονός αυτό επιδρά ευνοϊκά στο συντελεστή αποδοτικότητας των αντλιών θερμότητας με πηγή θερμότητας τον αέρα κατά τη χειμερινή περίοδο, ενώ αντίθετα δυσχεραίνει τη λειτουργία των αντλιών θερμότητας και των αερόψυκτων ψυκτικών μονάδων κατά τη θερινή. Χρειάζεται ιδιαίτερη ανάλυση προκειμένου να διερευνηθούν οι μεταβολές αυτές στους συντελεστές αποδοτικότητας (στιγμιαίους και ετήσιους) τόσο στη χειμερινή όσο και στη θερινή περίοδο. Και από τις καμπύλες αυτές φαίνεται ότι η εντονότερη αύξηση στην Αθήνα παρατηρήθηκε από την πρώτη στη δεύτερη δεκαετία ενώ στη Θεσσαλονίκη η αύξηση ήταν πιο ομαλή από δεκαετία σε δεκαετία.

Στην προσπάθεια να διερευνηθούν και να αποτυπωθούν οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας σε ημερήσια κλίμακα κατά τις τρεις πρόσφατες δεκαετίες, προέκυψαν τα διαγράμματα της Εικόνας 5 ενδεικτικά για ένα χειμερινό και ένα θερινό μήνα για το πολεοδομικό συγκρότημα της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης. Αναλυτικά πρόκειται για τους μήνες Δεκέμβριο και Ιούλιο με αναφορά στις μέσες ημερήσιες τιμές της θερμοκρασίας στις τρεις δεκαετίες. Και εδώ είναι εμφανής η άνοδος της θερμοκρασίας από δεκαετία σε δεκαετία, διαφορά που καταγράφεται ιδιαίτερα έντονη στις χαμηλές θερμοκρασίες του έτους, δηλαδή κατά το μήνα Δεκέμβριο. Πιο αναλυτικά από τη δεκαετία 1983-1992 στη δεκαετία 2003-2012 παρατηρείται μία άνοδος των μέσων ωριαίων θερμοκρασιών από 1.3°C (ώρα 16:00) έως 1.9°C (ώρα 24:00) το Δεκέμβριο και από 1.6°C (ώρα 18:00) έως 2.3°C (ώρα 11:00) τον Ιούλιο στην Αθήνα. Για τη Θεσσαλονίκη παρατηρείται μία άνοδος των μέσων ωριαίων θερμοκρασιών από 1.4°C (ώρα 23:00) έως 2.0°C (ώρα 8:00) το Δεκέμβριο και από 1.1°C (ώρα 9:0) έως 1.8°C (ώρα 17:00) τον Ιούλιο. Οι διαφορές στις ώρες εμφάνισης των μέγιστων διαφορών πιθανότατα οφείλεται στο φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας και στη θαλάσσια αύρα, δεδομένου ότι οι μετεωρολογικοί σταθμοί είναι εγκατεστημένοι σε διαφορετικά δομημένες περιοχές.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός πως τα αποτελέσματα, οι συσχετισμοί και η μεταβολή των κατανομών της θερμοκρασίας στις τρεις δεκαετίες που αποτυπώνονται στις γραφικές παραστάσεις επιβεβαιώνονται και στατιστικά με τον έλεγχο Kruskal–Wallis, με μόνη εξαίρεση την περίπτωση του αριθμού των ημερών με μέγιστη θερμοκρασία άνω των 35°C για την περιοχή της Θεσσαλονίκης (Πίνακας 1).



Εικόνα 4: Καμπύλες αθροιστικής συχνότητας της θερμοκρασίας (α) για την Αθήνα και (β) για τη Θεσσαλονίκη για τις δεκαετίες 1983-1992, 1993-2002 και 2003-2012.



Εικόνα 5: Μέση ημερήσια θερμοκρασία για τους μήνες Δεκέμβριο και Ιούλιο για το διάστημα 1983-2012 ανά δεκαετία (α, β) για την Αθήνα και (γ, δ) τη Θεσσαλονίκη αντίστοιχα.

Πίνακας 1: Αποτελέσματα ελέγχου Kruskal –Wallis για τις εξεταζόμενες παραμέτρους ως προς τη χρονική τους εξέλιξη στις τρεις δεκαετίες.

	Αθήνα	Θεσσαλονίκη
Ελάχιστες τιμές θερμοκρασίας	**	**
Μέγιστες τιμές θερμοκρασίας	**	**
Πλήθος ημερών με μέση θερμοκρασία άνω των 25°C	**	**
Πλήθος ημερών με μέγιστη θερμοκρασία άνω των 35°C	**	-
Μέση ημερήσια θερμοκρασία Δεκεμβρίου	**	**
Μέση ημερήσια θερμοκρασία Ιουλίου	**	**

Οι στατιστικά σημαντικές διαφοροποιήσεις σημειώνονται με **, σε στάθμη σημαντικότητας 0.05.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ανάλυση της θερμοκρασίας του εξωτερικού αέρα στην Αθήνα και τη Θεσσαλονίκη για την τριακονταετία 1983-2012, πραγματοποιήθηκε με βάση τις ωριαίες μετρήσεις των μετεωρολογικών σταθμών του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών και του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν την έντονη και στατιστικά σημαντική ανοδική τάση των τιμών θερμοκρασίας και στα δύο αστικά κέντρα. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται μια σταδιακή αύξηση των μέσων ελάχιστων, της μέσων και της μέσων μέγιστων μηνιαίων τιμών της θερμοκρασίας από δεκαετία σε δεκαετία. Η διαφοροποίηση της θερμοκρασίας μεταξύ των δεκαετιών αποδεικνύεται ισχυρά στατιστικά σημαντική, με βάση τον μη-παραμετρικό έλεγχο Kruskal–Wallis ($p < 0.05$), υποδηλώνοντας τη μη τυχαιότητα της μεταβολής αυτής. Οι καμπύλες αθροιστικής συχνότητας της θερμοκρασίας καταδεικνύουν ότι η συχνότητα εμφάνισης (h) των χαμηλών θερμοκρασιών ελαττώνεται, ενώ αντίθετα η συχνότητα των υψηλών θερμοκρασιών αυξάνεται από δεκαετία σε δεκαετία. Ειδικότερα εμφανίζεται μια αυξητική τάση του πλήθους των ημερών με μέση ημερήσια τιμή της θερμοκρασίας άνω των 25°C και του πλήθους των ημερών με μέγιστη τιμή που ισούται ή υπερβαίνει τους 35°C, και για τις δύο περιοχές, ενώ διαφαίνεται μια ελαφρά μετατόπιση των θερμότερων ημερών από τον μήνα Ιούλιο στο μήνα Αύγουστο. Επίσης, η καταγραφή της ημερήσιας διακύμανσης της θερμοκρασίας κατά τις τρεις δεκαετίες, δείχνει μια εμφανή άνοδο της θερμοκρασίας από δεκαετία σε δεκαετία, σε όλο το φάσμα των ωρών της ημέρας, ενώ η αύξηση καταγράφεται ιδιαίτερα έντονα στις χαμηλές θερμοκρασίες του έτους, δηλαδή κατά τη χειμερινή περίοδο. Πιο αναλυτικά από τη δεκαετία 1983-1992 στη δεκαετία 2003-2012 παρατηρείται μία άνοδος των μέσων ωριαίων θερμοκρασιών από 1.3°C (ώρα 16:00) έως 1.9°C (ώρα 24:00) το Δεκέμβριο και από 1.6°C (ώρα 18:00) έως 2.3°C (ώρα 11:00) τον Ιούλιο στην Αθήνα. Οι διαπιστώσεις αυτές σε συνδυασμό με τις αποδεδειγμένες αρνητικές επιδράσεις της κλιματικής αλλαγής σε αστικές περιοχές, θα πρέπει να θεθούν υπόψη και να αποτελέσουν τη βάση τόσο για τη βελτίωση των υφιστάμενων υποδομών (π.χ. στους τομείς της ενέργειας, των μεταφορών) όσο και για την ανάπτυξη κατάλληλων στρατηγικών ανάπτυξης και αστικού σχεδιασμού.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2007, "Climate Change 2007: the fourth assessment report", Cambridge University Press.
- [2] NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), 2014, "U.S. Climate Extremes Index", Accessed April 2014, www.ncdc.noaa.gov/extremes/cei.
- [3] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2013, "Climate change 2013 - the fifth assessment report", Cambridge University Press.
- [4] Επιτροπή Μελέτης Επιπτώσεων Κλιματικής Αλλαγής, 2011, "Οι περιβαλλοντικές, οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στην Ελλάδα" Τράπεζα της Ελλάδας, Αθήνα 1, ISBN 978-960-7032-49-2.
- [5] WWF Ελλάς, 2009, "Το αύριο της Ελλάδας: επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στην Ελλάδα κατά το άμεσο μέλλον", Αθήνα.
- [6] Papakostas, K., T., Michopoulos, A., Mavromatis, T., and Kyriakis N., 2013, "Changes of temperature data for energy studies over time and their impact on energy consumption and CO₂ emissions. The case of Athens and Thessaloniki – Greece", International Journal of Energy and Environment, 4 (1), pp. 59-72.
- [7] Papakostas, K.T., Zagana-Papavasileiou, P., and Mavromatis, T., 2014, "Analysis of 3 decades temperature data for Athens and Thessaloniki, Greece – Impact of temperature changes on energy consumption for heating and cooling of buildings", International Conference ADAPTtoCLIMATE, Nicosia, Cyprus, 27-28 March.

- [8] Santamouris, M., Papanikolaou, N., Livada, I., Koronakis, I., Georgakis, C., Argiriou, A., and Assimakopoulos, D., N., 2001, "On the impact of urban climate to the energy consumption of buildings", *Solar Energy*, 70(3), pp. 201–16.
- [9] Kolokotsa, D., Psomas, A., and Karapidakis, E., 2009, "Urban heat island in southern Europe: the case study of Hania, Crete", *Solar Energy*, 83, pp. 1871-83.
- [10] Giannaros, T., M., and Melas D., 2012, "Study of the urban heat island in a coastal Mediterranean City: The case study of Thessaloniki, Greece", *Atmospheric Research*, 118, pp. 103-120.
- [11] Vardoulakis, E., Karamanis, D., Fotiadi, A., and Mihalakakou, G., 2013, "The urban heat island effect in a small Mediterranean city of high summer temperatures and cooling energy demands", *Solar Energy*, 70, pp. 128–144.
- [12] Giannakopoulos, C., Kostopoulou, E., Varotsos, K., V., Tziotziou K., and Plitharas, A., 2011, "An integrated assessment of climate change impacts for Greece in the near future", *Regional Environmental Change*, 11(4), pp. 829-843.
- [13] Papakostas, K., Mavromatis, T., and Kyriakis, N., 2010, "Impact of the ambient temperature rise on the energy consumption for heating and cooling in residential buildings of Greece", *Renewable Energy* 35, pp. 1376-1379.
- [14] URL1: http://www.wmo.int/pages/mediacentre/press_releases/pr_997_en.html
- [15] Joint Research Center, Institute for Environment and Sustainability, European Commission, 2008, "Extreme Temperatures and Precipitation in Europe: Analysis of a High-Resolution Climate Change Scenario", JRC 44124, EUR 23291 EN, SSN 1018-5593

ΟΙ ΒΑΘΜΟΗΜΕΡΕΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΚΑΙ ΨΥΞΗΣ ΩΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΟ ΜΕΓΕΘΟΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΑΠΑΙΤΗΣΕΩΝ ΣΤΑ ΚΤΙΡΙΑ. ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΡΙΟΔΟΥ 1983-2012 ΓΙΑ ΑΘΗΝΑ ΚΑΙ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ

Π. Ζαγανά-Παπαβασιλείου*, Κ. Παπακώστας

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
Πολυτεχνική Σχολή -Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
541 24 Θεσσαλονίκη
E-mail: polyxeni@live.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία γίνεται αρχικά μία παρουσίαση της εξέλιξης των βαθμοημερών θέρμανσης και ψύξης από το έτος 1983 έως το 2012, για τις δύο μεγαλύτερες πόλεις της Ελλάδας, την Αθήνα και τη Θεσσαλονίκη. Οι βαθμοημέρες υπολογίστηκαν από στατιστική επεξεργασία των ωριαίων τιμών της θερμοκρασίας ξηρού θερμομέτρου των δύο περιοχών για τη συγκεκριμένη 30ετία και στην εργασία δίδονται τιμές για δύο τυπικές θερμοκρασίες βάσης, τους 15°C για τη θέρμανση και τους 22°C για την ψύξη. Στη συνέχεια, συγκρίνονται οι μέσες τιμές βαθμοημερών θέρμανσης και ψύξης των δεκαετιών 1983-1992, 1993-2002 και 2003-2012, για τις δύο πόλεις σε διάφορες θερμοκρασίες βάσης. Τέλος, με την εφαρμογή της μεθόδου βαθμοημερών μεταβλητής βάσης, υπολογίζεται η κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση και ψύξη σε ένα τυπικό κτίριο κατοικιών και συγκρίνονται οι ενεργειακές απαιτήσεις ανάμεσα στις τρεις δεκαετίες. Είναι εμφανής η ανοδική τάση της θερμοκρασίας και η επίδρασή της στην κατανάλωση ενέργειας. Η μέση τιμή των βαθμοημερών θέρμανσης στην Αθήνα κατά τη δεκαετία 1993-2002 μειώθηκε 8÷22% σε σχέση με τη δεκαετία 1983-1992, ενώ η μείωση κατά τη δεκαετία 2003-2012 σε σχέση με τη δεκαετία 1993-2002 ήταν από 0.5% έως 8.5%, ανάλογα με τη θερμοκρασία βάσης. Η αντίστοιχη μείωση στη Θεσσαλονίκη κυμαίνεται από 4.5% έως 9.5% για τη δεκαετία 1993-2002 σε σχέση με τη δεκαετία 1983-1992 και 5÷10% για τη δεκαετία 2003-2012 σε σχέση με τη δεκαετία 1993-2002. Η μέση τιμή των βαθμοημερών ψύξης για την Αθήνα αυξήθηκε από 25% έως 69%, από την πρώτη στη δεύτερη δεκαετία, και από 6% έως 14% από τη δεύτερη στην τρίτη δεκαετία. Αύξηση 10÷21% από την πρώτη στη δεύτερη δεκαετία και 14÷44% από τη δεύτερη στην τρίτη δεκαετία, παρατηρήθηκε και για τη Θεσσαλονίκη, ανάλογα με τη θερμοκρασία βάσης. Τα ποσοστά μείωσης των ενεργειακών απαιτήσεων για θέρμανση στο τυπικό κτίριο κατοικιών για την δεκαετία 1993-2002 σε σχέση με τη δεκαετία 1983-1992, είναι 12.65% για την Αθήνα και 2.58% για τη Θεσσαλονίκη. Αντίστοιχα τα ποσοστά μείωσης για την δεκαετία 2003-2012 σε σχέση με τη δεκαετία 1993-2002 είναι 3.57% για την Αθήνα και 11.63% για τη Θεσσαλονίκη. Το συνολικό ποσοστό μείωσης των απαιτήσεων για θέρμανση στις δύο δεκαετίες είναι 15.77% και 13.92% αντίστοιχα για τις δύο πόλεις. Όσον αφορά τις απαιτήσεις για ψύξη, τα ποσοστά αύξησης για την δεκαετία 1993-2002 σε σχέση με τη δεκαετία 1983-1992 είναι 32.11% για την Αθήνα και 12.23% για τη Θεσσαλονίκη, ενώ τα αντίστοιχα ποσοστά αύξησης για την δεκαετία 2003-2012 σε σχέση με τη δεκαετία 1993-2002 είναι 8.19% για την Αθήνα και 20.36% για τη Θεσσαλονίκη. Το συνολικό ποσοστό αύξησης των απαιτήσεων για ψύξη στις δύο δεκαετίες είναι 42.94% και 35% αντίστοιχα για τις δύο πόλεις.

Λέξεις κλειδιά: βαθμοημέρες θέρμανσης και ψύξης, ενεργειακή κατανάλωση, κλιματική αλλαγή

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αλλαγή του κλίματος και οι συνέπειές της στην κατανάλωση ενέργειας είναι ένα ζήτημα που απασχολεί τους μηχανικούς ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια. Αυτό συμβαίνει διότι παρατηρείται μία σταθερή αλλαγή στα θερμοκρασιακά δεδομένα του πλανήτη.

Συγκεκριμένα στην Ευρώπη, και ιδιαίτερα στις νότιες περιοχές και στη λεκάνη της Μεσογείου όπου γεωγραφικά ανήκει και η Ελλάδα, παρατηρείται αύξηση της μέσης θερμοκρασίας, τόσο κατά τους θερινούς όσο και κατά τους χειμερινούς μήνες, μείωση των βροχοπτώσεων, αύξηση των πυρκαϊών, φαινόμενα ξηρασίας και λειψυδρία. Αυτό λοιπόν, έχει ως αποτέλεσμα οι ανάγκες για θέρμανση να μειώνονται ενώ για ψύξη να αυξάνονται αφού οδηγούμαστε σε ηπιότερους χειμώνες και θερμότερα καλοκαίρια [1-6].

Ένας από τους δείκτες του κλίματος μιας περιοχής είναι και οι βαθμοημέρες θέρμανσης και ψύξης. Οι βαθμοημέρες είναι μία έμμεση ένδειξη της διακύμανσης της θερμοκρασίας του εξωτερικού αέρα και χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των ενεργειακών απαιτήσεων για θέρμανση και ψύξη σε κτίρια [7-10].

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας υπολογίστηκαν οι συνολικές ετήσιες τιμές των βαθμοημερών θέρμανσης και ψύξης για τις δύο μεγαλύτερες πόλεις της Ελλάδας, την Αθήνα και τη Θεσσαλονίκη, παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξή τους από το έτος 1983 έως το έτος 2012 σε τυπικές θερμοκρασίες βάσης, συγκρίνονται οι μέσες τιμές βαθμοημερών θέρμανσης και ψύξης των δεκαετιών 1983-1992, 1993-2002 και 2003-2012, σε διάφορες θερμοκρασίες βάσης, και διερευνάται η επίδραση της μεταβολής τους στις ενεργειακές απαιτήσεις ενός κτιρίου κατοικιών κατά στις τρεις δεκαετίες.

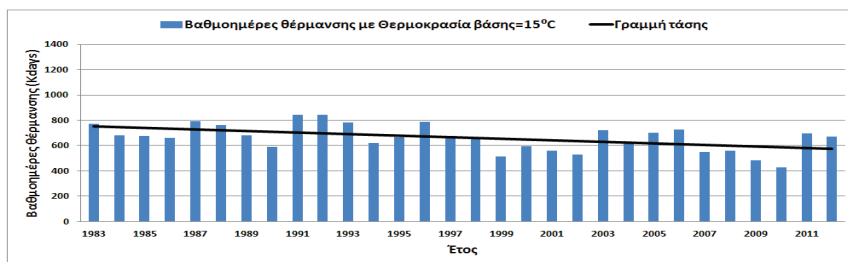
2. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΒΑΘΜΟΗΜΕΡΩΝ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΚΑΙ ΨΥΞΗΣ

Βαθμοημέρες είναι το άθροισμα διαφορών θερμοκρασίας μεταξύ μιας θερμοκρασίας αναφοράς και της εξωτερικής θερμοκρασίας του αέρα σε μία χρονική περίοδο. Η θερμοκρασία αναφοράς είναι γνωστή ως θερμοκρασία βάσης, και είναι η εξωτερική θερμοκρασία στην οποία ένα κτίριο δεν απαιτεί ούτε ψύξη ούτε θέρμανση προκειμένου να διατηρούνται οι συνθήκες άνεσης στο εσωτερικό του. Οι βαθμοημέρες είναι ένα μέτρο της διακύμανσης της εξωτερικής θερμοκρασίας μιας περιοχής και ένας δείκτης για το πόσο δριμύ είναι το κλίμα της. Επίσης μπορούν να θεωρηθούν ως μία ένδειξη του τμήματος εκείνου της καταναλισκόμενης ενέργειας στα κτίρια, το οποίο εξαρτάται από τη μεταβλητότητα του κλίματος.

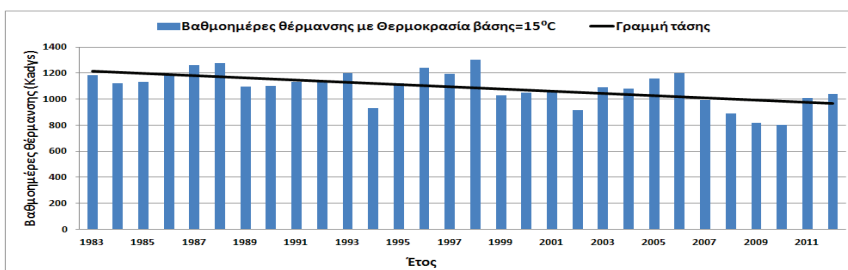
Οι μέθοδοι των βαθμοημερών είναι οι απλούστερες μεθοδολογίες για την εκτίμηση των ενεργειακών απαιτήσεων για θέρμανση και ψύξη σε κτίρια, ιδιαίτερα εάν η χρήση των κτιρίων είναι συνεχής και ο βαθμός απόδοσης του εξοπλισμού θέρμανσης και κλιματισμού θεωρείται σταθερός. Επίσης, με την εφαρμογή των μεθόδων βαθμοημερών, μπορούν να αξιολογηθούν μέτρα εξοικονόμησης ενέργειας σε υπάρχοντα ή μελλοντικά κτίρια και να γίνει ενεργειακή παρακολούθηση και διαχείριση των κτιρίων.

Ανάλογα με τη διαθεσιμότητα των δεδομένων θερμοκρασίας του εξωτερικού αέρα, χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι για τον υπολογισμό των βαθμοημερών θέρμανσης και ψύξης. Ο υπολογισμός γίνεται είτε από τη μέση ημερήσια θερμοκρασία ξηρού θερμομέτρου του εξωτερικού περιβάλλοντος είτε από τις μέσες ωριαίες θερμοκρασίες ή από τη μέση τιμή της μέγιστης και της ελάχιστης θερμοκρασίας της ημέρας. Οι διαφορετικοί τρόποι υπολογισμού εξηγούν και τις διαφορές που παρατηρούνται στις τιμές που δίδονται από διάφορες πηγές.

Στην παρούσα εργασία οι τιμές των βαθμοημερών προέκυψαν από την στατιστική επεξεργασία των ωριαίων μετρήσεων της θερμοκρασίας ξηρού θερμομέτρου του εξωτερικού αέρα των ετών 1983 έως 2012 [11-13]. Τα θερμοκρασιακά δεδομένα ελήφθησαν από τους μετεωρολογικούς σταθμούς του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών και του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης [14,15].

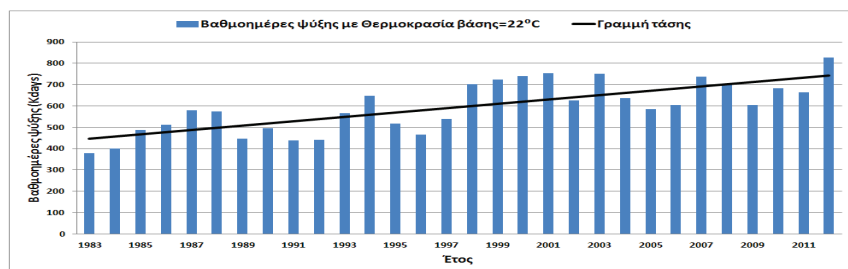


(α)

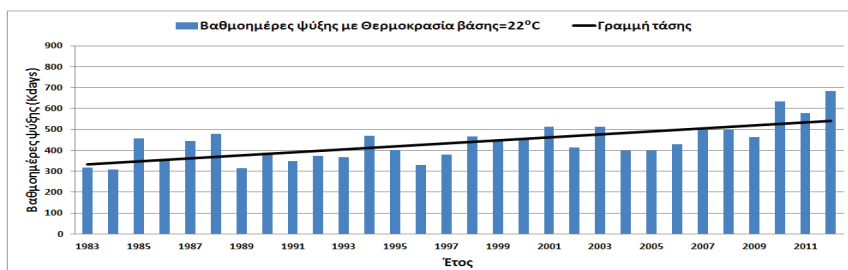


(β)

Εικόνα 1: Βαθμομέρες θέρμανσης της περιόδου 1983-2012 σε θερμοκρασία βάσης 15°C (α) Αθήνα και (β) Θεσσαλονίκη.



(α)



(β)

Εικόνα 2: Βαθμομέρες ψύξης της περιόδου 1983-2012 σε θερμοκρασία βάσης 22°C. (α) Αθήνα και (β) Θεσσαλονίκη.

Υπολογίστηκαν οι συνολικές βαθμοημέρες της χειμερινής περιόδου (Οκτώβριος - Απρίλιος), σε θερμοκρασίες βάσης από 10 έως 20°C, και οι συνολικές βαθμοημέρες της θερινής περιόδου (Ιούνιος – Σεπτέμβριος), σε θερμοκρασίες βάσης από 20 έως 28°C. Λόγω του μεγάλου εύρους των αποτελεσμάτων, παρουσιάζονται ενδεικτικά οι ετήσιες βαθμοημέρες θέρμανσης της περιόδου 1983-2002 για θερμοκρασία βάσης 15°C (εικόνα 1) και οι ετήσιες βαθμοημέρες ψύξης για θερμοκρασία βάσης 22°C (εικόνα 2), καθώς και η γραμμή τάσης τους κατά τη διάρκεια της 30ετίας.

Παρά τη διακύμανση των τιμών από έτος σε έτος, είναι προφανής η καθοδική τάση των βαθμοημερών θέρμανσης και η ανοδική τάση των βαθμοημερών ψύξης, ιδιαίτερα κατά την τελευταία 15ετία. Αντίστοιχα αποτελέσματα έχουν αποτυπωθεί και σε μελέτες για άλλες χώρες [16]. Αξίζει να επισημανθεί ότι η τιμή των βαθμοημερών ψύξης του έτους 2012 είναι η μεγαλύτερη της 30-ετίας και για τις δύο πόλεις, ενώ οι τιμές των βαθμοημερών θέρμανσης των ετών 2009 και 2010 είναι αντίστοιχα οι μικρότερες. Αποτυπώνεται δηλαδή μία ισχυρή ένδειξη της αλλαγής του κλίματος, με ηπιότερους χειμώνες και θερμότερα καλοκαίρια.

Γενικά, πλην ελαχίστων εξαιρέσεων κυρίως κατά τη χειμερινή περίοδο, υπάρχει ομοιομορφία στην αύξηση ή τη μείωση των βαθμοημερών για το ίδιο έτος και για τις δύο πόλεις. Δηλαδή, όταν επικρατεί δριμύς χειμώνας ή θερμό καλοκαίρι στη Θεσσαλονίκη, το ίδιο συμβαίνει και στην Αθήνα. Άρα οι κλιματικές συνθήκες είναι αντίστοιχες και για τις δύο πόλεις, ιδιαίτερα την περίοδο του θέρους.

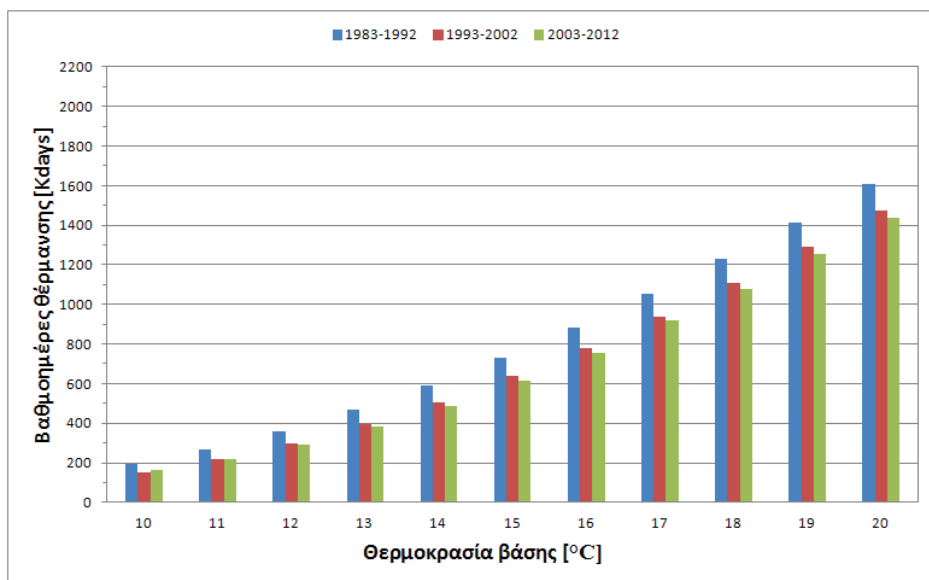
Η σύγκριση των βαθμοημερών θέρμανσης, σε διάφορες θερμοκρασίες βάσης, ανάμεσα στις δεκαετίες 1983-1992, 1993-2002 και 2003-2012 παρουσιάζεται στα διαγράμματα των εικόνων 3 έως 6. Η μέση τιμή των (ετήσιων) βαθμοημερών θέρμανσης στην Αθήνα κατά τη δεκαετία 1993-2002 μειώθηκε 8÷22% σε σχέση με τη δεκαετία 1983-1992, ενώ η μείωση κατά τη δεκαετία 2003-2012 σε σχέση με τη δεκαετία 1993-2002 ήταν από 0.5% έως 8.5%, ανάλογα με τη θερμοκρασία βάσης. Η αντίστοιχη μείωση στη Θεσσαλονίκη κυμαίνεται από 4.5% έως 9.5% για τη δεκαετία 1993-2002 σε σχέση με τη δεκαετία 1983-1992 και 5%÷10% για τη δεκαετία 2003-2012 σε σχέση με τη δεκαετία 1993-2002.

Η συνολική μείωση από την πρώτη στην τρίτη δεκαετία είναι από 10.4% έως 19.7% (περίπου 8% ανά δεκαετία για τη θερμοκρασία βάσης των 15°C) για την Αθήνα και από 9.2% έως 18.6% (περίπου 7% ανά δεκαετία για τη θερμοκρασία βάσης των 15°C) για τη Θεσσαλονίκη.

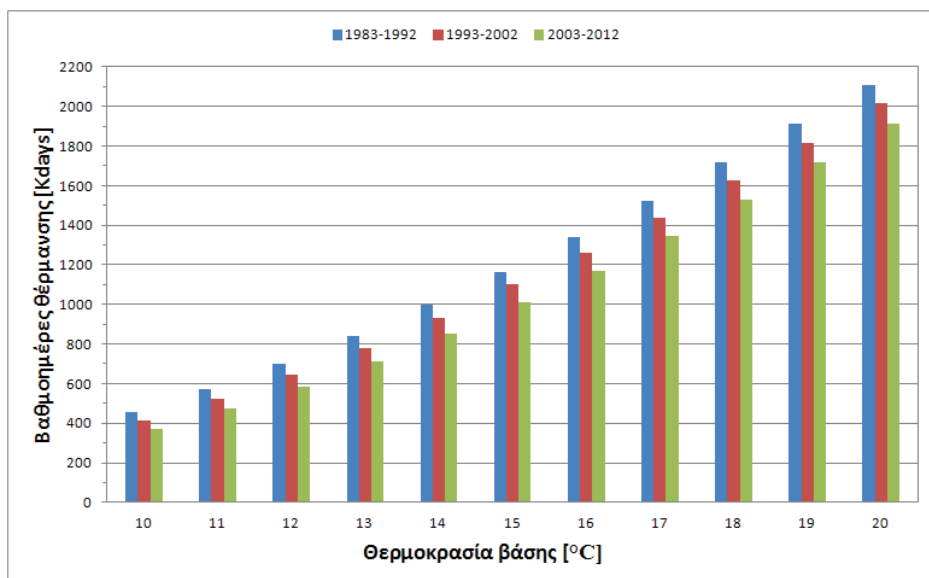
Η μέση τιμή των (ετήσιων) βαθμοημερών ψύξης για την Αθήνα αυξήθηκε από 25% έως 69%, από την πρώτη στη δεύτερη δεκαετία, και από 6% έως 14% από τη δεύτερη στην τρίτη δεκαετία. Αύξηση 10%÷21% από την πρώτη στη δεύτερη δεκαετία και 14%÷44% από τη δεύτερη στην τρίτη δεκαετία, παρατηρήθηκε και για τη Θεσσαλονίκη, ανάλογα με τη θερμοκρασία βάσης.

Η συνολική αύξηση από την πρώτη στην τρίτη δεκαετία είναι από 32.4% έως 92.7% (περίπου 25% ανά δεκαετία για τη θερμοκρασία βάσης των 22°C) για την Αθήνα και από 26.2% έως 74.6% (περίπου 20% ανά δεκαετία για τη θερμοκρασία βάσης των 22°C) για τη Θεσσαλονίκη.

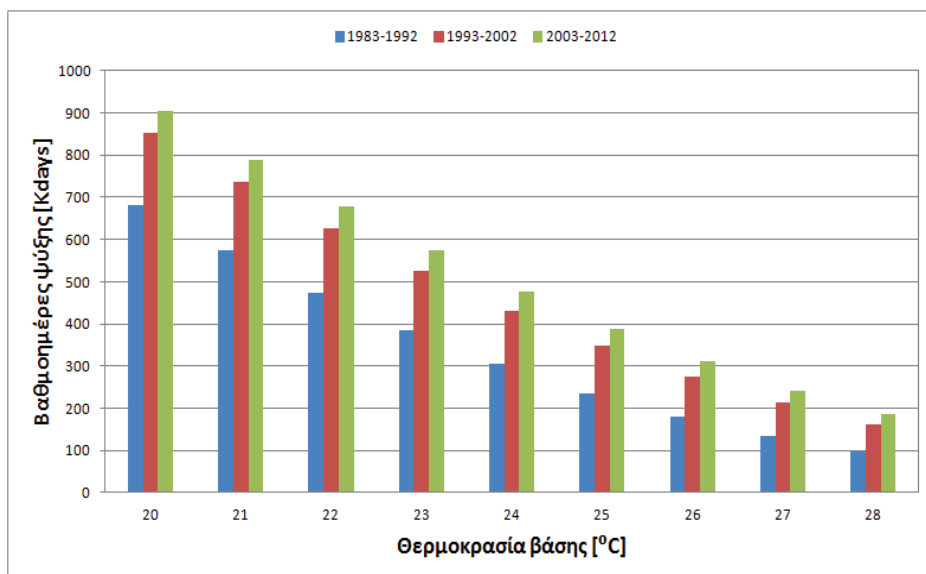
Κατά τη θερινή περίοδο, παρατηρείται μεγαλύτερο ποσοστό μεταβολής βαθμοημερών σε σχέση με τη χειμερινή, δηλαδή οι θερμοκρασίες αυξήθηκαν περισσότερο στα καλοκαίρια από ότι στους χειμώνες. Συγκεκριμένα, κατά την περίοδο θέρμανσης, όσο αυξάνει η θερμοκρασία βάσης από τις χαμηλές (10°C) στις υψηλές (20°C) τιμές, υπάρχει μια προοδευτική μείωση του ποσοστού μεταβολής των βαθμοημερών. Το αντίθετο συμβαίνει κατά την περίοδο ψύξης. Αυτό δείχνει ότι οι μεγαλύτερες αλλαγές παρατηρούνται στις ακραίες κλιματολογικές συνθήκες. Δηλαδή, για την περίοδο θέρμανσης τα μεγαλύτερα ποσοστά μείωσης από δεκαετία σε δεκαετία είναι για θερμοκρασίες βάσης 10°C και κάτω, επομένως οι χειμώνες είναι ηπιότεροι, ενώ για την περίοδο ψύξης τα μεγαλύτερα ποσοστά αύξησης είναι για θερμοκρασίες βάσης 28°C και άνω, επομένως τα καλοκαίρια είναι θερμότερα.



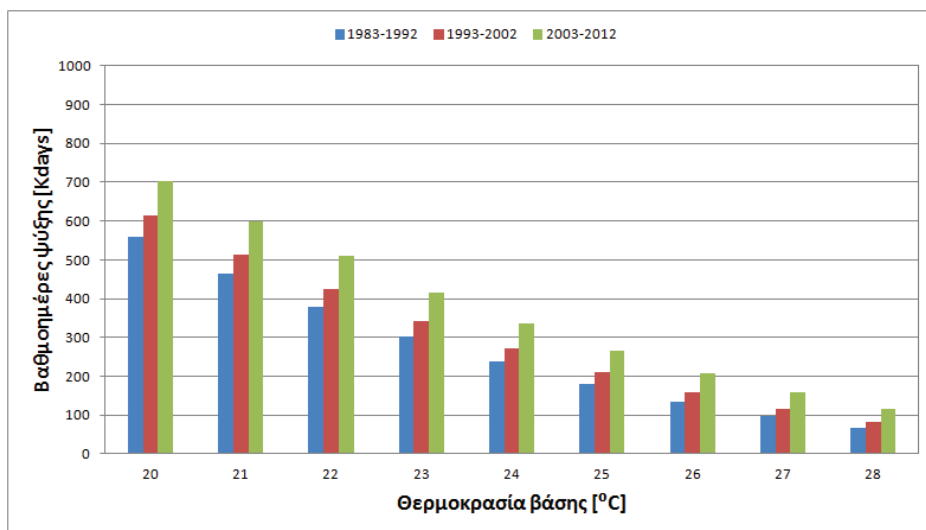
Εικόνα 3: Βαθμομέρες θέρμανσης (ΟΚΤ-ΑΠΡ) σε διάφορες θερμοκρασίες βάσης, για τις περιόδους 1983-1992, 1993-2002 και 2003-2012 - Αθήνα



Εικόνα 4: Βαθμομέρες θέρμανσης (ΟΚΤ-ΑΠΡ) σε διάφορες θερμοκρασίες βάσης, για τις περιόδους 1983-1992, 1993-2002 και 2003-2012 - Θεσσαλονίκη



Εικόνα 5: Βαθμομέρες ψύξης (ΙΟΥΝ-ΣΕΠ) σε διάφορες θερμοκρασίες βάσης, για τις περιόδους 1983-1992, 1993-2002 και 2003-2012, Αθήνα



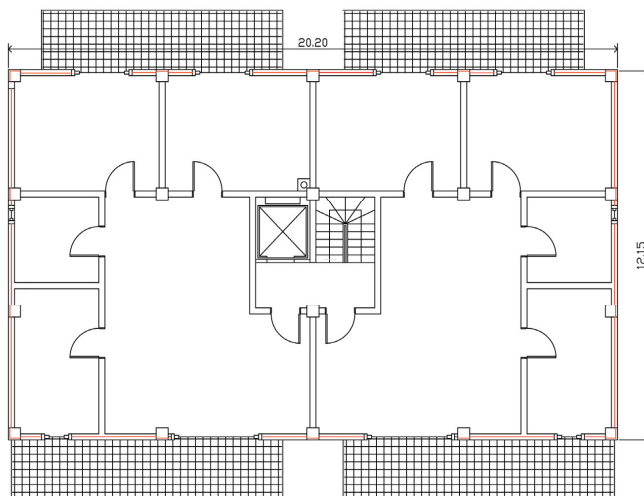
Εικόνα 6: Βαθμομέρες ψύξης (ΙΟΥΝ-ΣΕΠ) σε διάφορες θερμοκρασίες βάσης, για τις περιόδους 1983-1992, 1993-2002 και 2003-2012, Θεσσαλονίκη

3. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΚΑΙ ΨΥΞΗ ΣΕ ΚΤΙΡΙΟ ΚΑΤΟΙΚΙΩΝ

Για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την επίδραση που έχει η μεταβολή της θερμοκρασίας στην ενεργειακή κατανάλωση των κτιρίων, υπολογίστηκαν οι ενεργειακές απαιτήσεις ενός κτιρίου κατοικιών για θέρμανση και ψύξη. Για την εκτίμηση των ενεργειακών απαιτήσεων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος βαθμομερών μεταβλητής βάσης, η οποία λαμβάνει υπόψη τις εσωτερικές πηγές θερμότητας καθώς και τα θερμικά κέρδη από ηλιακή ακτινοβολία.

Το κτίριο είναι μία διώροφη πολυκατοικία, από παντού ελεύθερη, με επίπεδη οροφή, pilotis και δύο διαμερίσματα ανά όροφο. Κάθε τυπικό όροφος έχει κάτοψη 20.20x12.15 m και ύψος 2.8 m. Τα ανοίγματα είναι κατανεμημένα στη βόρεια και νότια πλευρά του κτιρίου, και αντιπροσωπεύουν περίπου το 30% της εξωτερικής επιφάνειας. Η θερμομόνωση του κτιρίου είναι από τυποποιημένα θερμομονωτικά υλικά, που είναι διαθέσιμα στην ελληνική αγορά, και οι συντελεστές θερμοπερατότητας των επιμέρους δομικών στοιχείων είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στο όριο που θέτει ο ΚΕΝΑΚ, αλλά για την απλοποίηση των υπολογισμών θεωρήθηκαν κοινοί και για τις δύο πόλεις μολονότι ανήκουν σε διαφορετικές κλιματικές ζώνες. Ο ρυθμός αερισμού θεωρήθηκε ίσος με 0.5 εναλλαγές του όγκου του κτιρίου ανά ώρα. Ο συνολικός συντελεστής θερμικών του κτιρίου H_T υπολογίστηκε σε 841 W/K.

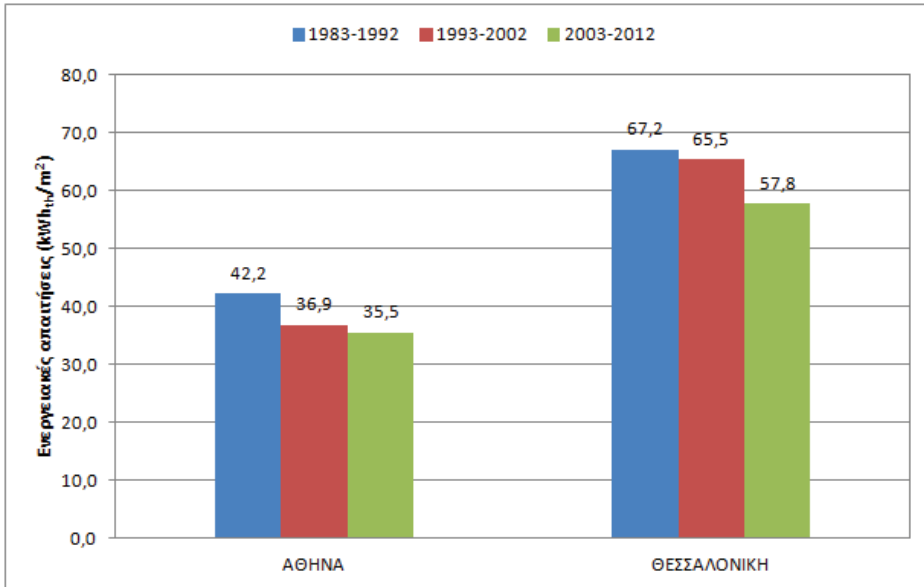
Η εσωτερική θερμοκρασία του κτιρίου θεωρήθηκε σταθερή για τις ώρες από 08:00 έως 24:00 και ίση με 20°C για τη χειμερινή περίοδο και 26°C για τη θερινή. Για τις υπόλοιπες ώρες θεωρήθηκε ότι η θερμοκρασία είναι μικρότερη κατά 2K και μεγαλύτερη κατά 3K, αντίστοιχα για τη χειμερινή και θερινή περίοδο. Τα θερμικά κέρδη από ανθρώπους, φώτα και συσκευές υπολογίστηκαν σύμφωνα με τα δεδομένα της TOTTE 20701-1 [17]. Η θερμοκρασία ισορροπίας του κτιρίου θ_{bal} προέκυψε ίση με 15°C κατά τη χειμερινή περίοδο (μήνες Οκτώβριος έως Απρίλιος) και ίση με 22°C κατά τη θερινή περίοδο (μήνες Ιούνιος έως Σεπτέμβριος). Ο βαθμός απόδοσης του συστήματος θέρμανσης (λέβητας θερμού νερού) θεωρήθηκε ίσος με 0.85 και του συστήματος ψύξης (κλιματιστικές συσκευές) ίσος με 2.8.



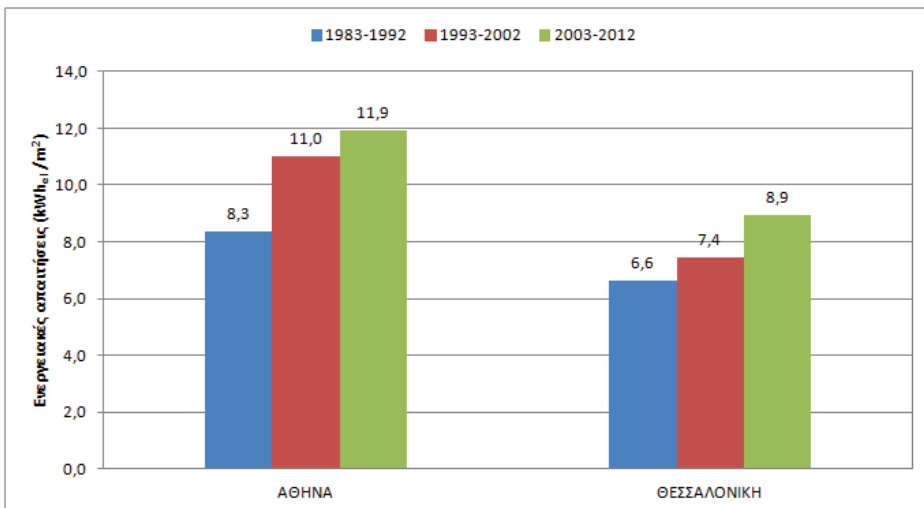
Εικόνα 7: Κάτοψη τυπικού ορόφου του κτιρίου της πολυκατοικίας

Οι ενεργειακοί υπολογισμοί έγιναν για όλους τους μήνες της χειμερινής και θερινής περιόδου για τις δύο πόλεις και υπολογίστηκαν οι ενεργειακές απαιτήσεις του κτιρίου για θέρμανση και

ψύξη σε kWh/m² κατοικήσιμης επιφάνειας, με θερμοκρασιακά δεδομένα των τριών 10ετιών (1983-1992, 1993-2002, 2003-2012). Στα διαγράμματα των εικόνων 8 και 9 παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τις δύο πόλεις και η σύγκριση των ενεργειακών απαιτήσεων.



Εικόνα 8: Ενεργειακές απαιτήσεις (KWh_{th}/m²) της πολυκατοικίας, κατά την περίοδο θέρμανσης, για Αθήνα και Θεσσαλονίκη, για τις δεκαετίες 1983-1992, 1993-2002 και 2003-2012



Εικόνα 9: Ενεργειακές απαιτήσεις (KWh_{el}/m²) της πολυκατοικίας, κατά την περίοδο ψύξης, για Αθήνα και Θεσσαλονίκη, για τις δεκαετίες 1983-1992, 1993-2002 και 2003-2012

Για την περίοδο θέρμανσης, κατά τη δεκαετία 1993-2002, παρατηρείται μείωση των ενεργειακών απαιτήσεων και για τις δύο πόλεις, σε σχέση με τη δεκαετία 1983-1992 όπως επίσης παρατηρείται μείωση κατά τη δεκαετία 2003-2012 σε σχέση με τη δεκαετία 1993-2002 (εικόνα 8). Τα ποσοστά μείωσης των ενεργειακών απαιτήσεων για θέρμανση για την δεκαετία 1993-2002 σε σχέση με τη δεκαετία 1983-1992, είναι 12.65% για την Αθήνα και 2.58% για τη Θεσσαλονίκη. Αντίστοιχα τα ποσοστά μείωσης για την δεκαετία 2003-2012 σε σχέση με τη δεκαετία 1993-2002 είναι 3.57% για την Αθήνα και 11.62% για τη Θεσσαλονίκη. Το συνολικό ποσοστό μείωσης των απαιτήσεων για θέρμανση στις δύο δεκαετίες είναι 15.77% και 13.92% αντίστοιχα για τις δύο πόλεις. Όσον αφορά τις απαιτήσεις για ψύξη, τα ποσοστά αύξησης για την δεκαετία 1993-2002 σε σχέση με τη δεκαετία 1983-1992 είναι 32.11% για την Αθήνα και 12.23% για τη Θεσσαλονίκη, ενώ τα αντίστοιχα ποσοστά αύξησης για την δεκαετία 2003-2012 σε σχέση με τη δεκαετία 1993-2002 είναι 8.19% για την Αθήνα και 20.39% για τη Θεσσαλονίκη. Το συνολικό ποσοστό αύξησης των απαιτήσεων για ψύξη είναι 42.94% και 35% αντίστοιχα για τις δύο πόλεις.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την εξέλιξη των βαθμομερών θέρμανσης και ψύξης από το έτος 1983 έως το έτος 2012, για τις δύο μεγαλύτερες πόλεις της Ελλάδας, την Αθήνα και τη Θεσσαλονίκη και από τη σύγκριση των τιμών τους ανάμεσα στις δεκαετίες 1983-1992, 1993-2002 και 2003-2012, σε διάφορες θερμοκρασίες βάσης, είναι εμφανής η μεταβολή της θερμοκρασίας του εξωτερικού περιβάλλοντος. Από τα διαγράμματα των εικόνων 1 έως 6 είναι φανερό η αύξηση των βαθμομερών ψύξης και η μείωση βαθμομερών θέρμανσης, τόσο για την Αθήνα όσο και για τη Θεσσαλονίκη.

Γενικά, πλην ελαχίστων εξαιρέσεων κυρίως κατά τη χειμερινή περίοδο, υπάρχει ομοιομορφία στην αύξηση ή τη μείωση των βαθμομερών για το ίδιο έτος και για τις δύο πόλεις. Δηλαδή, όταν επικρατεί δριμύς χειμώνας ή θερμό καλοκαίρι στη Θεσσαλονίκη, το ίδιο συμβαίνει και στην Αθήνα. Άρα οι κλιματικές συνθήκες είναι αντίστοιχες και για τις δύο πόλεις, ιδιαίτερα την περίοδο του θέρους.

Από τα αποτελέσματα του ενεργειακού υπολογισμού στο κτίριο και από τα διαγράμματα των εικόνων 8 και 9 προκύπτει ότι οι ενεργειακές απαιτήσεις για θέρμανση μειώνονται συνεχώς από δεκαετία σε δεκαετία, ενώ οι ενεργειακές απαιτήσεις για ψύξη αυξάνονται συνεχώς, τόσο για την πόλη της Αθήνας όσο και για την πόλη της Θεσσαλονίκης.

Από όλα τα παραπάνω αποτελέσματα, και δεδομένου ότι η περίοδος των 30 ετών μπορεί να θεωρηθεί αντιπροσωπευτική για την τάση αλλαγής του κλίματος, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι υπάρχει μία συνεχής αλλαγή που οδηγεί γενικότερα σε υψηλότερες θερμοκρασίες και ειδικότερα σε ηπιότερους χειμώνες και θερμότερα καλοκαίρια, αυξάνοντας τις απαιτήσεις σε ενέργεια για ψύξη και μειώνοντας τις απαιτήσεις θέρμανσης στα κτίρια, τόσο στην Αθήνα όσο και στη Θεσσαλονίκη.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Cartalis, C., Synodinou, A., Proedrou, M., Tsangrassoulis, A., and Santamouris, M., 2001, "Modifications in energy demand in urban areas as a result of climate changes: an assessment for the southeast Mediterranean region", *Energy Conversion and Management*, 42, pp. 1647-1656.
- [2] Christenson, M., Manz, H., and Gyalistas, D., 2006, "Climate warming impact on degree-days and building energy demand in Switzerland", *Energy Conversion and Management*, 47, pp. 671-686.
- [3] Papakostas, K., Mavromatis, T., and Kyriakis, N., 2010, "Impact of the ambient temperature rise on the energy consumption for heating and cooling in residential

- buildings of Greece”, *Renewable Energy*, 35(7), pp.1376–1379.
- [4] Papakostas, K. T., Michopoulos, A., Mavromatis, T., and Kyriakis, N., 2013, “Changes of temperature data for energy studies over time and their impact on energy consumption and CO2 emissions. The case of Athens and Thessaloniki – Greece”, *International J. of Energy and Environment*, 4(1), pp. 59-72.
- [5] Xu, P., Huang, Y. J., Miller, N., Schlegel, N., and Shen, P., 2012, “Impacts of climate on heating and cooling energy patterns in California”, *Energy*, 44, pp. 792–804
- [6] Zmeureanu, R., and Renaud, G., 2008, “Estimation of potential impact of climate change on the heating energy use of existing houses”, *Energy Policy*, 36, pp. 303-310.
- [7] ASHRAE, 1993, “Handbook of Fundamentals”, American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, USA.
- [8] Claridge, D., E., Bida, M., Krarti, M., Jeon, H., S., Hamzavi, E., Zwack, W., and Weiss, I., 1987, “A validation study of Variable-Base Degree-Day heating calculations”, *ASHRAE Transactions*, 93(2), pp.57-89, 1987.
- [9] Claridge, D., E., Krarti, M., and Bida, M., 1987, “A Validation study of Variable-Base Degree-Day cooling calculations”, *ASHRAE Transactions*, 93(2), pp.90-104.
- [10] Παπακώστας, Κ., Τ., 1999, “Εκτίμηση της κατανάλωσης ενέργειας για θέρμανση κατοικιών με τη μέθοδο βαθμοημερών μεταβλητής βάσης”, πρακ. 6ου Εθνικού Συνεδρίου για τις Ήπιες Μορφές Ενέργειας του ΙΗΤ, τόμος Α, Βόλος.
- [11] Μπιλαδέλης, Δ., 2007, “Υπολογισμός θερμοκρασιακών δεδομένων Αθήνας και Θεσσαλονίκης για ενεργειακές μελέτες - Χρονική περίοδος 1993 – 2002”, Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχ., ΑΠΘ.
- [12] Αχμέτ, Μ., 2010, “Θερμοκρασιακά δεδομένα Αθήνας και Θεσσαλονίκης για ενεργειακές μελέτες – περίοδος 1983-2008 – Σύγκριση Ενεργειακών απαιτήσεων για θέρμανση και ψύξη μακρών χρονικών περιόδων”, Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχ. Μηχ., ΑΠΘ.
- [13] 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 3 δεκαετίες”, Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχ., ΑΠΘ.
- [14] National Observatory of Athens, 1983÷2012, “Climatological Bulletin”, NOA, Institute of Meteorology and Physics of the Atmospheric Environment.
- [15] Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Γεωλογίας, Τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, Ωριαίες μετρήσεις της θερμοκρασίας, 1983-2012, ΑΠΘ.
- [16] OrtizBeviá, M., J., Sánchez-López, G., Alvarez-Garcia F., J., and RuizdeElvira, A., 2012, “Evolution of heating and cooling degree-days in Spain: Trends and interannual variability”, *Global and Planetary Change*, 92-93, pp. 236-247.
- [17] Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2010, 2012, “Αναλυτικές Εθνικές Προδιαγραφές Παραμέτρων για τον υπολογισμό της Ενεργειακής Απόδοσης Κτηρίων και την έκδοση του Πιστοποιητικού της Ενεργειακής Απόδοσης”, ΥΠΕΚΑ, ΤΕΕ, Αθήνα.

ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΗΣ ΔΙΑΘΕΣΙΜΗΣ ΗΜΕΡΗΣΙΑΣ ΟΛΙΚΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΤΟ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΙΣΤΟΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΗΤΗΣ ΝΟΗΜΟΣΥΝΗΣ

Κ. Π. Μουστρής^{1*}, Κ. Α. Καβαδιάς², Δ. Ζαφειράκης², Ι. Κ. Καδέλλης²,
Α. Γ. Παλιατσός³

¹Εργαστήριο Μηχανικής Ρευστών, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, ΤΕΙ Πειραιά, Π. Ράλλη & Θηβών 250, 12244 Αιγάλεω, e-mail: kmoustris@teipir.gr

²Εργαστήριο Ήπιων Μορφών Ενέργειας & Προστασίας του Περιβάλλοντος, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, ΤΕΙ Πειραιά, Π. Ράλλη & Θηβών 250, 12244 Αιγάλεω

³Εργαστήριο Τεχνολογίας Περιβάλλοντος, Τμήμα Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστικών Συστημάτων, ΤΕΙ Πειραιά, Π. Ράλλη & Θηβών 250, 12244 Αιγάλεω

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σε κάθε ενεργειακή εφαρμογή, παθητικά ηλιακά συστήματα, ενεργειακά ηλιακά συστήματα και φωτοβολταϊκά ηλιακά συστήματα, η γνώση της διαθέσιμης ηλιακής ακτινοβολίας είναι η σημαντικότερη παράμετρος για το σωστό σχεδιασμό, την υλοποίηση και την απόδοση του σχεδιαζόμενου ενεργειακού συστήματος. Στην εργασία αυτή, γίνεται μια προσπάθεια πρόβλεψης της διαθέσιμης ημερήσιας ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο, για το επόμενο 24ωρο, σε δύο διαφορετικές περιοχές εντός της ευρύτερης περιοχής Αθηνών (ΕΠΑ). Η πρόγνωση αυτή βασίζεται στη χρήση ιστορικών μετεωρολογικών δεδομένων κάθε περιοχής και στην ανάπτυξη ενός προγνωστικού μοντέλου με την εφαρμογή τεχνητών νευρωνικών δικτύων (ΤΝΔ).

Συγκεκριμένα, για τις περιοχές Άγιος Κοσμάς (υψόμετρο 6m) και Πεντέλη (υψόμετρο 729m) χρησιμοποιούνται ωριαίες τιμές της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο, της θερμοκρασίας του αέρα, της σχετικής υγρασίας και της ηλιοφάνειας, που καλύπτουν τη χρονική περίοδο 2006-2011. Τα δεδομένα αυτά έχουν καταγραφεί από το Υδρολογικό Παρατηρητήριο Αθηνών που λειτουργεί υπό την αιγίδα του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Δημιουργούνται κατάλληλα αρχεία ιστορικών μετεωρολογικών δεδομένων για τις δύο περιοχές και στη συνέχεια «εκπαιδεύονται» ΤΝΔ που προβλέπουν για το επόμενο 24ωρο τη διαθέσιμη ημερήσια ολική ακτινοβολία.

Τα προγνωστικά μοντέλα που δημιουργήθηκαν ανήκουν στην κατηγορία των ΤΝΔ πολυστρωματικής αντίληψης-νόησης. Αρχικά καταρτίζονται-εκπαιδεύονται με τη χρήση ιστορικών μετεωρολογικών δεδομένων των δύο περιοχών που καλύπτουν την 5-ετή χρονική περίοδο 2006-2010. Στη συνέχεια, καλούνται να προβλέψουν, 24 ώρες μπροστά, τη διαθέσιμη ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία στις δύο περιοχές για το έτος 2011, τα δεδομένα του οποίου είναι εντελώς άγνωστα κατά τη φάση κατάρτισης-εκπαίδευσης του ΤΝΔ. Για τη σύγκριση των προβλεπόμενων τιμών ηλιακής ακτινοβολίας με τις αντίστοιχες παρατηρούμενες τιμές του έτους 2011, στις δύο υπό εξέταση περιοχές και την αξιολόγηση της προγνωστικής ικανότητας των προτεινόμενων μοντέλων πρόβλεψης, χρησιμοποιούνται κατάλληλοι στατιστικοί δείκτες αξιολόγησης. Τα αποτελέσματα της αξιολόγησης έδειξαν ότι τα ΤΝΔ εμφανίζουν μια αρκετά αξιόπιστη προγνωστική ικανότητα για το επόμενο 24ωρο, της διαθέσιμης ημερήσιας ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο, σε επίπεδα στατιστικής σημαντικότητας $p < 0.01$.

Λέξεις κλειδιά: Πρόγνωση, ακτινοβολία, τεχνητά νευρωνικά δίκτυα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ηλιακή ενέργεια είναι μια «καθαρή» ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, η οποία έχει ένα τεράστιο δυναμικό, ικανό για την κάλυψη μεγάλου μέρους των ενεργειακών αναγκών [1]. Η ολική ηλιακή ακτινοβολία θεωρείται ως η πιο σημαντική παράμετρος στη Μετεωρολογία, στις μετατροπές της ηλιακής ακτινοβολίας σε άλλες μορφές ενέργειας, καθώς επίσης και στις εφαρμογές των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ιδιαίτερα για τη διαστασιολόγηση φωτοβολταϊκών (Φ/Β) συστημάτων [2]. Η παγκόσμια οικονομική ύφεση και οι συνεχώς αυξανόμενες ανάγκες της ενέργειας, καθιστούν την ηλιακή ακτινοβολία ως μια σημαντική πηγή ενέργειας. Κατά τη διάρκεια των επόμενων δεκαετιών, αναμένεται μεγάλη αύξηση των επενδύσεων στον τομέα της ηλιακής ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο.

Η ακριβής πρόβλεψη της ηλιακής ακτινοβολίας είναι απαραίτητη για την αποτελεσματική λειτουργία των ηλιακών θερμικών σταθμών παραγωγής ενέργειας, τις αγορές ενέργειας και τις εκτεταμένες εφαρμογές της Φ/Β τεχνολογίας [3]. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών, είναι συνεχώς αυξανόμενος ο αριθμός επιστημόνων ανά τον κόσμο που αναπτύσσουν και προτείνουν διάφορα μοντέλα πρόβλεψης της ηλιακής ακτινοβολίας. Κατά τα τελευταία χρόνια, οι ευφυείς τεχνικές (ΤΝΔ, ασαφής λογική και υβριδικά νευρωνικά δίκτυα) χρησιμοποιούνται ευρέως για την επίλυση πραγματικών προβλημάτων στις περιπτώσεις όπου οι κλασσικές μέθοδοι είναι ανεπαρκείς. Η πρόβλεψη της ηλιακής ακτινοβολίας είναι ένας από τους τομείς όπου χρησιμοποιήθηκαν με επιτυχία οι ευφυείς τεχνικές και ιδιαίτερα τα ΤΝΔ [2].

Πιο συγκεκριμένα, οι Amgrouche και Le Pivert [4] ανέπτυξαν ένα μοντέλο για να προβλέψουν την ημερήσια ολική ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο. Το μοντέλο τους βασίστηκε σε ένα συνδυασμό της χωρικής μοντελοποίησης και των ΤΝΔ. Η προτεινόμενη μεθοδολογία δοκιμάστηκε σε δύο διαφορετικές τοποθεσίες στη Γαλλία. Οι προβλέψεις του μοντέλου συγκρίθηκαν με πραγματικά στοιχεία μετρήσεων για τις δύο θέσεις και τα αποτελέσματα της αξιολόγησης έδειξαν ότι η προτεινόμενη μεθοδολογία που παρουσιάζεται σε αυτή τη μελέτη μπορεί να εκτιμήσει την ημερήσια ολική ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντια επιφάνεια με ικανοποιητική ακρίβεια.

Οι Mubiru και Banda [5] ανέπτυξαν ένα μοντέλο πρόβλεψης με τη χρήση ΤΝΔ, προκειμένου να εκτιμηθεί η μέση ημερήσια ολική ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο για διαφορετικές τοποθεσίες στην Ουγκάντα, σε μηνιαία βάση. Το προτεινόμενο μοντέλο βασίστηκε σε μετεωρολογικά δεδομένα, όπως η διάρκεια της ηλιοφάνειας, η μέγιστη θερμοκρασία, η νεφοκάλυψη, καθώς επίσης και σε γεωγραφικές παραμέτρους (γεωγραφικό πλάτος, γεωγραφικό μήκος και υψόμετρο). Τα αποτελέσματα έδειξαν μια καλή συμφωνία μεταξύ των εκτιμώμενων και των μετρούμενων τιμών των μέσων μηνιαίων τιμών της ημερήσιας ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο.

Ο Fadare [6] σε μελέτη του, ανέπτυξε και πρότεινε ένα μοντέλο ΤΝΔ για την πρόβλεψη του ηλιακού ενεργειακού δυναμικού στη Νιγηρία. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκαν γεωγραφικά και μετεωρολογικά δεδομένα από 195 πόλεις στη Νιγηρία για μια περίοδο 10 ετών (1983-1993). Τα δεδομένα αυτά είχαν καταγραφεί από τη γεω-δορυφορική βάση δεδομένων της NASA και χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση και τον έλεγχο αξιοπιστίας του προτεινόμενου μοντέλου ΤΝΔ. Παράμετροι όπως το γεωγραφικό πλάτος, το γεωγραφικό μήκος, το υψόμετρο, ο μήνας του έτους, η μέση διάρκεια ηλιοφάνειας, η μέση θερμοκρασία και η σχετική υγρασία χρησιμοποιήθηκαν ως είσοδοι στο ΤΝΔ κατά τη φάση της κατάρτισής του, ενώ η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας ορίστηκε ως η έξοδος-τιμή στόχος του ΤΝΔ. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι συντελεστές συσχέτισης μεταξύ των προβλέψεων του προτεινόμενου ΤΝΔ και των πραγματικών μέσων μηνιαίων τιμών της έντασης της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας, τόσο στη φάση της εκπαίδευσης, όσο και στη φάση της αξιολόγησης, ήταν υψηλότερα από το 90%, γεγονός που υποδηλώνει μια υψηλή αξιοπιστία του μοντέλου για την εκτίμηση της ηλιακής ακτινοβολίας σε τοποθεσίες όπου είναι δεν είναι διαθέσιμα δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας.

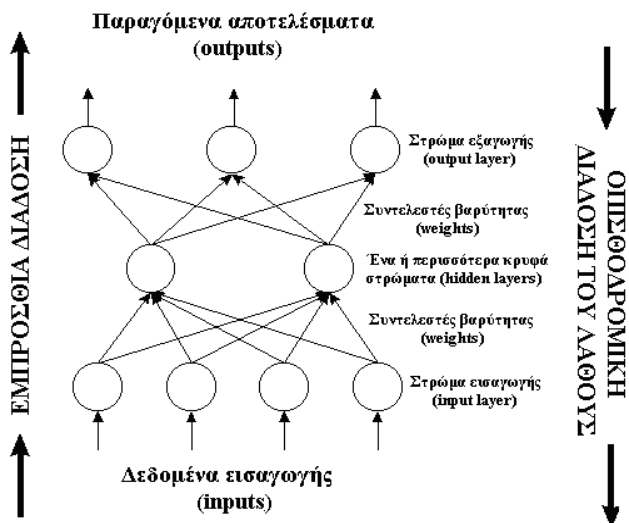
Τέλος, πολλές ακόμα μελέτες σε όλο τον κόσμο προτείνουν τεχνικές μοντελοποίησης με τη χρήση των ΤΝΔ στην πρόβλεψη της ηλιακής ακτινοβολίας σε ωριαία, ημερήσια, μηνιαία ή και σε ετήσια βάση [7-11].

Σε αυτή την εργασία, προτείνεται ένας συνδυασμός από δύο διαφορετικά μοντέλα ΤΝΔ για την πρόβλεψη της διάρκειας της ημερήσιας ηλιοφάνειας και της ολικής ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο, για την επόμενη ημέρα.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Τα ΤΝΔ είναι ένας κλάδος της τεχνητής νοημοσύνης που αναπτύχθηκε στη δεκαετία του 1950 με σκοπό να μιμηθεί τη βιολογική αρχιτεκτονική του ανθρώπινου εγκεφάλου. Είναι μια προσέγγιση για την περιγραφή της λειτουργίας του ανθρώπινου νευρικού συστήματος μέσω μαθηματικών συναρτήσεων. Τυπικά ΤΝΔ χρησιμοποιούν πολύ απλά μοντέλα των νευρώνων. Αυτά τα τεχνητά μοντέλα-νευρώνες διατηρούν μόνο πολύ αδρά χαρακτηριστικά των βιολογικών νευρώνων του ανθρώπινου εγκεφάλου [12]. Ουσιαστικά, τα ΤΝΔ είναι παράλληλα καταμεμημένα συστήματα και είναι κατασκευασμένα από πολλά διασυνδεδεμένα μεταξύ τους μη γραμμικά στοιχεία επεξεργασίας, που ονομάζονται τεχνητοί νευρώνες [13]. Το επιστημονικό ενδιαφέρον γύρω από τη λειτουργία και τις εφαρμογές των ΤΝΔ έχει αυξηθεί εκθετικά στη διάρκεια των τελευταίων ετών, κυρίως λόγω της διαθεσιμότητας των κατάλληλων ηλεκτρονικών υπολογιστικών συστημάτων που έχουν ως αποτέλεσμα τη γρήγορη ανάλυση των δεδομένων και την επεξεργασία των πληροφοριών. Κατά τις δύο τελευταίες δεκαετίες όλο και περισσότεροι επιστήμονες σε όλο τον κόσμο εφαρμόζουν μοντέλα ΤΝΔ σε πολλά και διαφορετικά επιστημονικά πεδία [14].

Στην παρούσα εργασία, ένα ειδικό είδος ΤΝΔ, γνωστό ως ΤΝΔ πολυστρωματικής αντίληψης-νόησης, εφαρμόζεται για να προβλέψει την ολική ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία (ΟΗΗΑ) στο οριζόντιο επίπεδο [13]. Η Εικόνα 1 παρουσιάζει τη δομή ενός μοντέλου ΤΝΔ πολυστρωματικής αντίληψης-νόησης.



Εικόνα 1: Αρχιτεκτονική δομή ΤΝΔ πολυστρωματικής αντίληψης-νόησης

Το ΤΝΔ πολυστρωματικής αντίληψης-νόησης είναι ένα από τα συνηθέστερα είδη των ΤΝΔ. Η δομή του αποτελείται από στοιχεία επεξεργασίας και διασυνδέσεις. Τα στοιχεία επεξεργασίας, τα οποία ονομάζονται και τεχνητοί νευρώνες, είναι τοποθετημένα σε στρώματα. Το πρώτο στρώμα είναι το στρώμα εισόδου. Το στρώμα εισόδου ακολουθείται από ένα ή περισσότερα κρυφά στρώματα και το τελικό στρώμα είναι το στρώμα εξόδου. Το στρώμα εισόδου χρησιμεύει ως ένα ρυθμιστικό επίπεδο που διανέμει τα σήματα εισόδου προς το επόμενο στρώμα, το οποίο είναι ένα κρυφό στρώμα. Κάθε νευρώνας του κρυφού στρώματος επικοινωνεί με όλους τους νευρώνες του επόμενου κρυφού στρώματος, αν αυτό υπάρχει. Σε κάθε σύνδεση μεταξύ των τεχνητών νευρώνων των στρωμάτων αντιστοιχεί ένας τυπικός συντελεστής βαρύτητας. Έτσι, κάθε τεχνητός νευρώνας στο κρυφό στρώμα αθροίζει τις εισόδους του, επεξεργάζεται το άθροισμα αυτό μέσω μιας συνάρτησης μεταφοράς ή αλλιώς συνάρτηση ενεργοποίησης και διανέμει το αποτέλεσμα στο στρώμα εξόδου [13]. Εκεί, το παραγόμενο αποτέλεσμα συγκρίνεται με την τιμή στόχο και υπολογίζεται το σφάλμα. Αν το σφάλμα είναι μεγαλύτερο από ένα επιθυμητό όριο, η τιμή του συντελεστή βαρύτητας αλλάζει και όλη η διαδικασία μεταφέρεται προς τα πίσω, έτσι ώστε να ακολουθηθεί η αρχική πορεία και να παραχθεί ένα νέο αποτέλεσμα. Όταν το σφάλμα είναι μικρότερο από το επιθυμητό όριο, παγώνουν οι τιμές των συντελεστών βαρύτητας και το ΤΝΔ είναι σε θέση πλέον να παράγει νέα αποτελέσματα-προβλέψεις.

Ο κύριος στόχος αυτής της εργασίας είναι η πρόβλεψη της ΟΗΗΑ στο οριζόντιο επίπεδο, το επόμενο 24ωρο, σε δύο διαφορετικές θέσεις εντός της ΕΠΑ, με την εφαρμογή των ΤΝΔ. Οι δύο επιλεγμένες θέσεις είναι ο Άγιος Κοσμάς (νότια παράκτια περιοχή της ΕΠΑ) και η Πεντέλη (βόρεια ορεινή περιοχή της ΕΠΑ). Τα χαρακτηριστικά των δύο εξεταζόμενων θέσεων παρουσιάζονται στον Πίνακα 1, καθώς επίσης και στην Εικόνα 2.

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά στοιχεία των δύο εξεταζόμενων θέσεων εντός της ΕΠΑ				
Τοποθεσία	Συντομογραφία	Γεωγραφικό μήκος	Γεωγραφικό πλάτος	Υψόμετρο πάνω από τη στάθμη της θάλασσας (m)
Άγιος Κοσμάς	ΑΓΚ	37° 53' 34''	23° 43' 05''	6
Πεντέλη	ΠΕΝ	38° 04' 14''	23° 52' 38''	729

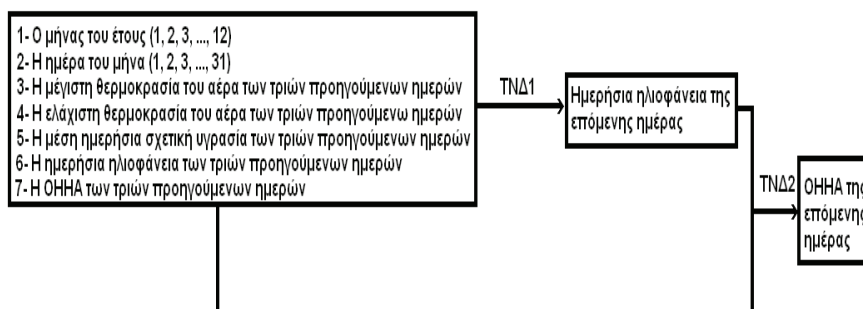


Εικόνα 2: Χάρτης της ΕΠΑ με τις δύο εξεταζόμενες θέσεις καταγραφής της ΟΗΗΑ

Τα δεδομένα που έχουν χρησιμοποιηθεί, αφορούν ωριαίες τιμές της θερμοκρασίας του αέρα, της σχετικής υγρασίας, της ηλιοφάνειας και της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο. Τα δεδομένα αυτά καλύπτουν τη χρονική περίοδο της εξαετίας 2006-2011 και έχουν καταγραφεί από το δίκτυο μετεωρολογικών σταθμών του Υδρολογικού Παρατηρητήριου της Αθήνας (ΥΠΑ), που ανήκει στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ). Η πληρότητα των δεδομένων, κατά τη διάρκεια της περιόδου των έξι ετών, είναι περίπου 91,4% στην περίπτωση του ΑΓΚ και 99,1% στην περίπτωση της ΠΕΝ, αντίστοιχα.

Αρχικά, υπολογίστηκαν οι μέγιστες και ελάχιστες ημερήσιες τιμές της θερμοκρασίας του αέρα και η μέση ημερήσια τιμή της σχετικής υγρασίας. Στη συνέχεια υπολογίστηκε η ημερήσια διάρκεια της ηλιοφάνειας σε ώρες, καθώς επίσης και η ΟΗΗΑ και για τις δύο εξεταζόμενες θέσεις εντός της ΕΠΑ, κατά τη διάρκεια της εξαετούς περιόδου 2006-2011. Τα δεδομένα που προέκυψαν, χωρίστηκαν σε δύο διαφορετικά υποσύνολα δεδομένων. Η πρώτη υποομάδα δεδομένων περιλαμβάνει στοιχεία που καλύπτουν την πενταετή περίοδο 2006-2010 και χρησιμοποιήθηκε για την κατάρτιση των προτεινόμενων μοντέλων ΤΝΔ. Το δεύτερο υποσύνολο, περιέχει δεδομένα του έτους 2011. Τα δεδομένα αυτά ήταν εντελώς άγνωστα στη φάση εκπαίδευσης των δύο ΤΝΔ και χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση της προγνωστικής ικανότητας των ανεπτυγμένων μοντέλων ΤΝΔ.

Δύο διαφορετικά μοντέλα ΤΝΔ δημιουργήθηκαν για κάθε μία από τις δύο περιοχές που εξετάστηκαν. Το πρώτο μοντέλο ΤΝΔ (ΤΝΔ1) μετά από την κατάλληλη εκπαίδευση είναι σε θέση να προβλέψει τη διάρκεια της ηλιοφάνειας (σε ώρες) της επόμενης ημέρας, χρησιμοποιώντας ως εισόδους το μήνα του έτους (1, 2, ..., 12), την ημέρα του μήνα (1, 2, ..., 31), τη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή της θερμοκρασίας του αέρα στη διάρκεια του 24ωρου, τη μέση ημερήσια τιμή της σχετικής υγρασίας του αέρα, την ημερήσια διάρκεια της ηλιοφάνειας και την ΟΗΗΑ, των τριών προηγούμενων ημερών. Στη συνέχεια, η προβλεπόμενη ημερήσια τιμή της ηλιοφάνειας της επόμενης ημέρας, όπως αυτή έχει προβλεφθεί από το ΤΝΔ1, χρησιμοποιείται μαζί με τα προαναφερθέντα στοιχεία των τριών προηγούμενων ημερών, ως νέα δεδομένα εισόδου για την εκπαίδευση του ΤΝΔ2, προκειμένου αυτό να προβλέψει την ΟΗΗΑ το επόμενο 24ωρο. Η Εικόνα 3 δείχνει τη δομή (δεδομένα εισόδου και τιμή στόχος-έξοδος) του ΤΝΔ1 και του ΤΝΔ2, αντίστοιχα. Και τα δύο μοντέλα ΤΝΔ που αναπτύχθηκαν, έχουν ένα στρώμα εισόδου με 17 δεδομένα εισόδου (ΤΝΔ1) και 18 δεδομένα εισόδου (ΤΝΔ2) αντίστοιχα. Έχουν επίσης, ένα κρυφό στρώμα με 9 κρυφούς τεχνητούς νευρώνες (ΤΝΔ1) και 7 κρυφούς τεχνητούς νευρώνες (ΤΝΔ2), αντίστοιχα. Τέλος, τα ανεπτυγμένα ΤΝΔ1 και ΤΝΔ2, έχουν ένα στρώμα εξόδου με ένα τεχνητό νευρώνα που αντιπροσωπεύει την τιμή στόχο-έξοδο δηλαδή την ημερήσια τιμή ηλιοφάνειας της επόμενης ημέρας (ΤΝΔ1) σε ώρες και την ΟΗΗΑ (ΤΝΔ2) σε Wh/m². Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονιστεί ότι για την εύρεση της κατάλληλης δομής των δύο ΤΝΔ, ακολουθήθηκε η μεθοδολογία της δοκιμής και του λάθους. Συγκεκριμένα, πολλές και διαφορετικές δομές εξετάστηκαν και καταλήξαμε στην πιο πάνω δομή που έδωσε και τα καλύτερα συγκριτικά αποτελέσματα.



Εικόνα 3: Δεδομένα εισόδου και εξόδου των ανεπτυγμένων ΤΝΔ1 και ΤΝΔ2

Για την αξιολόγηση της προγνωστικής ικανότητας των δύο προτεινόμενων ΤΝΔ, χρησιμοποιήθηκαν κατάλληλοι στατιστικοί δείκτες αξιοπιστίας. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε το μέσο λάθος προκατάληψης-εμμονής (Mean Bias Error-MBE), το λάθος μέσης τετραγωνικής τιμής (Root Mean Square Error-RMSE), ο συντελεστής προσδιορισμού (coefficient of determination- R^2) και τέλος, ο δείκτης συμφωνίας (Index of Agreement-IA) [15].

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται οι τιμές των δεικτών στατιστικής αξιολόγησης για την πρόβλεψη της ΟΗΗΑ του έτους 2011 για τις δύο εξεταζόμενες θέσεις, ΑΓΚ και ΠΕΝ.

Πίνακας 2: Τιμές στατιστικών δεικτών αξιολόγησης της πρόβλεψης της ΟΗΗΑ το επόμενο 24ωρο, στη διάρκεια του έτους 2011				
Τοποθεσία	MBE (Wh/m ²)	RMSE (Wh/m ²)	R ²	IA
ΑΓΚ	+0.3	1160.5	0.772	0.935
ΠΕΝ	-10.8	530.4	0.959	0.989

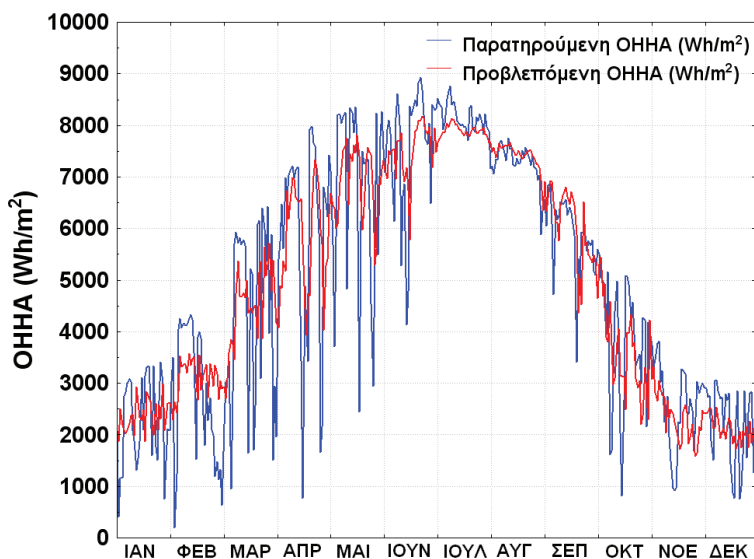
Σύμφωνα με τις τιμές του Πίνακα 2, φαίνεται ότι και στις δύο εξεταζόμενες περιοχές το προτεινόμενο μοντέλο πρόγνωσης της ΟΗΗΑ το επόμενο 24ωρο, παρουσιάζει μια ικανοποιητική ικανότητα πρόγνωσης. Ειδικότερα, για την περιοχή ΑΓΚ το μέσο λάθος προκατάληψης είναι ίσο με +0.3 Wh/m² και για την περιοχή ΠΕΝ είναι ίσο με +10.8 Wh/m². Παρατηρείται ότι και στις δύο περιπτώσεις το μοντέλο κατά μέσο όρο υπερεκτιμά την ΟΗΗΑ της επομένης ημέρας. Όμως, η υπερεκτίμηση αυτή είναι αρκετά μικρή συγκρινόμενη με τη μέση τιμή του προβλεπόμενου μεγέθους, δηλαδή της ΟΗΗΑ, που είναι περίπου της τάξης των 4980 Wh/m². Αντίστοιχα, ο συντελεστής προσδιορισμού είναι ίσος με 0.772 για την περιοχή ΑΓΚ και με 0.959 για την περιοχή ΠΕΝ. Αυτό σημαίνει ότι στην περίπτωση της θέσης ΑΓΚ το μοντέλο μπορεί να ερμηνεύσει το 77.2% της διακύμανσης της ΟΗΗΑ, ενώ στη θέση ΠΕΝ μπορεί να ερμηνεύσει το 95.9%. Τέλος, ο δείκτης συμφωνίας είναι για την περιοχή ΑΓΚ ίσος με 0.935, ενώ για την περιοχή ΠΕΝ είναι ίσος με 0.989. Δεδομένου ότι όσο πιο κοντά στην μονάδα είναι ο δείκτης συμφωνίας ΙΑ, τόσο πιο κοντά στις πραγματικές τιμές είναι οι προβλεπόμενες από το μοντέλο τιμές, φαίνεται ότι και στις δύο περιπτώσεις, το μοντέλο προσεγγίζει αρκετά ικανοποιητικά την πραγματικότητα.

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, γίνεται άμεσα κατανοητό ότι το προτεινόμενο μοντέλο ΤΝΔ για την πρόγνωση της ΟΗΗΑ το επόμενο 24ωρο, παρουσιάζει μια στατιστικά σημαντική προγνωστική ικανότητα.

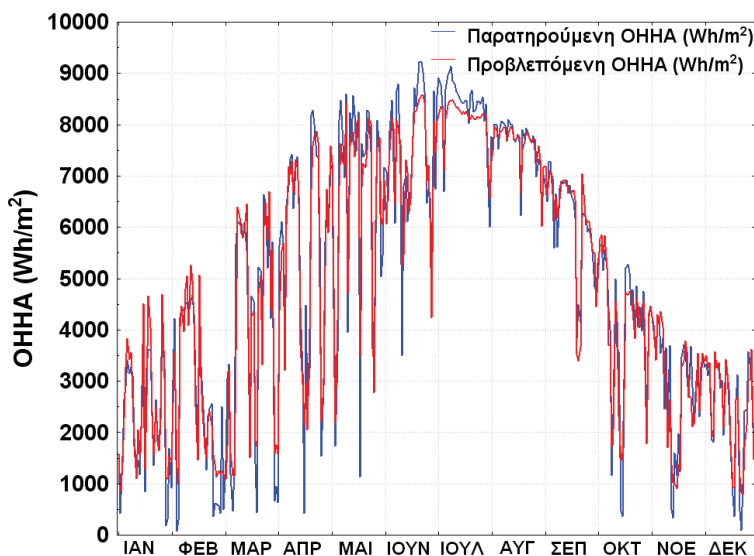
Στην Εικόνα 4, παρουσιάζονται οι χρονοσειρές πρόγνωσης της ΟΗΗΑ σε σχέση με τις παρατηρούμενες, για το έτος 2011, τόσο για την περιοχή ΑΓΚ (α), όσο και για την περιοχή ΠΕΝ (β).

Συμπερασματικά, με βάση τον Πίνακα 2 αλλά και την οπτική απόδοση της πρόγνωσης της ΟΗΗΑ το επόμενο 24ωρο (Εικόνα 4), είναι φανερό ότι η προτεινόμενη μεθοδολογία μπορεί να δώσει αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα πρόγνωσης της ΟΗΗΑ, ένα 24ωρο πριν. Φαίνεται δε ότι η πρόγνωση είναι αρκετά καλύτερη στη θέση ΠΕΝ σε σχέση με την αντίστοιχη στη θέση ΑΓΚ. Αυτό μπορεί να οφείλεται κατά βάση στην πληρότητα των χρονοσειρών που χρησιμοποιήθηκαν που για την θέση ΑΓΚ είναι 91.4%, ενώ για τη θέση ΠΕΝ εμφανίζει καλύτερα ποσοστά πρόγνωσης είναι 99.1%. Άλλη πιθανή αιτία είναι η ποιότητα των δεδομένων της ηλιακής ακτινοβολίας στη θέση ΑΓΚ λόγω της άμεσης γειννίας (περίπου 10m) με τη θάλασσα. Πιθανώς, η παρουσία της θάλασσας να μειώνει την ποιότητα των καταγεγραμμένων τιμών της ΟΗΗΑ, λόγω υψηλής σχετικής υγρασίας,

αλατότητας και άλλων παραγόντων που επηρεάζουν τη λήψη ορθών μετρήσεων της ηλιακής ακτινοβολίας από τα σχετικά όργανα μέτρησης.



(α)



(β)

Εικόνα 4: Προβλεπόμενη έναντι παρατηρούμενης ΟΗΗΑ στις θέσεις ΑΓΚ (α) και ΠΕΝ (β), στη διάρκεια του έτους 2011

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο κύριος στόχος αυτής της εργασίας είναι η πρόβλεψη της ημερήσιας ολικής ηλιακής ακτινοβολίας (αθροίσματος άμεσης και διάχυτης) σε οριζόντια επιφάνεια, το επόμενο 24ωρο, σε δύο διαφορετικές θέσεις εντός της ευρύτερης περιοχής της Αθήνας, χρησιμοποιώντας ΤΝΔ. Για την κατάλληλη εκπαίδευση των ΤΝΔ, χρησιμοποιήθηκαν ιστορικά-παρελθοντικά μετεωρολογικά δεδομένα από δύο διαφορετικές τοποθεσίες εντός της ΕΠΑ, που καλύπτουν χρονική περίοδο έξι ετών, 2006-2011.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα προτεινόμενα μοντέλα ΤΝΔ παρουσιάζουν μια αξιοσημείωτη ικανότητα πρόγνωσης, προκειμένου να προβλέψουν την ΟΗΗΑ της επόμενης ημέρας. Συγκεκριμένα, ο συντελεστής προσδιορισμού είναι πολύ κοντά στη μονάδα και στις δύο εξεταζόμενες θέσεις. Αυτό υποδεικνύει ότι υπάρχει μια σημαντική γραμμική συσχέτιση μεταξύ των παρατηρούμενων και των προβλεπόμενων από το μοντέλο τιμών της ΟΗΗΑ. Επίσης, οι τιμές του δείκτη συμφωνίας είναι 0.935 και 0.989, αντίστοιχα, τιμές που βρίσκονται πολύ κοντά στη μονάδα. Αυτό δείχνει ότι οι τιμές της παρατηρούμενης ΟΗΗΑ βρίσκονται πολύ κοντά σε σχέση με τις αντίστοιχες προβλεπόμενες τιμές από το προγνωστικό μοντέλο που αναπτύχθηκε.

Επιπλέον, είναι προφανές ότι η πρόβλεψη στην περίπτωση της θέσης ΠΕΝ είναι πολύ πιο αξιόπιστη σε σύγκριση με την αντίστοιχη πρόβλεψη στη θέση ΑΓΚ. Αυτό ίσως οφείλεται στο γεγονός της πληρότητας και εγκυρότητας των χρησιμοποιούμενων δεδομένων. Η πληρότητα των δεδομένων είναι περίπου 91.4% για τη θέση ΑΓΚ και 99.1% για τη θέση ΠΕΝ. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι σε κάθε περίπτωση, η πληρότητα και η εγκυρότητα των δεδομένων είναι πολύ κρίσιμα στοιχεία για την κατάλληλη εκπαίδευση των μοντέλων ΤΝΔ. Όσο μεγαλύτερη είναι η πληρότητα και καλύτερη η ποιότητα των δεδομένων εκπαίδευσης των ΤΝΔ, τόσο καλύτερη και πιο αξιόπιστη είναι η πρόβλεψη από αυτά.

Τέλος, είναι απαραίτητη περαιτέρω έρευνα προκειμένου να αυξηθεί η ικανότητα πρόβλεψης της προτεινόμενης μεθοδολογίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Yadav, A.K., Malik, H., Chandel, S.S., 2014, "Selection of most relevant input parameter using WEKA for artificial neural network based solar radiation prediction models," *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 31, pp. 509-519.
- [2] Yacef, R., Benghanem, M., Mellit, A., 2012, "Prediction of daily global solar irradiation data using Bayesian neural network: A comparative study," *Renew. Energ.*, 48, pp. 146-154.
- [3] Mathiesen, P., Kleissl, J., 2011, "Evaluation of numerical weather prediction for intra-day solar forecasting in the continental United States," *Sol. Energy*, 85(5), pp. 967-977.
- [4] Amrouche, B., Le Pivert, X., 2014, "Artificial neural network based daily local forecasting for global solar radiation," *Appl. Energ.*, 130, pp. 333-341.
- [5] Mubiru, J., Banda, E.J.K.B., 2007, "Estimation of monthly average daily global solar irradiation using artificial neural networks," *Sol. Energy*, 82, pp. 181-187.
- [6] Fadare, D.A., 2009, "Modelling of solar energy potential in Nigeria using an artificial neural network model," *Appl. Energ.*, 86, pp. 1410-1422.
- [7] Mellit, A., Benghanem, M., Kalogirou, S.A., 2005, "An adaptive wavelet-network model for forecasting daily total solar-radiation," *Appl. Energ.*, 83(7), pp. 705-722.
- [8] Jiang, Y., 2008, "Prediction of monthly mean daily diffuse solar radiation using artificial neural networks and comparison with other empirical models," *Energ. Policy*, 36(10), pp. 3833-3837.

- [9] Sözena, A., Arcaklioğlu, E., Özalp, M., Çağlar, N., 2004, "Forecasting based on neural network approach of solar potential in Turkey," *Renew. Energ.*, vol. 30(7), pp. 1075-1090.
- [10] Bosch, J.L., López, G., Battle, F.J., 2007, "Daily solar irradiation estimation over a mountainous area using artificial neural networks," *Renew. Energ.*, 33(7), pp. 1622-1628.
- [11] Moustris, K., Paliatsos, A.G., Bloutsos, A., Nikolaidis, K., Koronaki, I., and Kavadias, K., 2008, "Use of neural networks for the creation of hourly global and diffuse solar irradiance data at representative locations in Greece," *Renew. Energ.*, 33, pp. 928-932.
- [12] McCulloch, W.S. and Pitts, W., 1943, "A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity," *The Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5(4), pp. 115–133.
- [13] Hect-Nielsen, R. 1991, *Neurocomputing*, Addison-Wesley, Reading, Mass, USA.
- [14] Viotti, P., Liuti, G. and Di Genova, P., 2002, "Atmospheric urban pollution: applications of an Artificial Neural Network (ANN) to the city of Perugia," *Ecol. Model.*, 148(1), pp. 27–46.
- [15] Nastos, P.T., Moustris, K.P., Larissi, I.K. and Paliatsos, A.G., 2013, "Rain intensity forecast using Artificial Neural Networks in Athens, Greece," *Atmos. Res.*, 119, pp. 153-160.

ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΑ, ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΤΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΣΤΟΝ ΕΛΛΑΔΙΚΟ ΧΩΡΟ

Καζαντζίδης Ανδρέας^{1*}, Αθανάσιος Ζάγουρας², Αλκιβιάδης Μπάης³, Ευτέρπη Νικητίδου¹, Βασίλειος Σαλαμαλίκης¹, Μαρία-Χριστίνα Κόττη¹

¹Εργαστήριο Φυσικής της Ατμόσφαιρας, Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Πατρών, 26500, Πάτρα, email: akaza@upatras.gr

²Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Jacobs School of Engineering, University of California, San Diego, USA

³Εργαστήριο Φυσικής της Ατμόσφαιρας, Τμήμα Φυσικής, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία παρουσιάζεται το σύνολο των αποτελεσμάτων από μια σειρά ερευνητικών εργασιών που αφορούν την κλιματολογία, τις μετρήσεις και εκτιμήσεις σε σχεδόν πραγματικό χρόνο και την πρόγνωση του ηλιακού δυναμικού στον Ελλαδικό χώρο. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται βασίζονται στα ερευνητικά προγράμματα «Ελληνικό Δίκτυο Ηλιακής Ενέργειας» (www.helionet.gr) και “Direct Normal Irradiance Nowcasting Methods for optimized operation of concentrating solar technologies” (DNICast, <http://www.dnicast-project.net>) και αφορούν:

- Την κλιματολογία της ηλιακής ενέργειας στον Ελλαδικό χώρο για την περίοδο 2002-2012 και την αξιολόγησή της από επίγειες μετρήσεις
- Την ταξινόμηση περιοχών του Ελλαδικού χώρου με διαφορετικά χαρακτηριστικά μεταβολής του ηλιακού δυναμικού
- Τη μεθοδολογία για την εκτίμηση του ηλιακού δυναμικού σε σχεδόν πραγματικό χρόνο από δορυφορικές μετρήσεις με χωρικό και χρονικό βήμα 0.05° και 15 λεπτών αντίστοιχα
- Τη βραχυπρόθεσμη (30-240 λεπτά) πρόγνωση του ηλιακού δυναμικού στον Ελλαδικό χώρο με την συνεργατική χρήση νευρωνικών δικτύων και δορυφορικών εικόνων

Λέξεις κλειδιά: ηλιακή ενέργεια, ακτινοβολία, κλιματολογία, πρόγνωση

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια, έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες (σε τοπική ή παγκόσμια κλίμακα) για την εκτίμηση της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στο έδαφος, στηριζόμενες σε δορυφορικές εικόνες [1]-[10]. Οι μεγαλύτερες αβεβαιότητες αναμένονται στην εκτίμηση των οπτικών ιδιοτήτων των νεφών και, για αυτή την περίπτωση, προτάθηκαν συγκεκριμένες μεθοδολογίες [11].

Η ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να μετρηθεί άμεσα ή να εκτιμηθεί από μετεωρολογικές παραμέτρους (διάρκεια ηλιοφάνειας, νέφωση κ.τ.λ.) σε εκατοντάδες επίγειους σταθμούς στην Ευρώπη. Αλλά, παρά την συμπληρωματική χρήση των δορυφορικών εικόνων και των εργαλείων του Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών (Geographical Information System, GIS), οι μετρήσεις τους θα μπορούσαν να θεωρηθούν αντιπροσωπευτικές για μια μικρή περιοχή γύρω από κάθε τοποθεσία, κυρίως λόγω της υψηλής χωρικής και χρονικής μεταβλητότητας των νεφών.

Το ηλιακό δυναμικό, τόσο από τα φωτοβολταϊκά (PV) όσο και από τις ηλιοθερμικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής είναι - μαζί με την αιολική ενέργεια - σημαντικός συντελεστής σε ένα μελλοντικό ενεργειακό σύστημα, το οποίο βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Ωστόσο, στον τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας και οι δύο πηγές εισάγουν νέες προκλήσεις για τη λειτουργία του συστήματος λόγω της εκ φύσεώς τους ισχυρής μεταβλητότητας. Η παραγωγή ενέργειας από συστήματα ηλιακής και αιολικής ενέργειας παρουσιάζει θεμελιωδώς διαφορετικά χαρακτηριστικά από ότι με τις συμβατικές πηγές ενέργειας. Η διαθεσιμότητα της ηλιακής και αιολικής ενέργειας, καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες και είναι ως εκ τούτου εξαιρετικά μεταβλητή.

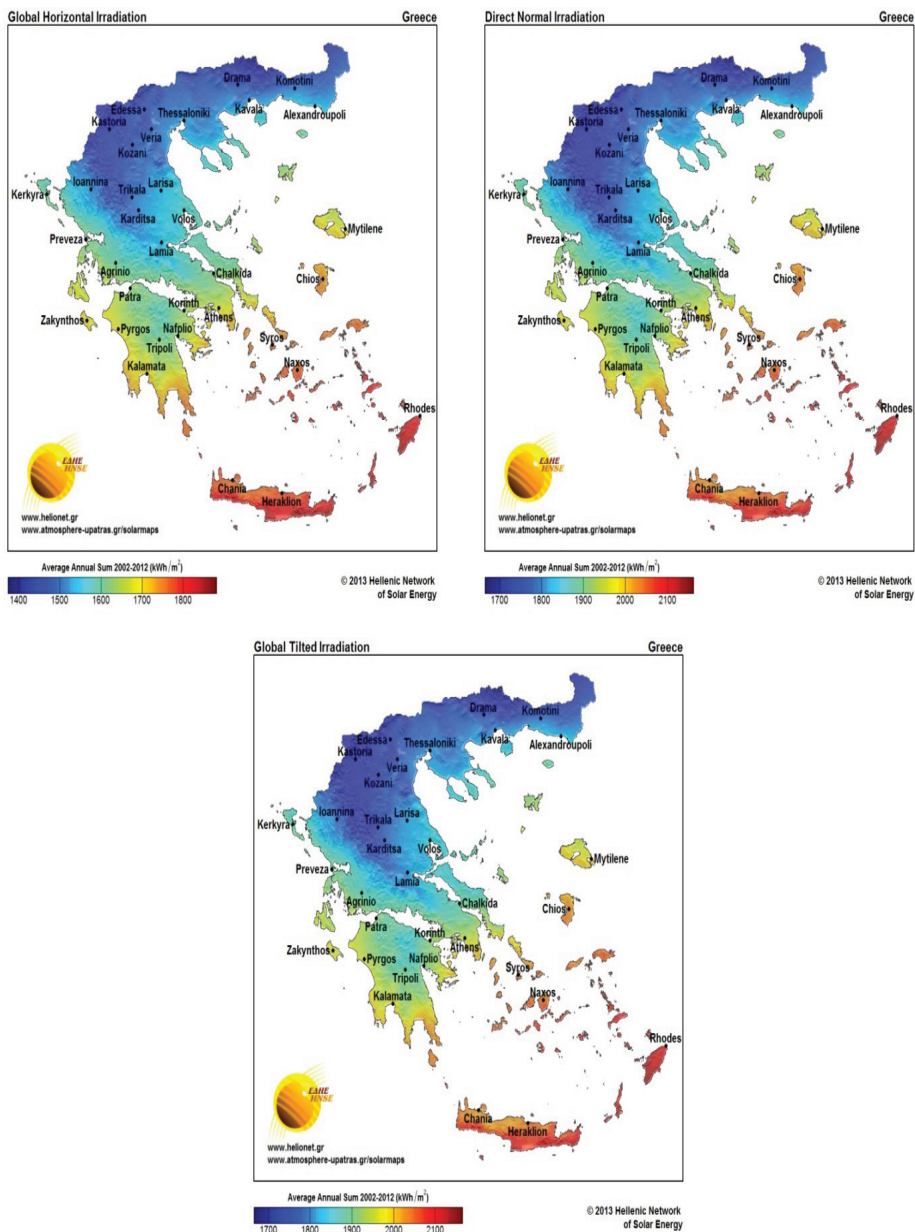
Ανάλογα με την εφαρμογή και το αντίστοιχο χρονικό διάστημα, έχουν εισαχθεί διαφορετικές προσεγγίσεις πρόβλεψης. Τα μοντέλα που βασίζονται σε χρονοσειρές μετρήσεων ακτινοβολίας από την εκάστοτε τοποθεσία είναι επαρκή για την πολύ βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη με χρονική κλίμακα από μερικά λεπτά έως μερικές ώρες. Συμπληρωματικά, μπορεί να γίνει πρόβλεψη των νεφών και της ακτινοβολίας με υψηλή χωρική και χρονική ανάλυση με επίγεια συστήματα ψηφιακής απεικόνισης του ουρανού. Επίσης, προβλέψεις που βασίζονται στην εκτίμηση της κίνησης των νεφών από δορυφορικές εικόνες παρουσιάζουν καλή απόδοση για μια χρονική κλίμακα από 30 λεπτά έως 6 ώρες. Τέλος, για την ενσωμάτωση της παραγόμενης ηλιακής ενέργειας στο δίκτυο απαιτούνται προβλέψεις μέχρι και 2 ημέρες πριν ή ακόμα περισσότερο και αυτές βασίζονται σε αριθμητικά μοντέλα πρόγνωσης καιρού.

Η εργασία αυτή παρέχει μια σύντομη περιγραφή για τις διάφορες εφαρμογές που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση, την πρόγνωση της ηλιακής ακτινοβολίας και της ενέργειας στην Ελλάδα.

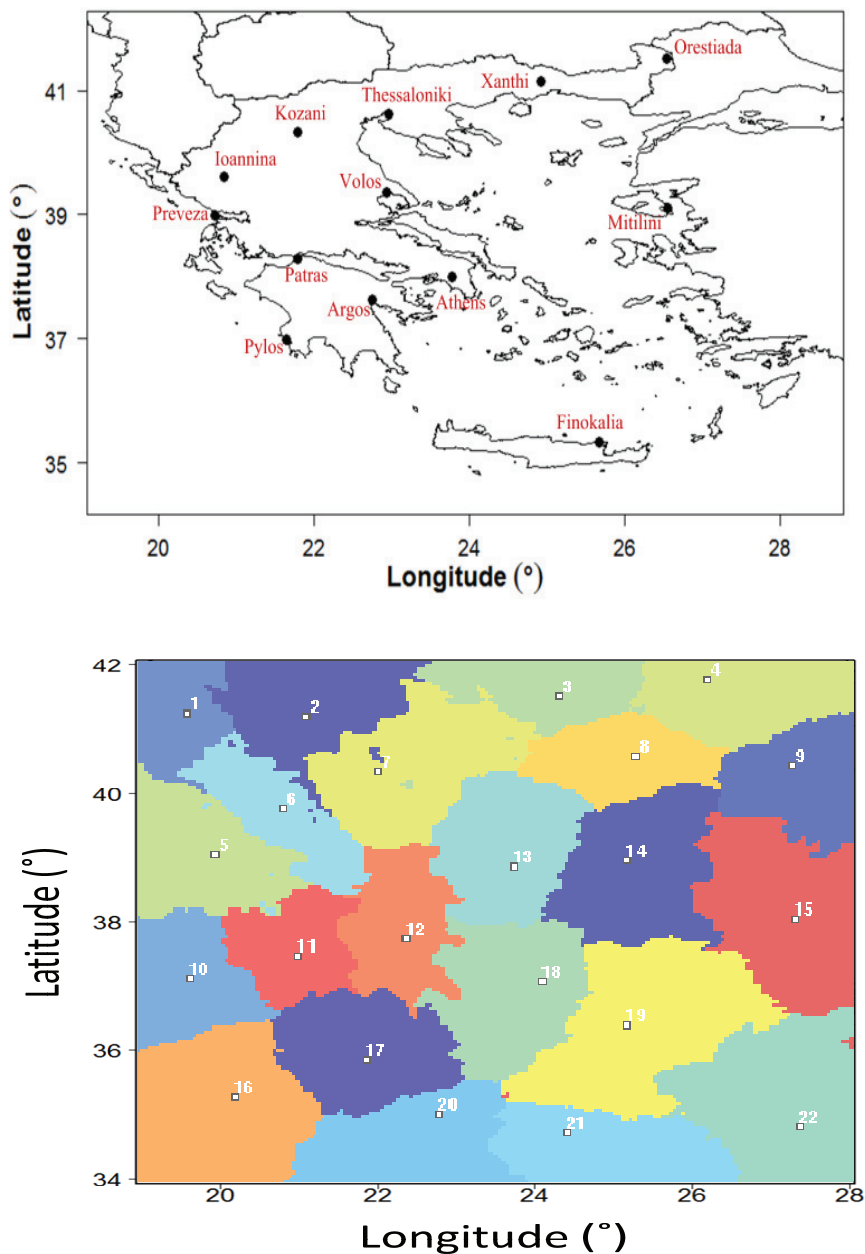
2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

2.1. Εκτίμηση της ηλιακής ακτινοβολίας στον Ελλαδικό χώρο

Με τη χρήση δορυφορικών δεδομένων (που αφορά τις οπτικές ιδιότητες των νεφών) για το χρονικό διάστημα 2002 - 2012 υπολογίσθηκε για κάθε ημέρα η ολική ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε οριζόντιο αλλά και σε κεκλιμένο επίπεδο με νότο προσανατολισμό και βέλτιστη κλίση, καθώς και η άμεση ηλιακή ακτινοβολία με χρονική ανάλυση των 15 λεπτών. Με βάση τα παραπάνω, έχει εξαχθεί η ετήσια κλιματολογία σχετικά με την διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια με χωρικό βήμα 0.05° (εικόνα 1). Στην Ελλάδα, οι υψηλότερες καταγεγραμμένες μηνιαίες τιμές της ηλιακής ενέργειας βρέθηκαν κατά την διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών στη νότια Πελοπόννησο, την Κρήτη και τα νησιά των Κυκλάδων, και υπερβαίνει τις 2.500 kWh/m².



Εικόνα 1: Κλιματολογικοί χάρτες της ολικής, άμεσης και σε κεκλιμένη επιφάνεια ηλιακής ενέργειας στον Ελλαδικό χώρο

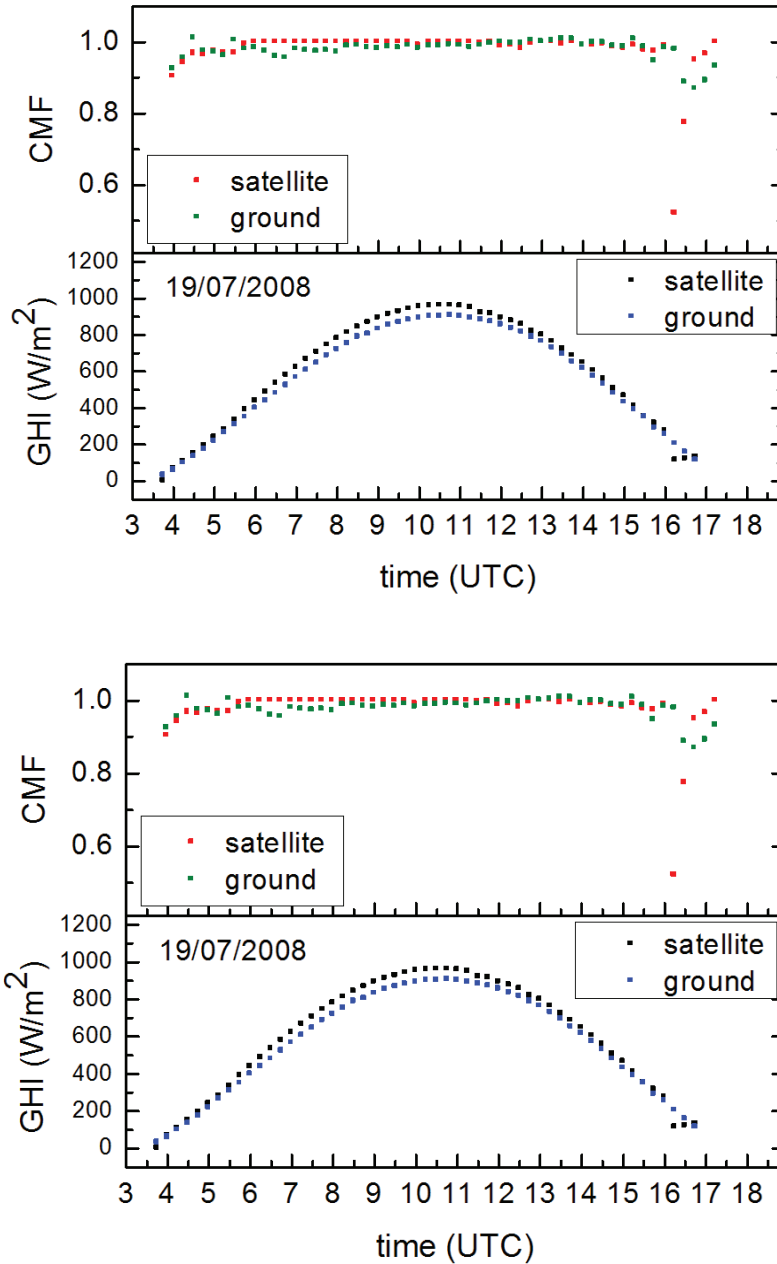


Εικόνα 2: Οι θέσεις των σταθμών του ΕΔΗΕ (πάνω) και ο διαχωρισμός της Ελλάδας σε 22 περιοχές με κοινά χαρακτηριστικά νεφών (κάτω, από Ζάγουρας κ.α.[12]).

Στα πλαίσια του Ελληνικού Δικτύου Ηλιακής Ενέργειας (ΕΔΗΕ), 14 σταθμοί παρακολούθησης (εικόνα 2, επάνω) εγκαταστάθηκαν κατά τη διάρκεια του 2011. Η επιλογή των θέσεων έγινε ώστε να μπορούν να εκπροσωπήσουν περιοχές στον Ελλαδικό χώρο με διαφορετικά κλιματολογικά χαρακτηριστικά. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην νεφοκάλυψη, με βάση τη μεθοδολογία που προτάθηκε από τον Ζάγουρα κ.α.[12] (εικόνα 2, κάτω). Όλοι οι σταθμοί είναι εξοπλισμένοι με πυρανόμετρα Kirpp & Zonen (τύποι CM21, CM11 και CM10) και παρέχουν μετρήσεις της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας (global horizontal irradiance, GHI). Παρόλο που οι η νεφοκάλυψη στον Ελλαδικό χώρο είναι τυπική για την περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου, υπάρχουν σημαντικές διαφοροποιήσεις σε όλες τις εποχές ανάμεσα στις βόρειες και νότιες καθώς και τις ηπειρωτικές και νησιώτικες περιοχές. Οι διαφορές στη νέφωση οφείλονται αφενός στην παρουσία ορέων με κορυφές άνω των 2000 m κατά μήκος της βορειοανατολικής-νοτιοανατολικής διεύθυνσης, αφετέρου στην παρουσία του Αιγαίου και του Ιονίου πελάγους. Λόγω των προαναφερόμενων κλιματικών συνθηκών, η χωρική μεταβλητότητα της νέφωσης στον Ελλαδικό χώρο είναι σημαντική, κάτι που αντικατοπτρίζεται και στον προτεινόμενο διαχωρισμό των περιοχών της εικόνας 2 (κάτω) .

Στην εικόνα 3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για δύο τυπικές ημέρες, με συνθήκες πλήρους νέφωσης και με καθαρό ουρανό αντιστοίχως. Τα αποτελέσματα περιλαμβάνουν τον παράγοντα επίδρασης των νεφών στην ακτινοβολία (cloud modification factor, CMF) που ορίζεται ως ο λόγος της ακτινοβολίας σε πραγματικές συνθήκες προς τον λόγο της ακτινοβολίας για ανέφελο ουρανό. Οι τιμές του CMF προέρχονται από μετρήσεις του μετεωρολογικού δορυφόρου MSG και από επίγειες μετρήσεις στο σταθμό της Θεσσαλονίκης. Στην επάνω εικόνα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την 17^η Δεκεμβρίου 2007, μια μέρα με συνθήκες σχεδόν πλήρους νεφοκάλυψης, ενώ στη κάτω εικόνα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την 19^η Ιουλίου 2008, όπου παρατηρήθηκαν κατά το μεγαλύτερο μέρος της ημέρας συνθήκες ανέφελου ουρανού. Και στις δύο ημέρες, η εκτίμηση του CMF από τις δορυφορικές μετρήσεις φαίνονται σε αρκετά καλή συμφωνία με τις επίγειες μετρήσεις. Οι αντίστοιχες τιμές της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας είναι επίσης σε καλή συμφωνία. Για την ανέφελη ημέρα, οι πιο αξιοσημείωτες διαφορές παρατηρούνται γύρω από το τοπικό ηλιακό μεσημέρι, όπου ο δορυφόρος παρέχει ελαφρώς υψηλότερες τιμές, το οποίο οφείλεται στο γεγονός ότι ανιχνεύει συνθήκες απόλυτα καθαρού ουρανού, ενώ οι τιμές του CMF από το έδαφος έχουν κάποιες μικρές αποκλίσεις, αλλά εξακολουθούν να παραμένουν υψηλότερες από 0,97. Στην ημέρα με την πλήρη νέφωση, οι διαφορές που εξάγονται από δορυφόρο σε σχέση με αυτές που μετρούνται στο έδαφος γίνονται ελαφρώς υψηλότερες. Ο δορυφόρος δείχνει μια μικρή υπερεκτίμηση της νέφωσης και ως αποτέλεσμα παρέχει ελαφρώς χαμηλότερες τιμές ακτινοβολίας, από αυτές που μετρώνται από το επίγειο όργανο.

Η ανάλυση παρόμοιων περιπτώσεων δείχνει ότι οι μεγαλύτερες διαφορές διαπιστώνονται σε συνθήκες ανομοιογενούς νέφωσης, όταν ο ήλιος παρεμποδίζεται από ένα σύννεφο και το όργανο στο έδαφος σκιάζεται, καθώς και σε περιπτώσεις πολύ πυκνής νέφωσης (CMF <0.2). Τα αποτελέσματα, που παρουσιάζονται και για τις δύο συνθήκες νέφωσης (ανέφελο ουρανό και πλήρη νεφοκάλυψη) δείχνουν ότι δεν υπάρχει εξάρτηση της μεθοδολογίας από την ζενίθια γωνία (SZA) που σημαίνει ότι η ημερήσια μεταβολή στην ανακλαστικότητα του εδάφους και η σχετική θέση δορυφόρου-ηλίου είναι καλά προσομοιωμένες.

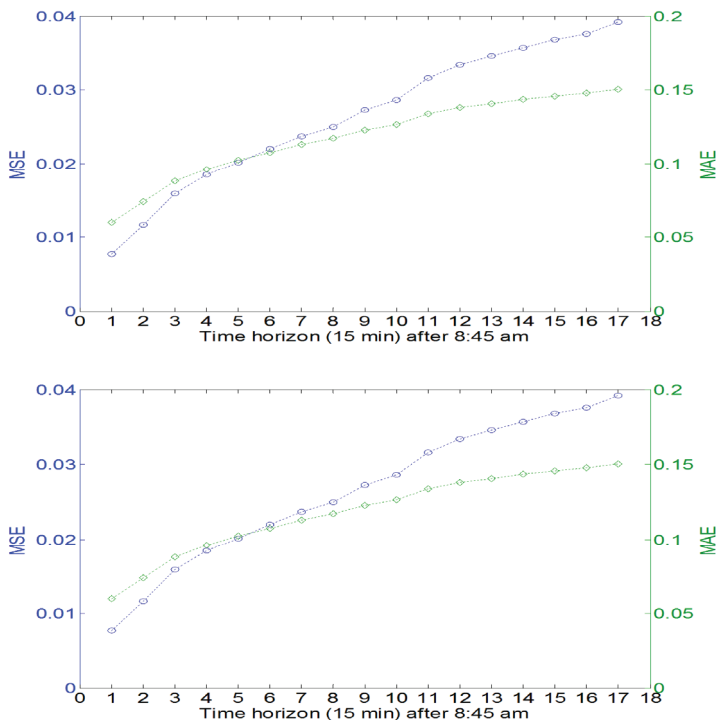


Εικόνα 3: Παραδείγματα υπολογισμού του παράγοντα επίδρασης της νέφωσης (CMF) και της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας (GHI) από δορυφορικές και επίγειες μετρήσεις για ημέρα με πλήρη νεφοκάλυψη (επάνω) και μια ημέρα με ανέφελο ουρανό (κάτω).

2.2. Πρόγνωση της ηλιακής ακτινοβολίας

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται μια καινοτόμος μέθοδος για την βραχυπρόθεσμη (0-240 λεπτά) πρόβλεψη της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας (global horizontal irradiance, GHI) στην Ελλάδα, βασισμένη σε τιμές του CMF που προέρχονται από δορυφόρο και σε αποτελέσματα από νευρωνικό δίκτυο λαμβάνοντας υπόψη ότι η νέφωση είναι ο κύριος ατμοσφαιρικός συντελεστής για τη χωρική και χρονική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια.

Χρησιμοποιήθηκε ένα νευρωνικό δίκτυο για καθεμιά από τις 22 περιοχές της Ελλάδας (όπως παρουσιάζονται στην εικόνα 2). Το νευρωνικό δίκτυο εκπαιδεύτηκε με δεδομένα εισόδου από το σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης που αντιπροσωπεύουν τις τιμές του CMF για κάθε εικονοστοιχείο μαζί με τις 8 τιμές από τα εκάστοτε γειτονικά του εικονοστοιχεία στο χρονικό διάστημα $t-3$ έως t , όπου t είναι η 8:45 UT. Η έξοδος αποτελείται από 17 συνεχόμενες μονότιμες προβλέψεις οι οποίες αντιπροσωπεύουν τις τιμές του CMF για κάθε τοποθεσία σε ένα μελλοντικό χρόνο κάθε 15 λεπτά μπροστά. Στη συνέχεια, τα 22 πλήρως εκπαιδευμένα νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιήθηκαν για να παράγουν τις τιμές εξόδου για το σύνολο των ημερών του σετ δοκιμής. Για την εκτίμηση της αξιοπιστίας των προγνώσεων, υπολογίστηκαν τα στατιστικά μεγέθη Mean Standard Error (MSE) και Mean Absolute Error (MAE) μεταξύ των τιμών εξόδου και των τιμών του στόχου. Οι τιμές τους, για καλοκαίρι και χειμώνα με χρονικό βήμα ανά 15 λεπτά από την έναρξη της ώρας πρόγνωσης, παρουσιάζονται στην Εικόνα 4. Με βάση τα αποτελέσματα του νευρωνικού δικτύου, οι εκτιμώμενες και οι μετρούμενες τιμές του CMF βρίσκονται σε καλή συμφωνία: η μέγιστη μέση MSE μετά από 4:15 ώρες είναι 0.06 και 0.1 κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού και του χειμώνα αντίστοιχα και αντιστοιχεί σε ένα σφάλμα της τάξης του 6 και 10% στην ολική ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο.



Εικόνα 4: Οι τιμές των MSE και MAE μεταξύ των πραγματικών και των εκτιμώμενων τιμών CMF κατά τη διάρκεια καλοκαιριού (αριστερά) και χειμώνα (δεξιά).

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία υποστηρίχθηκε οικονομικά από τα ερευνητικά έργα «Ελληνικό Δίκτυο Ηλιακής Ενέργειας» (ΕΔΗΕ), Πρόγραμμα «Συνεργασία», Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας, Υπουργείο Παιδείας και Θρησκευμάτων (No 09ΣΥΝ-32-778) και “Direct Normal Irradiance Nowcasting Methods for optimized operation of concentrating solar technologies” (DNICast), FP7 (GA No: 608623).

Οι συγγραφείς ευχαριστούν τον J. Verdehout για τη προσφορά της αρχικής μορφής του αλγορίθμου για την εκτίμηση των δορυφορικών δεδομένων και την ομάδα ανάπτυξης του μοντέλου LibRadtran.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Ramanathan, V. , 1986, “Scientific use of surface radiation budget data for climate studies. Surface Radiation Budget for Climate Application”, Reference Publication 1169, J. T. Suttles and G. Ohring, Eds., NASA, 58–86.
- [2] Pinker, R.T., and Laszlo, I., 1992, “Modeling surface solar irradiance for satellite applications on a global scale”, J. Appl. Meteor., 31, 194–211.
- [3] Li, Z., and Leighton, H.Z., 1993, “Global climatology of solar radiation budgets at the surface and in the atmosphere from 5 years of ERBE data”, J. Geophys. Res., 98, 4919–4930.
- [4] Stephens, G.L., Slingo, A., Webb, M.J., Minnett, P.J., Daum, P.H., Kleinman, L., Wittmeyer, I., and Randall, D.A., 1994, “Observations of the earth’s radiation budget in relation to atmospheric hydrology: 4. Atmospheric column radiative cooling over the world’s oceans”, J. Geophys. Res., 99, 18 585–18 604.
- [5] Gupta, S.K., Ritchey, N.A., Wilber, A.C., Whitlock, C.H., Gibson, G.G., and Stackhouse Jr., P.W., 1999, “A climatology of surface radiation budget derived from satellite data”, J. Climate, 12, 2691–2710.
- [6] Mueller, R.W., 2004, “Rethinking satellite based solar irradiance modelling—The SOLIS clear sky module”, Remote Sens. Environ., 91, 160–174.
- [7] Raschke, E., Stuhlmann, R., Palz, W., and Steemers, T.C., 1991, “Solar Radiation Atlas of Africa”, A. Balkema, 155 pp.
- [8] Rigollier, C., Lefevre, M., Wald, L., 2004, “The method Heliosat-2 for deriving shortwave solar radiation data from satellite images”, Solar Energy, 77, 159–169.
- [9] Whitlock, C., 1995, “First global WCRP shortwave surface radiation budget dataset”, Bull. Amer. Meteor. Soc., 76, 905–922.
- [10] Lefèvre, M., Wald, L., and Diabaté, L., 2007, “Using reduced data sets ISCCP-B2 from the Meteosat satellites to assess surface surface solar irradiance”, Solar Energy, 81, 240–253.
- [11] Wang H., Pinker, R.T., Minnis, P., Khayier, M.M., 2008, “Experiments with Cloud Properties: Impact on Surface Radiative Fluxes”, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 25, 1034-1040.
- [12] Zagouras, A., Kazantzidis, A., Nikitidou, E., Argiriou, A.A., 2013, “Determination of measuring sites of solar irradiance, based on cluster analysis of satellite-derived cloud estimations”, Solar Energy, 97, 1-11.

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΑ ΒΑΘΗ ΣΤΟΝ ΣΤΑΘΜΟ ΤΟΥ ΕΘΝΙΚΟΥ ΑΣΤΕΡΟΣΚΟΠΕΙΟΥ ΑΘΗΝΩΝ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΔΟ 1999-2012

Ι. Τσιμούρα, Γ. Παπαδόπουλος, Γ. Τσιλιγκιρίδης

Εργαστήριο Κατασκευής Συσκευών Διεργασιών
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, ΑΠΘ, e-mail: ifigeneia99@outlook.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη των μεταβολών της θερμοκρασίας του εδάφους σε διάφορα βάθη στο σταθμό μέτρησης του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών με το στόχο την εξαγωγή συμπερασμάτων που θα βοηθήσουν στην εκτίμηση και εκμετάλλευση του ενεργειακού δυναμικού του εδάφους. Για το σκοπό αυτό εξετάζονται οι μεταβολές της θερμοκρασίας του εδάφους σε διάφορα βάθη συναρτήσει της διακύμανσης της θερμοκρασία του ατμοσφαιρικού αέρα.

Αναλύονται διαθέσιμες μετρήσεις της θερμοκρασίας του αέρα και μετρήσεις της θερμοκρασίας του εδάφους τόσο της επιφάνειας όσο και του υπεδάφους στα βάθη 0,02m, 0,05m, 0,10m, 0,15m, 0,20m, 0,30m, 0,40m, 0,50m, 0,60m, 0,90 m και 1,20m, για την περίοδο 1999-2012. Εξετάζεται η διαχρονική εξέλιξη των ετήσιων τιμών, η διακύμανση των μέσων μηνιαίων τιμών κατά την εξεταζόμενη περίοδο, καθώς και η μεταβολή των μέσων μηνιαίων προφίλ των θερμοκρασιών του εδάφους σε συνάρτηση με το βάθος.

Ιδιαίτερος στόχος της εργασίας είναι η συσχέτιση της θερμοκρασίας του εδάφους σε διάφορα βάθη με την αντίστοιχη θερμοκρασία του αέρα, ώστε να γίνει μια πρώτη προσπάθεια προσδιορισμού αναλυτικών εξισώσεων υπολογισμού της θερμοκρασίας του εδάφους σε διάφορα βάθη σε σχέση με την θερμοκρασία του αέρα, που να υποστηρίζουν τις μελέτες εκμετάλλευσης του ενεργειακού περιεχομένου του εδάφους. Στην κατεύθυνση αυτή διερευνάται η επίδραση της θερμοκρασίας του αέρα στη θερμοκρασία του εδάφους και η σταδιακή μείωση της επίδρασης αυτής με την αύξηση του βάθους. Ακόμα, διερευνάται η συσχέτιση των μέσων μηνιαίων τιμών της θερμοκρασίας του εδάφους στα διάφορα βάθη προς τη μέση μηνιαία θερμοκρασία του ατμοσφαιρικού αέρα και προσδιορίζονται αναλυτικές εξισώσεις τάσης για τα διάφορα βάθη, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εκτίμηση της θερμοκρασίας του εδάφους σε συγκεκριμένα βάθη, σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία του αέρα.

Λέξεις Κλειδιά: Θερμοκρασία εδάφους, συσχέτιση θερμοκρασιών εδάφους- αέρα, εξισώσεις συσχέτισης

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μελέτη της θερμοκρασίας του εδάφους αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την κατανόηση φαινομένων που συμβαίνουν στο έδαφος, στους ζωντανούς οργανισμούς και στο στρώμα της ατμόσφαιρας που βρίσκεται σε αλληλεπίδραση με το έδαφος. Από ενεργειακής πλευράς, η θερμοκρασία του εδάφους είναι ο δείκτης της αποθηκευμένης στο έδαφος θερμότητας και η γνώση της είναι απαραίτητη στο σχεδιασμό και εξέλιξη συστημάτων εκμετάλλευσής της.

Τα συστήματα αυτά αποτελούνται από υπόγειους σωλήνες στους οποίους κυκλοφορεί αέρας ή νερό, που στη συνέχεια εισέρχεται στους εσωτερικούς χώρους ενός κτιρίου για θέρμανση/ψύξη είτε άμεσα, είτε έμμεσα με τη χρήση κατάλληλων συστημάτων αντλιών θερμότητας. Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούν είτε κατακόρυφους σωλήνες σε βάθη έως και 180 m, είτε οριζόντιους σε βάθη έως και 1,5 m [1]. Στην εικόνα 1 φαίνονται τα συστήματα εκμετάλλευσης της θερμότητας του εδάφους με οριζόντιους ή κατακόρυφους σωλήνες.



Εικόνα 1: Συστήματα εκμετάλλευσης της θερμότητας του εδάφους με οριζόντιους ή κατακόρυφους σωλήνες

Η διακύμανση της θερμοκρασίας του εδάφους επηρεάζεται από παράγοντες που αφορούν το ίδιο το έδαφος (η σύστασή του, η κάλυψή του ή όχι με χορτάρι ή άλλα υλικά, η περιεχόμενη σε αυτό υγρασία, ο παγιδευμένος αέρας ή διάφορα άλλα αέρια μέσα στο έδαφος) ή έχουν να κάνουν με το περιβάλλον (η θερμοκρασία του αέρα, η ηλιακή ακτινοβολία, η ταχύτητα του ανέμου, η βροχόπτωση και η χιονόπτωση).

Έρευνες σχετικά με την συμπεριφορά της θερμοκρασίας του εδάφους δεν έχουν διεξαχθεί σε ευρεία κλίμακα. Οι περισσότερες μελέτες πάνω στη διακύμανση της θερμοκρασίας του εδάφους έχουν διεξαχθεί με σκοπό την παραγωγή και αξιολόγηση μοντέλων, τα οποία επιχειρούν να προβλέψουν με ακρίβεια τις τιμές της θερμοκρασίας σε διάφορα βάθη. Οι περισσότερες από τις παλαιότερες εργασίες αναφέρονται στην ανάπτυξη και χρήση μοντέλων προσδιορισμού της κατανομής της θερμοκρασίας του εδάφους και της θερμικής ροής σε αυτό και στην προσαρμογή των αποτελεσμάτων των μοντέλων στις διαθέσιμες μετρήσεις θερμοκρασίας του εδάφους [2-7]. Οι περισσότερες από αυτές βασίζονται σε μετρήσεις σε μικρά βάθη, ενώ ελάχιστες είναι οι εργασίες που ασχολούνται με μετρήσεις σε μεγαλύτερα βάθη. Η πλειοψηφία των πιο πρόσφατων εργασιών διερευνούν την διακύμανση της θερμοκρασίας του εδάφους σε βάθη έως 180 m, με στόχο την διευκόλυνση εφαρμογών, ιδιαίτερα αντλιών θερμότητας [8-13].

Οι εργασίες που αναφέρονται στον Ελλαδικό χώρο αξιοποιούν τις διαθέσιμες μετρήσεις του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών και του Μετεωρολογικού σταθμού του ΑΠΘ. Οι πρώτες μελετούν την χρονική διακύμανση της θερμοκρασίας του εδάφους, την ενεργειακή συμπεριφορά του εδάφους ανάλογα με διαφορετικά υλικά κάλυψής του, της χρήσης του για τη θέρμανση ή την ψύξη των κτιρίων, τη θερμοκρασιακή κατανομή κάτω από κτίρια καθώς και τους νόμους που την διέπουν ή παρουσιάζουν τα αποτελέσματα μαθηματικών μοντέλων προσομοίωσης [14-20]. Οι δεύτερες μελετούν τη θερμική συμπεριφορά και τη θερμοκρασία του εδάφους με στόχο την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων για την εφαρμογή τους σε

γεωργικές δραστηριότητες, όπως η σπορά, η φύτευση, η ανάπτυξη και η παραγωγή των διάφορων φυτών [21], ή αναφέρονται στην εκτίμηση της θερμοκρασιακής συμπεριφοράς του εδάφους σε σχέση με τη θερμοκρασία του αέρα στο σταθμό μέτρησης του ΑΠΘ [22-23] και στη διατύπωση αναλυτικών σχέσεων που εκφράζουν αυτή τη σχέση.

Στην παρούσα εργασία επιχειρείται μια πρώτη μελέτη των μεταβολών της θερμοκρασίας του εδάφους σε διάφορα βάθη στο σταθμό μέτρησης του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (Ε.Α.Α.) με το στόχο την εξαγωγή συμπερασμάτων που θα βοηθήσουν στην εκτίμηση και εκμετάλλευση του ενεργειακού δυναμικού του εδάφους. Ιδιαίτερος στόχος της εργασίας είναι η συσχέτιση της θερμοκρασίας του εδάφους σε διάφορα βάθη με την αντίστοιχη θερμοκρασία του αέρα, ώστε να γίνει μια πρώτη προσπάθεια προσδιορισμού αναλυτικών εξισώσεων υπολογισμού της θερμοκρασίας του εδάφους σε διάφορα βάθη σε σχέση με την θερμοκρασία του αέρα, που να υποστηρίζουν τις μελέτες εκμετάλλευσης του ενεργειακού περιεχομένου του εδάφους.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Ο σταθμός μέτρησης του Ε.Α.Α. που βρίσκεται στο Θησείο, στο λόφο των Νυμφών (γεωγραφικό πλάτος 37°58'Β, γεωγραφικό μήκος 23°43'Α) σε υψόμετρο 107m από τη μέση επιφάνεια της θάλασσας. Το έδαφος στον τόπο των μετρήσεων αποτελείται κυρίως από άμμο, παρουσιάζει ομοιογένεια στη σύσταση και σε μηχανικές ιδιότητες.

Το Ε.Α.Α. διαθέτει μετεωρολογικά δεδομένα από το 1917. Στην συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιούνται μετρήσεις των ετών 1999 έως και 2012, ικανοποιητικής πληρότητάς. Οι μετρήσεις του Ε.Α.Α. που χρησιμοποιήθηκαν για τους σκοπούς της εργασίας αυτής περιλαμβάνουν μέσες ωριαίες τιμές των μεγεθών:

- Θερμοκρασία ατμοσφαιρικού αέρα.
- Θερμοκρασία επιφάνειας γυμνού εδάφους και καλυμμένου με χαμηλό χόρτο.
- Θερμοκρασία υπεδάφους στα βάθη:
θερμόμετρα άμεσης επαφής: 0,02m, 0,05m, 0,10m, 0,15m, 0,20m, 0,30m, 0,40m, 0,50m,
θερμόμετρα σε μεταλλικά κύπελλα: 0,30m, 0,60m, 0,90m και 1,20m.

Από την επεξεργασία των ωριαίων τιμών προέκυψαν για τα εξεταζόμενα μεγέθη μέσες ημερήσιες, μέσες μηνιαίες, μέσες ετήσιες καθώς και μέσες τιμές της περιόδου 1999-2012.

Κατά τον έλεγχο των διαθέσιμων ωριαίων μετρήσεων διαπιστώθηκε έλλειψη μετρήσεων, ή λανθασμένες καταγραφές, που αφαιρέθηκαν, π.χ. μετρήσεις που παρουσίαζαν αδικοιολόγητα μεγάλη στιγμιαία μεταβολή τιμής, ή υπερβολικά υψηλές τιμές για μεγάλα χρονικά διαστήματα.

Οι μετρήσεις της θερμοκρασίας του αέρα για το μελετώμενο χρονικό διάστημα είναι πλήρεις σε ποσοστό 100%. Οι μετρήσεις εδάφους η πληρότητα των στοιχείων είναι σε ποσοστό 92,7%. Αν εξαιρέσουμε τα έτη στα οποία δεν υπάρχουν για κάποια βάθη διαθέσιμες μετρήσεις για ολόκληρο το έτος το ποσοστό αυτό ανεβαίνει σε 98,6%.

Για την επιφάνεια του εδάφους, τόσο για το γυμνό έδαφος όσο και για το καλυμμένο με γρασίδι έδαφος, λείπουν οι μετρήσεις από ολόκληρο το έτος 2001. Το ποσοστό των διαθέσιμων μετρήσεων χωρίς το έτος 2001 είναι 99,2% και 99,3% αντίστοιχα.

Η διαθεσιμότητα των μετρήσεων για τα βάθη των 0,02m 0,05m, 0,10m και 0,20m είναι 99,3%. Στα 0,15m λείπουν μετρήσεις από δυο έτη, τα έτη 2002 και 2012. Για το υπόλοιπο χρονικό διάστημα η διαθεσιμότητα των στοιχείων είναι 99,2%. Επίσης, σε ποσοστό 99,2% είναι διαθέσιμες οι μετρήσεις για τα 0,40m. Για το βάθος των 0,30m οι διαθέσιμες μετρήσεις που έχουμε αγγίζουν το ποσοστό 92,1% καθώς λείπει όλο το έτος 2003. Οι μετρήσεις στο βάθος 0,50m για το διάστημα 2006-2012 κρίθηκαν μη αξιόπιστες, λόγω υπερβολικά μεγάλων τιμών και δεν λήφθηκαν υπόψη. Το ποσοστό των διαθέσιμων τιμών για το υπόλοιπο

διάστημα είναι 93,2%.

Οι καταγραφές για τα βάθη όπου τα θερμομέτρα είναι τοποθετημένα μέσα σε μεταλλικά κύπελλα (in cups), δεν παρουσιάζουν γενικευμένα προβλήματα και το ποσοστό των διαθέσιμων τιμών είναι 96,2% για το 0,30m, 99,1% για τα 0,60m, 99% για τα 0,90 m και 99,2% για τα 1,2 m.

Στην παρούσα μελέτη διερευνήθηκε η συμπεριφορά της θερμοκρασίας του εδάφους σε διάφορα βάθη σε συνάρτηση με τις μεταβολές της θερμοκρασίας του αέρα και επικεντρώνεται στις μέσες τιμές της εξεταζόμενης περιόδου, στις μέσες ετήσιες και τις μέσες μηνιαίες.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1. ΜΕΣΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥ 1999-2012

Στον πίνακα 1 και στην Εικόνα 2 δίνονται οι μέσες τιμές της θερμοκρασίας του αέρα και του εδάφους στην επιφάνεια και στα βάθη μέτρησης έως 1,2 m καθώς και οι μέσες τιμές των μέγιστων και ελάχιστων ετήσιων θερμοκρασιών της περιόδου 1999-2012. Είναι εμφανές ότι το εύρος της διακύμανσης της θερμοκρασίας του εδάφους μειώνεται με την αύξηση του βάθους και ενώ στην επιφάνεια του εδάφους η διαφορά μεταξύ μέσης μέγιστης και μέσης ελάχιστης για την εξεταζόμενη περίοδο είναι 64,77 °C, στο βάθος των 0,20m είναι 32,78, και στο βάθος των 1,2m η διαφορά μειώνεται σε 17,17 °C. Βέβαια, οι πολύ υψηλές θερμοκρασίες που παρατηρούνται στην επιφάνεια του εδάφους οφείλονται στην επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια. Για το λόγο αυτό και το εύρος της διακύμανσης της θερμοκρασίας του εδάφους στα πολύ μικρά βάθη είναι αρκετά υψηλότερες από τα υπόλοιπα, όπου παρατηρούμε σταδιακή μείωση της θερμοκρασίας του εδάφους με την αύξηση του βάθους.

Πίνακας 1: Μέσες, μέγιστες και ελάχιστες τιμές της θερμοκρασίας [°C] του αέρα και του εδάφους σε διάφορα βάθη μέτρησης κατά την περίοδο 1999-2012											
	Αέρας T_a	Επιφάνεια εδάφους		Έδαφος (κάτω από γυμνή επιφάνεια)							
		Γυμνή $T_{s,b}$	Με χόρτο $T_{s,g}$	$T_{gr,2}$	$T_{gr,5}$	$T_{gr,15}$	$T_{gr,20}$	$T_{gr,40}$	$T_{gr,60}$	$T_{gr,90}$	$T_{gr,120}$
Μέση	18,89	20,53	19,07	20,10	20,04	18,83	19,04	19,26	19,10	19,25	19,82
Μέγιστη	39,95	63,88	56,99	60,75	54,18	46,31	36,01	31,61	31,17	29,28	28,49
Ελάχιστη	-0,61	-0,89	-1,49	-0,98	0,44	1,39	3,23	6,66	7,17	9,47	11,32
Εύρος (max-min)	39,56	64,77	58,48	61,73	53,74	44,92	32,78	24,95	24,00	19,81	17,17
Απόκλιση $T_{s/gr} - T_a$		1,64	0,18	1,21	1,15	-0,06	0,15	0,37	0,21	0,36	0,93

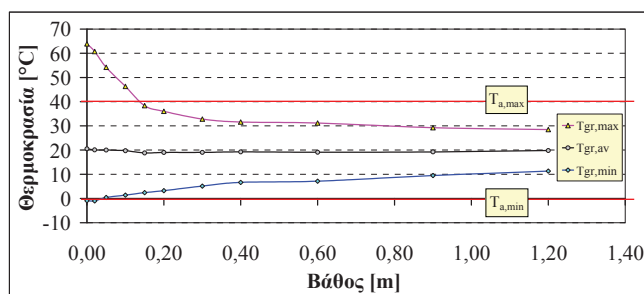
Όσον αφορά τις ελάχιστες θερμοκρασίες του εδάφους παρατηρείται σταδιακή αύξησή τους με το βάθος. Παρατηρούμε ότι οι μέσες τιμές της περιόδου για όλα τα βάθη δεν παρουσιάζουν μεγάλες διαφοροποιήσεις και κυμαίνονται γύρω από τους 20°C.

Στην εικόνα 2 αποτυπώνεται η μέγιστη, καθώς και η ελάχιστη θερμοκρασία του αέρα. Οι ελάχιστες θερμοκρασίες του εδάφους μέχρι το βάθος των 0,02m είναι μικρότερες από την μέση ελάχιστη θερμοκρασία του αέρα ενώ στα μεγαλύτερα βάθη είναι μεγαλύτερες. Οι μέγιστες θερμοκρασίες του εδάφους είναι μεγαλύτερες από την μέση μέγιστη θερμοκρασία του αέρα μέχρι το βάθος των 0,15m ενώ στα μεγαλύτερα βάθη είναι μικρότερες από αυτήν.

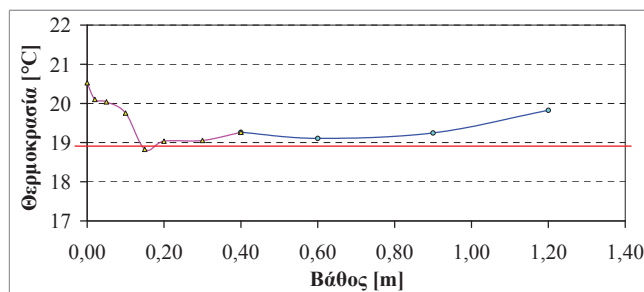
Στην εικόνα 3 δίνεται σε μεγαλύτερη ανάλυση η κατανομή της μέσης θερμοκρασίας του

εδάφους σε διάφορα βάθη κατά την εξεταζόμενη περίοδο. Οι μέσες θερμοκρασίες τόσο στην επιφάνεια όσο και σε όλα τα βάθη είναι μεγαλύτερες από την μέση θερμοκρασία του αέρα αν και τείνουν να εξισωθούν στο βάθος των 0,15m.

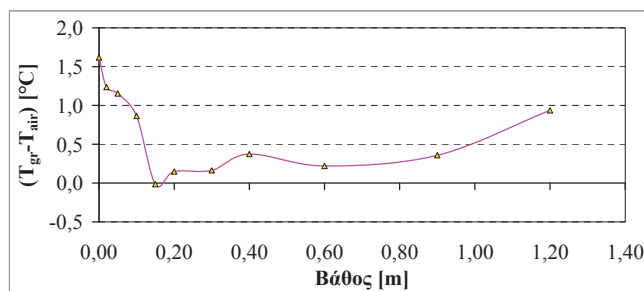
Στον πίνακα 1 και στη εικόνα 4 δίνεται η απόκλιση των μέσων τιμών της θερμοκρασίας του εδάφους από τη μέση θερμοκρασία του αέρα ($T_{s/gr} - T_a$) της εξεταζόμενης περιόδου. Η απόκλιση είναι υψηλότερη κοντά στην επιφάνεια και μικραίνει μέχρι το βάθος των 0,15m. Στα μεγαλύτερα βάθη η απόκλιση αυξάνεται αλλά όχι τόσο έντονα όσο στα μικρά βάθη, όπου επιδρούν και άλλες μετεωρολογικές παράμετροι, κυρίως η ηλιακή ακτινοβολία.



Εικόνα 2: Μέσες, μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες του αέρα και του εδάφους σε διάφορα βάθη κατά την περίοδο 1999-2012



Εικόνα 3: Κατανομή της μέσης θερμοκρασίας του εδάφους σε διάφορα βάθη κατά την περίοδο 1999-2012



Εικόνα 4: Απόκλιση της μέσης θερμοκρασίας του εδάφους από τη μέση θερμοκρασία του αέρα συναρτήσει του βάθους για την περίοδο 1999-2012.

Η μέση μέγιστη θερμοκρασία της περιόδου εμφανίζεται στο γυμνό έδαφος (63,88 °C) ενώ η μέση ελάχιστη στην επιφάνεια που είναι καλυμμένη με χορτάρι (-1,49 °C). Στην περίπτωση του θέρους, η επιφάνεια που καλύπτεται με χορτάρι εμφανίζει μικρότερες θερμοκρασίες

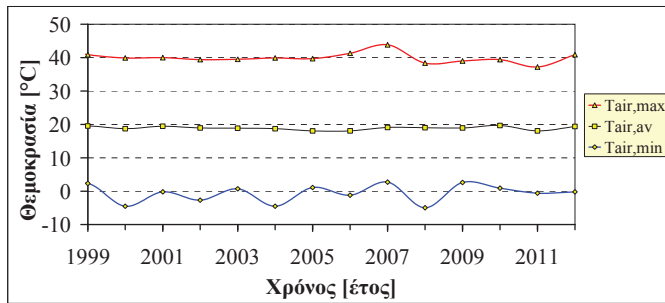
καθώς ένα μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας ανακλάται από την καλυμμένη με χορτάρι επιφάνεια, ενώ ένα μικρότερο κλάσμα αυτής απορροφάται για την φωτοσύνθεση από το ίδιο το φυτό. Από τα παραπάνω εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι μεγαλύτερες τιμές θερμοκρασίας που παρατηρούνται τόσο στην γυμνή επιφάνεια του εδάφους, όσο και σε μικρά βάθη, οφείλονται στην απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας από το έδαφος. Η επίδραση του φαινομένου αυτού μειώνεται με την αύξηση του βάθους από την επιφάνεια, καθώς όλο και μικρότερο κλάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας φτάνει στα μεγαλύτερα βάθη.

Για τον προσδιορισμό του βάθους, όπου οι θερμοκρασίες και οι διαφορές εξισορροπούνται, είναι προφανές ότι απαιτούνται μακροχρόνιες μετρήσεις και σε μεγαλύτερα βάθη.

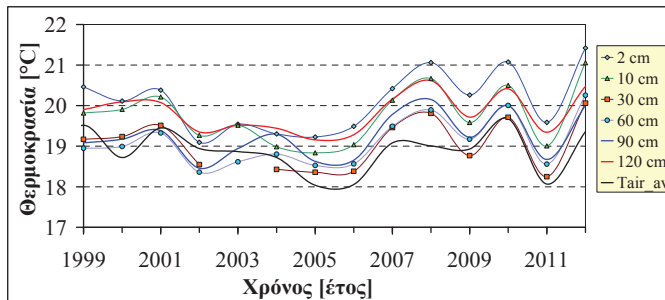
3.2. ΜΕΣΕΣ ΕΤΗΣΙΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥ

Στην εικόνα 5 φαίνεται η εξέλιξη της μέσης, της μέγιστης και της ελάχιστης θερμοκρασίας του αέρα. Οι μέγιστες θερμοκρασίες κυμαίνονται περί τους 40 °C, η ελάχιστη μεταξύ -5 και +2 °C, ενώ η μέση είναι ελάχιστα κάτω από τους 20 °C.

Στην εικόνα 6 φαίνεται η εξέλιξη των μέσων θερμοκρασιών του εδάφους για 0,02, 0,10, 0,30, 0,60, 0,90 και 1,20 m. Φαίνεται ότι οι μέσες ετήσιες θερμοκρασίες του εδάφους ακολουθούν σε μεγάλο βαθμό τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας του αέρα και ότι είναι μεγαλύτερες από αυτές του αέρα για τα περισσότερα χρόνια. Στην εικόνα 6 παρατηρείται η διακύμανση της θερμοκρασίας του εδάφους σε σχέση με την μέση θερμοκρασία του ατμοσφαιρικού αέρα. Στα 0,02, 0,10 και 0,30 m βλέπουμε πως οι τιμές της θερμοκρασίας του εδάφους ακολουθεί τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας του αέρα. Φυσικά στα μικρότερα βάθη οι διακυμάνσεις αυτές είναι εντονότερες και ακολουθούν με μεγαλύτερη «ευαισθησία» τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας του ατμοσφαιρικού αέρα, ενώ όσο αυξάνει το βάθος το φαινόμενο αυτό εξασθενεί. Στα 0,90 m και στα 1,2 m οι μεταβολές των θερμοκρασιών δεν είναι το ίδιο έντονες. Κάτι τέτοιο προκύπτει και στα παρακάτω διαγράμματα τα οποία παρουσιάζονται.



Εικόνα 5: Μέση, μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία του αέρα για την περίοδο 1999-2012.

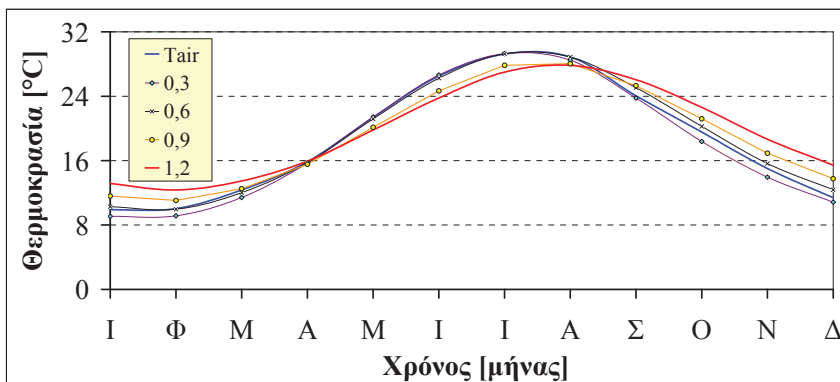


Εικόνα 6: Μέσες ετήσιες θερμοκρασίες εδάφους και αέρα για την περίοδο 1999-2012.

3.3. ΜΕΣΕΣ ΜΗΝΙΑΙΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ

Στην εικόνα 7 δίνεται η διακύμανση κατά την περίοδο 1999-2012 των μέσων μηνιαίων θερμοκρασιών αέρα και εδάφους στα βάρη 0,30, 0,60, 0,90 και 1,20m (κάτω από τη γυμνή επιφάνεια του εδάφους).

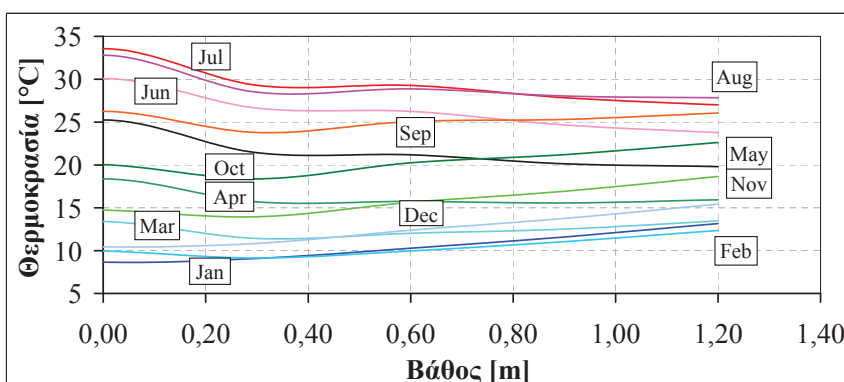
Η επίδραση των μεταβολών της θερμοκρασίας του αέρα μειώνεται σταδιακά με την αύξηση του βάθους. Από τα 0,60m και κάτω παρατηρείται απόσβεση των μεταβολών της θερμοκρασίας του αέρα και ενώ για το βάθος των 1,2m η διαφορά είναι 4 °C για το καλοκαίρι, το χειμώνα είναι 3 °C. Κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών παρατηρείται πως η θερμοκρασία του εδάφους είναι μεγαλύτερη, ενώ κατά τη διάρκεια των θερινών μηνών είναι μικρότερη. Το γεγονός αυτό είναι προς αξιοποίηση από διάφορα συστήματα θέρμανσης και δροσισμού των κτιρίων, καθώς κατά τη διάρκεια των κρύων ωρών του χειμώνα ή των ζεστών ωρών του θέρους η διαφορά αυτή είναι πολύ μεγαλύτερη.



Εικόνα 7: Διακύμανση των μέσων μηνιαίων θερμοκρασιών αέρα και εδάφους (βάθος 0,30 m, 0,60 m, 0,90 m, 1,20 m)

3.4. ΜΗΝΙΑΙΑ ΠΡΟΦΙΛ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΕΔΑΦΟΥΣ

Στην εικόνα 8 δίνονται τα προφίλ της μεταβολής με το βάθος της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας του εδάφους κατά την εξεταζόμενη περίοδο.



Εικόνα 8: Προφίλ μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας εδάφους κατά την περίοδο 1999-2012

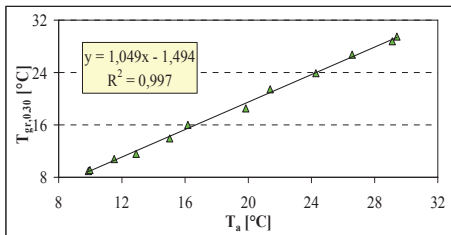
Τους θερινούς μήνες η θερμοκρασία στην επιφάνεια και κοντά σε αυτήν είναι μεγαλύτερη απ' ότι στο μέγιστο βάθος. Το αντίστροφο παρατηρείται τους χειμερινούς μήνες. Αξίζει να σχολιάσουμε τον μήνα Μάρτιο όπου η καμπύλη που παρατηρούμε είναι διαφορετική τόσο σε

σχέση με τους χειμερινούς όσο και σε σχέση με τους θερινούς μήνες. Αυτό συμβαίνει διότι η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας τον μήνα Μάρτιο είναι εντονότερη σε σχέση με τους χειμερινούς μήνες με αποτέλεσμα η επιφάνεια του εδάφους να θερμαίνεται. Ωστόσο, όσο προχωράμε σε μεγαλύτερα βάθη τον ίδιο μήνα οι θερμοκρασίες του εδάφους πέφτουν καθώς το έδαφος δεν έχει προλάβει να ζεσταθεί αφού προηγήθηκαν οι χειμερινοί μήνες στους οποίους δεν είχαμε έντονη ηλιακή ακτινοβολία και είχαμε χαμηλές θερμοκρασίες αέρα. Οι μεγαλύτερες τιμές θερμοκρασίας που παρατηρούνται κατά τους θερινούς μήνες οφείλονται στην απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας από το έδαφος. Η επίδραση αυτή μειώνεται με την αύξηση του βάθους, καθώς όλο και μικρότερο κλάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας φτάνει στα μεγαλύτερα βάθη.

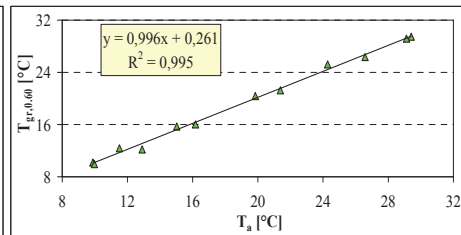
3.5. ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΕΔΑΦΟΥΣ ΚΑΙ ΑΕΡΑ

Για τη περαιτέρω διερεύνηση της σχέσης μεταξύ των θερμοκρασιών του εδάφους και του ατμοσφαιρικού αέρα εφαρμόζεται η ανάλυση παλινδρόμησης και εξετάζεται η συσχέτιση που παρουσιάζουν οι αντίστοιχες θερμοκρασίες. Ο προσδιορισμός των κατάλληλων εξισώσεων τάσης έχει αποδειχθεί ότι παρέχει εκτίμηση της θερμοκρασίας του εδάφους σε συγκεκριμένο βάθος, σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία του αέρα. [23]

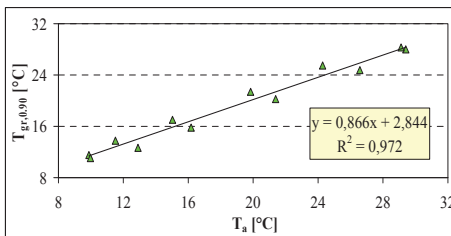
Στην εικόνα 9 φαίνεται η συσχέτιση των μέσων μηνιαίων τιμών της εξεταζόμενης περιόδου για τα βάθη 0,30, 0,60, 0,90, 1,20m μαζί με την εξίσωση της γραμμής τάσης και τις τιμές του συντελεστή προσδιορισμού (R^2). Από τις εικόνες φαίνεται ότι για τα βάθη μέχρι και 0,90m η συσχέτιση είναι πολύ υψηλή (μεγαλύτερη από 0,99), γεγονός που σημαίνει ότι η θερμοκρασία του εδάφους προσδιορίζεται σχεδόν αποκλειστικά από τη θερμοκρασία του αέρα και ότι οι εξισώσεις συσχέτισης που προσδιορίστηκαν περιγράφουν τη σχέση της θερμοκρασίας του εδάφους με αυτήν την θερμοκρασία της ατμόσφαιρας.



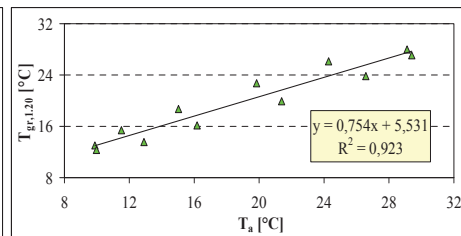
Βάθος: 0,30 m



Βάθος: 0,60 m



Βάθος: 0,90 m

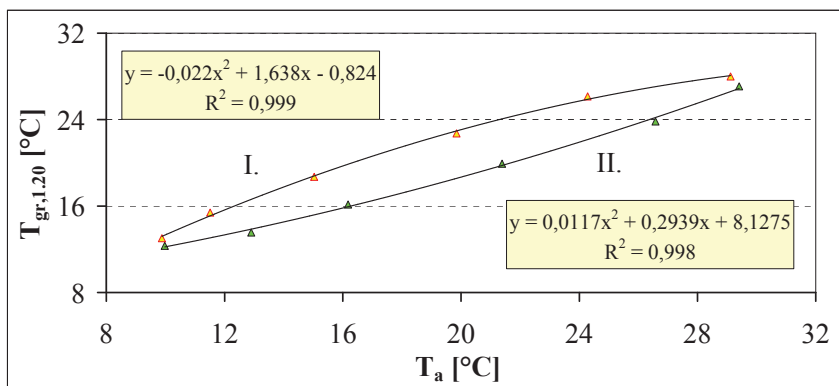


Βάθος: 1,20 m

Εικόνα 9: Συσχέτιση μέσων μηνιαίων θερμοκρασιών εδάφους (T_{gr}) και αέρα (T_a) της περιόδου 1999-2012.

Στα 1,20m η συσχέτιση μειώνεται αισθητά λαμβάνοντας την τιμή 0,923. Παρατηρούμε όμως ότι οι θερμοκρασίες στα 1,20m κατανέμονται συμμετρικά ως προς την ευθεία γραμμή τάσης. Οι τιμές κάτω από τη γραμμή τάσης αναφέρονται στην περίοδο από το Φεβρουάριο έως τον Ιούλιο, όταν η θερμοκρασία του εδάφους αυξάνει σταδιακά, ενώ οι τιμές πάνω από τη

γραμμή τάσης αναφέρονται στην περίοδο από τον Αύγουστο έως τον Ιανουάριο, όταν η θερμοκρασία του εδάφους μειώνεται σταδιακά. Αυτή η συμπεριφορά μπορεί να χαρακτηριστεί φυσιολογική, καθώς το έδαφος σε μεγάλα βάθη χαρακτηρίζεται υψηλή θερμοκρασιακή σταθερότητα και οι θερμοκρασίες του εμφανίζουν μια υστέρηση στην ανταπόκριση στις εποχιακές μεταβολές της θερμοκρασίας του αέρα. Η συμπεριφορά αυτή επιβεβαιώνεται και από άλλες εργασίες [20, 22, 23]. Αν εξετάσουμε τις θερμοκρασίες σε δύο ξεχωριστές ομάδες που να καλύπτουν τις περιόδους αύξησης (Φεβρουάριος έως και Ιούλιος) και μείωσης (Αύγουστος έως και Ιανουάριος) της θερμοκρασίας του εδάφους, η συσχέτιση είναι ιδιαίτερα υψηλή και προσεγγίζει την μονάδα (βλ. Εικόνα 10).



Εικόνα 10: Συσχέτιση της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας του εδάφους (T_{gr}) και του αέρα (T_a) σε βάθος 1,20 cm της περιόδου 1999-2012.
(I. Αύγουστος-Ιανουάριος και II. Φεβρουάριος-Ιούλιος)

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η θερμοκρασία του εδάφους είναι ένα μέγεθος που παρουσιάζει σημαντική ημερήσια, εποχική αλλά και ετήσια διακύμανση, ακολουθώντας τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας του ατμοσφαιρικού αέρα. Η διακύμανση αυτή παρουσιάζεται μεγαλύτερη κοντά στην επιφάνεια του εδάφους και μειώνεται σε μεγαλύτερα βάθη. Η επίδραση του φαινομένου αυτού μειώνεται με την αύξηση του βάθους από την επιφάνεια, καθώς όλο και μικρότερο κλάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας φτάνει στα μεγαλύτερα βάθη. Για τον προσδιορισμό του βάθους ισορροπίας απαιτούνται μετρήσεις σε μεγαλύτερα βάθη έως και 15m.

Η μέση μέγιστη θερμοκρασία της περιόδου εμφανίζεται στην γυμνή επιφάνεια ενώ η μέση ελάχιστη θερμοκρασία εμφανίζονται για την επιφάνεια καλυμμένη με χορτάρι και είναι αντίστοιχα 63,88 °C και -1,49 °C.

Η θερμοκρασία του εδάφους συσχετίζεται πολύ καλά με τη θερμοκρασία του αέρα σε όλα τα εξεταζόμενα βάθη. Στα μικρά βάθη η συσχέτιση εκφράζεται από ευθεία γραμμή τάσης, ενώ στο βάθος 1,2m η συσχέτιση είναι επίσης ιδιαίτερα υψηλή αρκεί να γίνει σε δύο περιόδους, στην περίοδο αύξησης της θερμοκρασίας του εδάφους (Φεβρουάριος έως και Ιούλιος) και στην περίοδο μείωσης της θερμοκρασίας του εδάφους (Αύγουστος έως και Ιανουάριος). Ο προσδιορισμός αναλυτικών εξισώσεων έχει μεγάλη πρακτική αξία αφού επιτρέπει την εκτίμηση της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας του εδάφους αν είναι γνωστή η αντίστοιχη θερμοκρασία του ατμοσφαιρικού αέρα, η οποία είναι μέγεθος ευρέως διαθέσιμο.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστούμε το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών για την παροχή των απαραίτητων μετρήσεων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Caneta Research, "Commercial/Institutional ground-source heat pump. Engineering manual", ISBN 1-883413-21-4, ASHRAE, 1995.
- [2] El-Din M.S., "On the heat flow into the ground", *Renewable Energy* 18 (1999) 473-490.
- [3] Schmidt W., Gonsold W., Enz J., "A decade of air-ground exchange from Fargo North Dakota", *Global and Planetary Change* 29 (2001) 311-325.
- [4] Beltrami H., "On the relationship between ground temperature histories and meteorological records: a report on Pomquet station", *Global and Planetary Change* 29 (2001) 327-348.
- [5] Mihalakakou G., Santamouris M., Lewis J.O., Asimakopoulos D.N., "On the application of the energy balance equation to predict ground temperature profiles", *Solar Energy* 60 (1997) 181-190.
- [6] Michopoulos A., Papacostas K., Mavrommatis Th., Kyriakis N., "Comparative Assessment of eight models predicting the ground temperature", *JP Journal of Heat and Mass Transfer*, V.4, n.2 (2010) 119-135.
- [7] Katsura T., Nagano K., Takeda S., "Method of calculation of the ground temperature for multiple ground heat exchangers", *Applied Thermal Engineering* 28 (2008) 1995-2004.
- [8] Mazou, Tsiros, Alvertos, Lykoudis, Garofalakis, "Estimation of soil temperature: time and frequency domain modeling", *Proc. 10th COMECAP*, 2010.
- [9] Chowa T.T., Longa H., Mokb H.Y., Li K.W., "Estimation of soil temperature profile in Hong Kong from climatic variables", *Energy and Buildings* 43 (2011) 3568-3575.
- [10] Saskia M. van Manen, Erin Wallin, "Ground temperature profiles and thermal rock properties at Wairakei, New Zealand", *Renewable Energy* 43 (2012) 313-321.
- [11] Khedari J., Permchart W., Pratinthong N., Thepa S., Hirunlabh J., "Field study using the ground as a heat sink for the condensing unit of an air conditioner in Thailand", *Energy* 26 (2001) 797-810.
- [12] Beltrami H., Kellman L., "An examination of short- and long-term air-ground temperature coupling", *Global and Planetary Change* 38 (2003) 291-303.
- [13] Florides G., Pouloupatis P.D., Kalogirou S., Messaritis V., Panayides I., Zomeni Z., Partasides G., Lizides A., Sophocleous E., Koutsoumpas K., "Geothermal properties of the ground in Cyprus and their effect on the efficiency of ground coupled heat pumps", *Renewable Energy* 49 (2013) 85-89.
- [14] Santamouris M., Mihalakakou G., Argyriou A., Lewis J., "On the performance of buildings coupled with earth to air heat exchangers.", *Solar energy*, Vol 54, No. 6 pp.375-380, 1995.
- [15] Mihalakakou G., Santamouris M., Asimakopoulos D.N., Argyriou A., "On the ground temperature below buildings", *Solar Energy* 55/5 (1995) 355-362.
- [16] Jakobides C.P., Mihalakakou G., Santamouris M., Lewis J., "On the ground temperature profile for passive cooling application in buildings", *Solar Energy* 57/3 (1996) 167-175.
- [17] Mihalakakou G., Santamouris M., Lewis J., "The influence of different ground covers on heating potential of earth-to-air heat exchangers", *Renewable Energy* 7/1 (1996) 33-46.
- [18] Mihalakakou G., "On estimating soil surface temperature profiles", *Energy and Buildings* 34 (2002), 251-259.
- [19] Mihalakakou G., "On the heating potential of a single buried pipe using deterministic and intelligent techniques", *Renewable Energy* 28 (2003) 917-927.
- [20] Κουτελιδα, Ψυλόγλου, Τσίρος, "Μελέτη διακύμανσης της θερμοκρασίας εδάφους σε διάφορα βάθη για την περιοχή της Αθήνας", *Proc. 10th COMECAP*, 2010.
- [21] Goutsidou, J., Makrogiannis, T., Panayiotopoulos, K., "Soil temperature regime of an Entisol in Thessaloniki, Greece", *Int. Agrophysics*, 6/1-2, 1992, 33-42.
- [22] Τσιλιγκιρίδης Γ., Σπαντιδάκης Γ., Χατζημωυσιάδης Σ., "Μελέτη της θερμοκρασιακής συμπεριφοράς του εδάφους στο σταθμό μέτρησης του Α.Π.Θ.", *πρακτικά 7^{ου} Εθνικού Συνεδρίου για τις Ήπιες Μορφές Ενέργειας*, τομ. Β', (2002) 115-124.
- [23] Tsilingiridis G., Papakostas K., "Investigating the relationship between air and ground temperature variations in shallow depths in northern Greece", *Energy* 73 (2014) 1007-1016.

ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΕΝΤΟΣ ΑΣΤΙΚΟΥ ΙΣΤΟΥ

Φεΐδαρος Δημήτριος^{1*}, Μπαξεβάνου Αικατερίνη¹, Τσαγκρασούλης Άρης²

Μπαρτζάνας Θωμάς¹, Κίττας Κωνσταντίνος²

¹Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης - Ινστιτούτο Έρευνας Τεχνολογίας & Ανάπτυξης Θεσσαλίας, Δημητριάδος 95 & Παύλου Μελά, Βόλος, TK 38333, dfeid@ireteth.certh.gr, cbaxe@ireteth.certh.gr, bartzanas@ireteth.certh.gr

²Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, Πεδίον Άρεως, Βόλος, TK 38334, atsagras@arch.uth.gr

³Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, Τμήμα Γεωπονίας, Φυτικής Παραγωγής & Αγροτικού Περιβάλλοντος, Οδ. Φυτόκου, Νέα Ιωνία, TK 38446, ckittas@agr.uth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σύμφωνα με τις καταγραφές της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ), το 40% της ενέργειας στην καταναλώνεται στον κτηριακό τομέα και αφορά εκτός από την κάλυψη αναγκών θέρμανσης, και την ψύξη. Κάτι που οφείλεται στην επιδείνωση του αστικού περιβάλλοντος λόγω της πυκνής δόμησης και στα τεχνικά μέσα που χρησιμοποιούνται για την επίτευξη εσωτερικών συνθηκών θερμικής άνεσης. Η πυκνή δόμηση και έλλειψη πρασίνου αποτελούν τις κύριες αιτίες του φαινομένου της αστικής θερμικής νησίδας που καταπονεί θερμικά μεγάλες ομάδες πληθυσμού του αστικού ιστού κατά τις θερινές περιόδους. Η βελτίωση αυτής της κατάστασης απαιτεί αντιμετώπιση σε επίπεδο πόλης καθιστώντας τις αναπλάσεις ελευθέρων αστικών και περαστικών εκτάσεων, εργαλεία και μέσα αναβάθμισης της ποιότητα ζωής και των όρων διαβίωσης των κατοίκων για την βελτίωση του μικροκλίματος σε άμεσα γειτνιάζοντες πυκνοδομημένους χώρους.

Ένα σύγχρονο εργαλείο που συνδράμει στην διερεύνηση και αξιολόγηση των ευεργετικών επιδράσεων μιας ανάπλασης είναι η εφαρμογή μαθηματικών μοντέλων υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (ΥΡΔ). Αυτό μπορεί να είναι αποτελεσματικό και αξιόπιστο, ανάλογα με το βαθμό της σχολαστικής εφαρμογής, που απαιτεί η σε βάθος γνώση της θεωρίας. Με βάση τα παραπάνω, στην παρούσα εργασία γίνεται χρήση της ΥΡΔ για τη μελέτη των φαινομένων μεταφοράς που αναπτύσσονται εντός μιας αστικής περιοχής του Βόλου κατά τη διάρκεια του θέρους. Συγκεκριμένα, αναπτύσσεται ένα 3Δ μοντέλο, επιλύοντας τις εξισώσεις μεταφοράς με τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων. Στην μοντελοποίηση ενσωματώνονται η θερμική άνωση μέσω της προσέγγισης Boussinesq, η ακτινοβολία που επιλύεται σε 2 φάσματα μήκους κύματος με βάση το μοντέλο Discrete Ordinate (DO), το μοντέλο energy balance για τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας ελευθέρων επιφανειών και της εκπεμπόμενης διάχυτης ακτινοβολίας από αυτές, οι πηγές και οι καταβόθρες θερμότητας, ορμής και τύρβης από την εξατμισιοδιαπνοή των φυτών-δένδρων, των υδατικών στοιχείων, τα θερμικά κέρδη κτηρίων.

Διερευνούνται δύο ημέρες, η θερμότερη ημέρα και η τυπική ημέρα της θερινής περιόδου, με προσομιώσεις μόνιμης κατάστασης ανά 1 ώρα. Από τα παραγόμενα πεδία ταχύτητας και θερμοκρασίας του αέρα και τον υπολογισμό δείκτη θερμικής άνεσης, CP, προκύπτει ότι η περιοχή αντιμετωπίζει πρόβλημα θερμικής καταπόνησης που οφείλεται στις χαμηλές ταχύτητες αέρα λόγω ύπαρξης τοιχείου που την αποκόπτει από τη θαλάσσια αύρα σε συνδυασμό με την έλλειψη πρασίνου, σκιασμένων δημόσιων χώρων και τη χρήση σκουρόχρωμων υλικών για την επίστρωση του εδάφους.

Λέξεις κλειδιά: CFD, αστικός ιστός, θερμική άνεση, ακτινοβολία

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το 40% της ενέργειας στην ΕΕ καταναλώνεται στα κτήρια. Ενώ στο παρελθόν η κατανάλωση ενέργειας αφορούσε κυρίως κάλυψη αναγκών θέρμανσης, σήμερα αφορά εξίσου κάλυψη αναγκών ψύξης. Γεγονός που οφείλεται: α) στην ανάπτυξη και διάδοση της τεχνολογίας ψύξης, και β) στην επιδείνωση του αστικού περιβάλλοντος. Πυκνή δόμηση και έλλειψη πρασίνου ευθύνονται για την ανάπτυξη της αστικής θερμικής νησίδας. Έτσι αν η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας για θέρμανση μπορεί να αντιμετωπιστεί σε επίπεδο κτηρίου, η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας για ψύξη απαιτείται να αντιμετωπιστεί και σε επίπεδο πόλης, καθώς το αστικό περιβάλλον στο οποίο λειτουργεί το κτήριο επιβαρύνει σημαντικά και τις ψυκτικές του ανάγκες και τη λειτουργία των αντλιών θερμότητας. Συνεπώς είναι σημαντική η μελέτη του μικροκλίματος που αναπτύσσεται μέσα στον αστικό ιστό. Πρόκειται για ένα πολυπαραμετρικό πρόβλημα αφού η διαμόρφωση του τελικού πεδίου πιέσεων, ταχυτήτων αέρα και θερμοκρασιών εξαρτάται από παράγοντες όπως: α) οι τοπικές κλιματικές συνθήκες, β) η γεωμετρία και ο προσανατολισμός των κτηρίων, των δρόμων και ανοιγμάτων, γ) τα υλικά που χρησιμοποιούνται στα κτήρια, τους δρόμους και τους ανοιχτούς χώρους, δ) η ύπαρξη πρασίνου και στοιχείων νερού, ε) η θερμότητα που παράγεται στα κτήρια λόγω του μεταβολισμού των ενοίκων και της λειτουργίας των αντλιών θερμότητας κλπ.

Ένας τρόπος περιγραφής αυτού του σύνθετου πεδίου είναι μέσω μετρήσεων. Συχνά οι μετρήσεις χρησιμοποιούνται για την πιστοποίηση μοντέλων υπολογιστικής ρευστομηχανικής ΥΡΔ [1,2]. Οι μέθοδοι ΥΡΔ είναι ένας άλλος σύγχρονος τρόπος για την προσομοίωση των φαινομένων μεταφοράς που λαμβάνουν χώρα εντός του αστικού περιβάλλοντος. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατό κάποιος να έχει πλήρη εικόνα του μικροκλίματος που αναπτύσσεται σε μια περιοχή και ακόμα να εξετάσει πιθανά σενάρια βελτίωσης αυτού μέσω χρήσης κατάλληλων υλικών, προσθήκης στοιχείων νερού, πρασίνου κλπ. Έτσι έχει εξεταστεί με ΥΡΔ [2] το πεδίο ροής εντός αστικού ιστού χωρίς να ληφθεί υπόψη η θερμότητα επικεντρώνοντας τη μελέτη στη μοντελοποίηση του ανέμου και της τύρβης. Έχει αναπτυχθεί μοντέλο ΥΡΔ [3] για την περιγραφή του μικροκλίματος λαμβάνοντας υπόψη και τη μετάδοση θερμότητας και χρησιμοποιώντας ένα Energy Balance μοντέλο για τον προσδιορισμό των οριακών συνθηκών χωρίς άμεση επίλυση της ακτινοβολίας. Έχει αναπτυχθεί μοντέλο [4] για να περιγραφούν τα κτήρια ως πηγές θερμότητας και ακτινοβολίας με στόχο να εκτιμηθεί η συνεισφορά φύτευσης των κτηρίων στη μείωση της θερμοκρασίας του αέρα της πόλης. Ενώ στην [5] αναπτύχθηκε ένα μοντέλο ΥΡΔ για την προσομοίωση στοιχείων πρασίνου και νερού ως καταβόθρες στις εξισώσεις ορμής και ενέργειας. Έτσι αφού αναπτύχθηκε ένα πλήθος μοντέλων για την περιγραφή των παραγόντων που επηρεάζουν το μικροκλίμα [6], κώδικες, ΥΡΔ που συνδυάζουν κάποια από αυτά τα μοντέλα, χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη πραγματικών αστικών ενοστίων (Γκάζι στην Αθήνα [7] ή το κέντρο της Φλώρινας [8]).

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται η μέθοδος της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής για τη μελέτη των φαινομένων μεταφοράς που αναπτύσσονται εντός του αστικού ιστού της πόλης του Βόλου κατά τη διάρκεια του θέρους. Μοντέλο ενεργειακού ισοζυγίου (energy balance) χρησιμοποιείται για την περιγραφή κτηρίων, δρόμων, πρασίνου και στοιχείων νερού ως πηγές ή καταβόθρες θερμότητας. Τα στοιχεία πρασίνου αντιμετωπίζονται ως πορώδη υλικά, ενώ η εξίσωση της ακτινοβολίας επιλύεται άμεσα για δύο φάσματα μήκους κύματος (ορατή ακτινοβολία με $\lambda=0 - 0.76 \mu\text{m}$ και θερμική ακτινοβολία με $\lambda=0.76 - 100 \mu\text{m}$).

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Το πεδίο ροής και τα φαινόμενα μεταφοράς που λαμβάνουν χώρα στο υπολογιστικό πεδίο περιγράφονται από τις Reynolds Averaged Navier-Stokes [9,10] εξισώσεις Συγκεκριμένα επιλύονται οι εξισώσεις της συνέχειας, της διατήρησης της ορμής σε τρεις συνιστώσες (x,y,z), της διατήρησης της ενέργειας καθώς και της διατήρησης της ακτινοβολίας καθώς και οι εξισώσεις που αντιστοιχούν στο μοντέλο τύρβης. Η ροή θεωρείται 3D, μόνιμη, ασυμπίεστη και τυρώδης. Η επίδραση της τύρβης στην αναπτυσσόμενη ροή και τη μετάδοση θερμότητας μοντελοποιήθηκε μέσω του standard k-ε μοντέλου υψηλού αριθμού Re [11]. Η επίδραση της

θερμικής άνωσης μοντελοποιήθηκε χρησιμοποιώντας την προσέγγιση Boussinesq. Η μοντελοποίηση της ακτινοβολίας πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του μοντέλου Discrete Ordinate (DO) [12, 13]. Οι εξισώσεις της ακτινοβολίας λύνονται σε τρεις συνιστώσες και για δύο φάσματα μήκους κύματος. Ένα που αντιστοιχεί στην ορατή ακτινοβολία ($\lambda=0-0.76 \mu\text{m}$) και ένα που αντιστοιχεί στη θερμική ακτινοβολία ($\lambda=0.76-100 \mu\text{m}$). Τα στοιχεία πρασίνου θεωρούνται πορώδη υλικά τα οποία προκαλούν πτώση πίεσης και καταβόθρες θερμότητας.

Στην εξίσωση διατήρησης της ορμής προστίθενται δύο όροι πηγής, ένας που αντιστοιχεί στη θερμική άνωση και ένας που αντιστοιχεί στην πτώση πίεσης λόγω πορώδους [14].

$$S_{u_i} = -\frac{1}{2} \rho_{air} C_d LAD u_i \bar{u} \quad (1)$$

όπου, S_{u_i} ο όρος καταβόθρας για την i -διευθυνση της εξίσωσης της ορμής, ρ_{air} η πυκνότητα του αέρα, $C_d=0.2$ ο συντελεστής οπισθέλκουσας, $LAD=7$ ο δείκτης επιφανειακής πυκνότητας φυλλώματος, u_i η τοπική ταχύτητα στην κατεύθυνση i και \bar{u} το μέτρο της τοπικής ταχύτητας.

Στην εξίσωση της ενέργειας προστίθενται: α) ένας όρος πηγής που αντιστοιχεί στη θερμική ακτινοβολία και υπολογίζεται από το μοντέλο DO, β) ένας όρος πηγής που αντιστοιχεί στα κτήρια, γ) ένας όρος καταβόθρας που αντιστοιχεί στη μείωση της θερμοκρασίας του αέρα λόγω εξατμισοδιαπνοής των στοιχείων πρασίνου και γ) ένας όρος καταβόθρας που αντιστοιχεί στη μείωση της θερμοκρασίας λόγω εξάτμισης των στοιχείων νερού

Τα κτίρια είναι πηγή θερμότητας η οποία προέρχεται: α) από θερμότητα εκλυόμενη από χρήστες, β) θερμότητα εκλυόμενη από εξοπλισμό, γ) θερμότητα εκλυόμενη από φωτισμό, και τέλος δ) θερμότητα εκλυόμενη από συστήματα κλιματισμού. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω υπολογίζεται μια παραγωγή θερμότητας της τάξης των 28 W/m^2 .

Σύμφωνα με τις οδηγίες του Οργανισμού Γεωργίας και Τροφίμων του ΟΗΕ [15], ο μέσος ρυθμός εξατμισοδιαπνοής ETc για δέντρα σε περιοχή με Μεσογειακό κλίμα και χαμηλή υγρασία είναι 6-9 mm/day για θερμοκρασίες άνω των 30°C . Αυτή η ποσότητα αντιστοιχεί σε κατανάλωση θερμότητας ίση με 212 W/m^2 , αν ο μέσος όρος ληφθεί 7.5 mm/day . Η τελική κατανάλωση θερμότητας εξαρτάται από το δείκτη φυλλικής επιφάνειας LAI των δέντρων. Η τιμή αυτή για την υπάρχουσα κατάσταση δέντρων λαμβάνεται ίση με 3, συνολικά κατά μέσο όρο για όλο το πράσινο που υπάρχει στην περιοχή.

Η επιφάνεια του νερού προσομοιώνεται με οριακή συνθήκη τοίχου για λόγους απλοποίησης. Θεωρείται ότι το νερό έχει σταθερή θερμοκρασία 25°C , ενώ ταυτόχρονα αποτελεί καταβόθρα θερμότητας λόγω εξάτμισης. Για μια τυπική καλοκαιρινή μέρα με μέση θερμοκρασία 33°C και σχετική υγρασία 47% η κατανάλωση θερμότητας στο σιντριβάνι υπολογίζεται σε 200 W/m^2 .

Στην εξίσωση της τυρβώδους κινητικής ενέργειας και του ρυθμού σκέδασης προστίθενται οι όροι καταβόθρας S_k και S_ϵ αντίστοιχα, για τη μοντελοποίηση της παρουσίας των στοιχείων πρασίνου [14].

$$S_k = \rho_{air} C_d LAD \bar{u}^{-3} \quad (2) \quad \text{και} \quad S_\epsilon = \frac{\epsilon}{k} \rho_{air} C_d LAD \bar{u}^{-3} \quad (3)$$

2.2 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

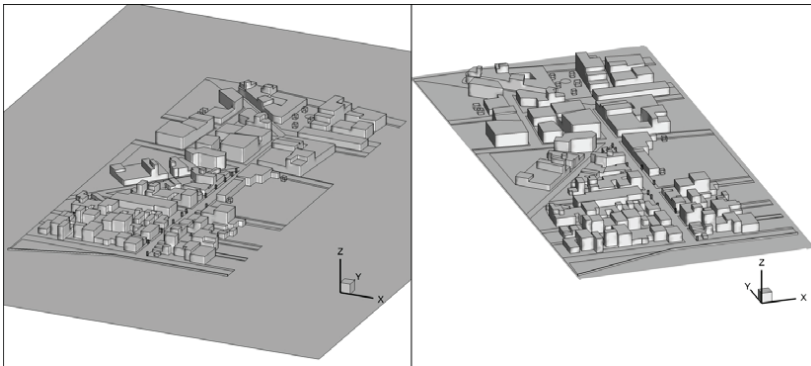
Για την επίλυση των 3D μερικών διαφορικών εξισώσεων Navier Stokes γίνεται με τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων [10]. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό OpenFOAM. Το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε είναι υβριδικό και πολυτμηματικό (multiblock) αποτελείται από 6538192 κελιά και προκύπτει από την σύνθεση 22 γεωμετρικών όγκων block. Οι διακριτοποιημένες εξισώσεις συνέχειας και διατήρησης της ορμής συζευγνύονται με τη χρήση του αλγορίθμου SIMPLE [9]. Δεδομένου ότι στα στερεά όρια χρησιμοποιούνται συναρτήσεις τοίχου η απόσταση του πρώτου υπολογιστικού κελιού έχει επιλεγεί έτσι ώστε η αδιαστατοποιημένη απόσταση y^+ να είναι μεταξύ 10 και 40. Για τη διακριτοποίηση των όρων συναγωγής χρησιμοποιήθηκε το σχήμα ανάτη 2^{15} τάξης ενώ για τους όρους διάχυσης όλων

των εξισώσεων οι κεντρικές διαφορές. Το κριτήριο σύγκλισης για τις εξισώσεις ορμής, πίεσης και συγκεντρώσεων τέθηκε $\epsilon=10^{-5}$ και για την θερμοκρασία και την ακτινοβολία $\epsilon=10^{-6}$.

3. ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

3.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ

Στο Σχήμα 1 δίνεται η γεωμετρία του χώρου προσομοίωσης. Προκειμένου να μη επηρεάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης από τα όρια του χώρου μοντελοποίησης επιλέχθηκε τα όρια αυτά να τεθούν σε απόσταση $8H$ από την περιοχική ενδιαφέροντος, και $6H$ προς τα πάνω (H : το ύψος των κτιρίων) [11, 14]. Έτσι είναι δυνατόν η κάθε πλευρά του χώρου υπολογισμών να χρησιμοποιηθεί ως είσοδος ή έξοδος αέρα ανάλογα με τη φορά του ανέμου η οποία διαφοροποιείται ανάμεσα στη θερμότερη και την τυπική μέρα.



Σχήμα 1. Γεωμετρία του χώρου προσομοίωσης

3.2 ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Ανάλογα με την περίπτωση προσομοίωσης (θερμότερη μέρα και θερμότερη ώρα ή οποιαδήποτε ώρα από την ανατολή του ηλίου κατά τη διάρκεια της τυπικής μέρας) 3 από τις 4 πλευρές της γεωμετρίας του Σχήματος 1 θα έχουν οριακές συνθήκες εισόδου (γνωστές οι τρεις (3) συνιστώσες της ταχύτητας, οι τιμές της τυρβώδους κινητικής ενέργειας, k , καθώς και του ρυθμού σκέδασης, ϵ , και τέλος η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας). Η ίδια οριακή συνθήκη τίθεται και στο άνω όριο. Στην πλευρά από την οποία ο αέρας εγκαταλείπει το πεδίο επίλυσης τίθεται οριακές συνθήκες γνωστής τιμής της πίεσης (ατμοσφαιρική).

Οι δρόμοι, τα πεζοδρόμια, ο αύλειος χώρος του σχολείου καθώς και οι επιφάνειες κάτω από τα δέντρα αντιστοιχούν σε οριακές συνθήκες ισόθερμων τοίχων. Αυτό σημαίνει ότι σε ότι αφορά τις εξισώσεις κίνησης επιβάλλονται οριακές συνθήκες μη-ολίσθησης και μη-εισόδου ενώ σε ότι αφορά τη εξίσωση της ενέργειας τίθεται συγκεκριμένη προδιαγεγραμμένη τιμή θερμοκρασίας η οποία εξαρτάται από την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, τη θερμοκρασία της ατμόσφαιρας, τη θερμοκρασία του εδάφους σε βάθος 15 cm , και των ιδιοτήτων των υλικών (θερμοφυσικών και οπτικών). Σε ότι αφορά την ακτινοβολία θεωρούνται επιφάνειες που εκπέμπουν θερμική ακτινοβολία (διάχυτη) ανάλογα με τη θερμοκρασία τους και το υλικό – χρώμα τους. Ειδικά οι επιφάνειες χαμηλής φύτευσης θεωρούνται τοίχος πεπερασμένου πάχους καταβόθρα θερμότητας λόγω της εξατμισιοδιαπνοής. Οι οροφές και οι περιβάλλοντες τοίχοι των κτιρίων θεωρούνται επίσης ισόθερμοι τοίχοι αλλά με πεπερασμένο πάχος. Στο πεπερασμένο αυτό πάχος θεωρείται ότι παράγεται θερμότητα που αντιστοιχεί στην εκπομπή θερμότητας των κτιρίων στο περιβάλλον λόγω δραστηριοτήτων των ενοίκων, λειτουργίας των συσκευών και τέλος λόγω λειτουργίας των κλιματιστικών. Τα δέντρα αντιμετωπίζονται ως πορώδεις όγκοι που προσθέτουν όρους πηγής και καταβόθρας στις εξισώσεις διατήρησης της ορμής, της τύρβης και της ενέργειας. Τέλος η επιφάνεια του σιντριβανιού θεωρείται επίσης ως ισόθερμος τοίχος.

Για τον υπολογισμό της ταχύτητας του αέρα κάθε συνιστώσας στα διαφορετικά ύψη χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες σχέσεις οι οποίες θεωρούν εκθετική μεταβολή της ταχύτητας του αέρα καθ ύψος και μέχρι του ύψους των 11 μ και στη συνέχεια λογαριθμική μεταβολή. Συνεπώς οι συνιστώσες της ταχύτητας σε ύψος z δίνονται από τις σχέσεις [16].

$$z \leq 11 \rightarrow u_i(z) = u_i \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha \quad (4) \quad \text{και} \quad z > 11 \rightarrow u_i(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (5)$$

όπου, u_i είναι η i -συνιστώσα της ταχύτητας, z το ύψος στο οποίο υπολογίζεται η ταχύτητα, z_{ref} , το ύψος αναφοράς, α ο εκθέτης του εκθετικού νόμου (λαμβάνει υπόψη την τραχύτητα και ο οποίος στην προκειμένη περίπτωση για αστικό περιβάλλον παίρνει την τιμή $\alpha=0.4$), κ , η σταθερά von Karman η οποία λαμβάνει την τιμή $\kappa=0.35$, u_* , η ταχύτητα τριβής και τέλος z_0 είναι το ύψος τραχύτητας το οποίο για αστικό περιβάλλον λαμβάνεται $z_0 = 1$.

Οι τιμές της τυρβώδους κινητικής ενέργειας, k , και του ρυθμού σκέδασης, ε , υπολογίζονται σε κάθε σημείο των επιφανειών με οριακή συνθήκη εισόδου από τις ακόλουθες σχέσεις [14, 17].

$$k_{in} = 0.003 u_i^2, \quad \varepsilon_{in} = \frac{C_\mu^{3/4} k_{in}^{3/2}}{\kappa z} \quad (C_\mu = 0.09) \quad (6)$$

Η θερμοκρασία του εδάφους ως ισόθερμου τοίχου για κάθε υλικό και σε κάθε χρονική στιγμή υπολογίζεται με πρόγραμμα θερμικού ισοζυγίου [3,17] λαμβάνοντας υπόψη την προσπίπτουσα ακτινοβολία, τη θερμοκρασία της ατμόσφαιρας, τη θερμοκρασία του εδάφους σε βάθος 15 cm, τη θερμική αγωγιμότητα του υλικού, το συντελεστή απορρόφησης του υλικού στο φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας και τέλος το συντελεστή εκπομπής του υλικού στο φάσμα της θερμικής ακτινοβολίας. Έτσι λήφθηκε υπόψη η αύξηση της θερμοκρασίας λόγω προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, η μετάδοση θερμότητας από και προς το έδαφος μέσω αγωγής, η μετάδοση θερμότητας από και προς το περιβάλλον μέσω συναγωγής καθώς και η ανταλλαγή θερμικής ακτινοβολίας με τον ουρανό. Η ανταλλαγή θερμικής ακτινοβολίας με τις άλλες επιφάνειες μοντελοποιείται με το μοντέλο DO. Η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε κάθε επιφάνεια στερεού και πορώδους του υπολογιστικού πεδίου υπολογίζεται βάσει της κλίσης και του προσανατολισμού της επιφάνειας λαμβάνοντας υπόψη και το σκιασμό [18].

Οι οροφές, είτε πρόκειται για δώμα είτε πρόκειται για στέγες, θεωρούνται ότι έχουν πάχος 15 cm, ενώ η περιβάλλουσα τοιχοποιία θεωρείται ότι έχει πάχος 25 cm. Η εσωτερική θερμοκρασία των κτιρίων, που απαιτείται στο πρόγραμμα θερμικού ισοζυγίου, λαμβάνεται 28°C. Σε ότι αφορά τη θερμοκρασία στη περιβάλλουσα υπολογίζονται τρεις τιμές. Μια που αντιστοιχεί σε γυάλινη επιφάνεια, μια σε επιφάνεια τοιχοποιίας ανοιχτόχρωμη και μια σε τοιχοποιία επιφάνειας σκουρόχρωμη και τελικά λαμβάνεται μεσοσταθμική μέση.

3.3 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ

Όλες οι επιφάνειες που αντιστοιχούν σε έδαφος μοιράζονται τις ίδιες θερμοφυσικές ιδιότητες με πυκνότητα $\rho=946 \text{ kg/m}^3$, ειδική θερμοχωρητικότητα $C_p = 1920 \text{ kJ/(kg·K)}$ και θερμική αγωγιμότητα $k=0.35 \text{ W/(m·K)}$. Ενώ οι οπτικές τους ιδιότητες δίνονται στον Πίνακα 3.1.

Οι επιφάνειες που αντιστοιχούν σε οροφές και στέγες κτιρίων μοιράζονται επίσης τις ίδιες θερμοφυσικές ιδιότητες $\rho=950 \text{ kg/m}^3$, $C_p=910 \text{ kJ/(kg·K)}$, και $k=0.24 \text{ W/(m·K)}$, ενώ στέγες καλυμμένες με κόκκινα κεραμίδια. Οι επιφάνειες που αντιστοιχούν σε κάθετους τοίχους διακρίνονται σε αυτές που έχουν ανοιχτό χρώμα και στα υαλοστάσια.

Τελικώς το σύνολο των επιφανειών των κάθετων τοίχων αντιμετωπίζεται ως μια επιφάνεια με μέσες ιδιότητες θεωρώντας ότι το 25% είναι υαλοστάσια και το 75% είναι ανοιχτόχρωμοί τοίχοι με τις ακόλουθες ιδιότητες: $\rho=1021 \text{ kg/m}^3$, $C_p=1590 \text{ kJ/(kg·K)}$, $k=0.26 \text{ W/(m·K)}$, $\alpha=0.24/0.257$, $\rho=0.27$ και $\varepsilon=0.9$. Όπως έχει ήδη αναφερθεί τα δέντρα θεωρούνται πορώδεις όγκοι με συμμετοχή ως στερεά το 60% με τις ακόλουθες θερμοφυσικές και οπτικές ιδιότητες: $\rho=700 \text{ kg/m}^3$, $C_p=2310 \text{ kJ/(kg·K)}$, $k=0.173 \text{ W/(m·K)}$, $\alpha=0.8/0.2$, $\rho=0.2/0.8$ και $\varepsilon=0.975$. Ο

αέρας θεωρείται ότι έχει $C_p=1920 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$, $k=0.0242 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, $\mu=1.789 \times 10^{-5} \text{ (Pa}\cdot\text{s)}$, $\alpha=0$, $\beta=0.00343$, $\rho=0$ και $\varepsilon=0$, ενώ η πυκνότητά του λαμβάνεται ως $\rho=1.225 \text{ kg/m}^3$.

Είδος Επιφανείας	Συντελεστής απορρόφησης, α [-]		Συντελεστής ανάκλασης, ρ [-]		Συντελεστής εκπομπής, ε [-]	
	SR	NIR	SR	NIR	SR	NIR
Άσφαλτος	1.00	1.00	0.00	0.00	0.9	0.9
Πεζοδρόμια	0.90	0.90	0.10	0.10	0.9	0.9
Γκρι οροφές	0.90	0.90	0.10	0.10	0.9	0.9
Κόκκινες στέγες	0.60	0.60	0.40	0.40	0.8	0.8
Ανοιχτόχρωμοί τοίχοι	0.30	0.30	0.70	0.70	0.9	0.9
Υαλοστάσια	0.05	0.10	0.06	0.06	0.9	0.9

Είδος Επιφανείας	Πυκνότητα, ρ [kg/m^3]	Ειδική θερμοχωρ. C_p [kJ/(kgK)]	Θερμική αγωγιμότητα, k [W/(mK)]
Ανοιχτόχρωμοι τοίχοι	1084	1135	0.17
Υαλοστάσια	923	2300	0.39

3.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

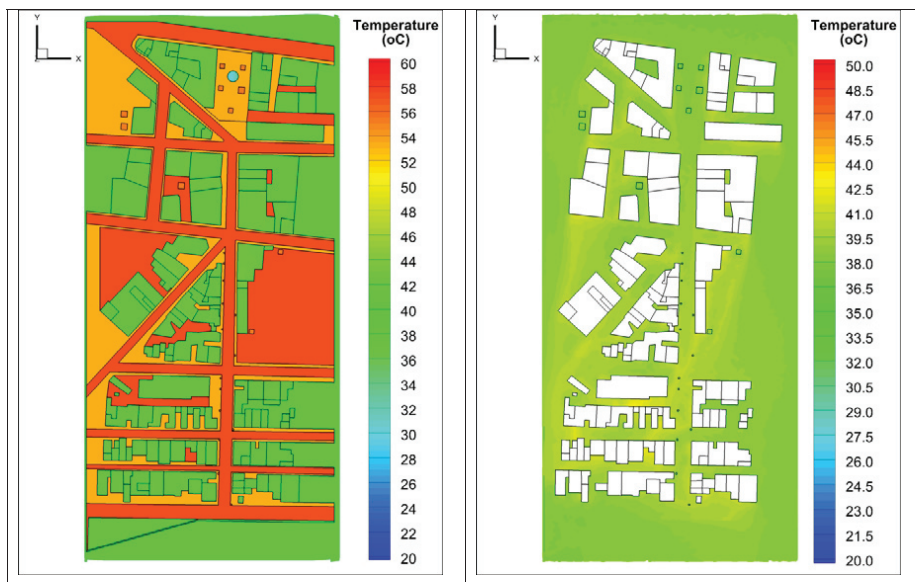
Η υπό μελέτη περιοχή βρίσκεται στο Βόλο και είναι τμήμα της συνοικίας 'παλαιά' η οποία χαρακτηρίζεται από γεωγραφικό πλάτος $\varphi=39^\circ 21.65'$, γεωγραφικό μήκος $L=22^\circ 56.15'$ και υψόμετρο 3 m. Στην περιοχή αυτή υπάρχουν: i) Δημόσια και ιδιωτικά κτίρια ύψους 1 έως και 3 ορόφων. ii) Αύλειο χώρο σχολείου στρωμένο με άσφαλτο, iii) Λιγιστά δέντρα, iv) Πεζοδρόμοι και πεζοδρόμια καλυμμένα με σκούρες πλάκες, v) Δρόμοι καλυμμένοι με κοινή άσφαλτο και vi) Πλατεία η οποία περιλαμβάνει πεζοδρόμο καλυμμένο με σκούρες πλάκες και τσιμέντο, αραιά δέντρα και μικρό σιντριβάνι. Μελετήθηκαν μία τυπική καλοκαιρινή μέρα και η δυσμενέστερη καλοκαιρινή μέρα και ώρα. Κατά τη διάρκεια της τυπικής καλοκαιρινής μέρας πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις μόνιμης κατάστασης ανά 1 ώρα με τα ακόλουθα κλιματικά δεδομένα, θεωρώντας ως τυπική καλοκαιρινή μέρα την 6^η Ιουλίου. Τα δεδομένα ελήφθησαν από το Μετεωρολογικό Σταθμό της ΔΕΥΑΜΒ (Δημ. Επιχ. Ύδρευσης και Αποχέτευσης Μείζονος Βόλου - γεωγραφικό πλάτος $39^\circ 21'45.08''\text{N}$, και μήκος $22^\circ 56'8.37''\text{E}$).

Ωρα	Θερμοκρασία ατμόσφαιρας [C]	Ταχύτητα ανέμου [m/s]	Κατεύθυνση ανέμου [°]	Σχετική υγρασία [%]	Ολική ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο [W/m^2]
6:00	24	0.29	56.14 (NE)	69	11
7:00	23	0.69	329.9 (NW)	66	85
8:00	24	0.73	334.5 (NW)	65	280
9:00	27	0.47	66.31 (NE)	61	520
10:00	29	1.06	176.5 (SSE)	56	805
11:00	29	1.67	184.1 (SSW)	58	1020
12:00	30	2.21	160.6 (SSW)	54	1191
13:00	31	2.23	150.8 (SE)	47	1270
14:00	31	2.19	174 SSE)	43	1204
15:00	33	1.88	184.1 (SSW)	43	1018
16:00	33	1.9	174 (SSE)	42	802
17:00	33	2.19	145.9 (SE)	41	581
18:00	33	2.3	157 (SE)	38	322
19:00	33	1.49	194.2 (SSW)	35	64

Σύμφωνα με τα στοιχεία του προαναφερόμενου σταθμού μέτρησης, η θερμότερη μέρα ανιχνεύθηκε στον Ιούλιο του 2010 και ήταν η 14^η Ιουλίου. Κατά τη διάρκεια αυτής της ημέρας η υψηλότερη θερμοκρασία εμφανίσθηκε κατά την ώρα 16:00 έως 17:00, με θερμοκρασία ατμόσφαιρας 38 °C, ταχύτητα ανέμου 2.76 [m/s] και κατεύθυνση 13° (NNE), σχετική υγρασία 22% και ολική προσπίπτουσα ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο 1022 [W/m²].

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο σχήμα 2 δίνονται οι ισοϋψείς της θερμοκρασίας εδάφους και της θερμοκρασίας του αέρα σε ύψος 1.8 μ από το έδαφος στην εξεταζόμενη περιοχή για τη θερμότερη ώρα και μέρα του καλοκαιριού (16:00 - 14η Ιουλίου 2010).



Σχήμα 2. Ισοϋψείς θερμοκρασίας στο έδαφος και στον αέρα σε ύψος 1.8 μ από το έδαφος

Η θερμοκρασία του εδάφους, με μέση τιμή που ανέρχεται σε 54.47°C, είναι σχετικά χαμηλή διότι κατά τη συγκεκριμένη ώρα σημαντικό τμήμα του οδοστρώματος είναι σκιασμένο. Η μέση χωρική θερμοκρασία σε ύψος 1.8μ ανέρχεται σε 39.45°C, θερμοκρασία αρκετά υψηλή η οποία μπορεί να προκαλέσει έντονο αίσθημα δυσφορίας.

Πίνακας 4. Δείκτης Ισχύος Απόψυξης σε επίπεδο 1.8μ			
Ωρα	Θερμοκρασία αέρα σε ύψος 1.8μ [°C]	Ταχύτητα αέρα σε ύψος 1.8 μ [m/s]	CP σε ύψος 1.8μ
10:00	30.17	0.86	149.93
11:00	30.46	1.08	154.91
12:00	31.74	1.23	128.42
13:00	32.78	1.26	100.52
14:00	32.82	1.23	99.65
15:00	34.41	1.015	52.27
16:00	33.99	1.13	65.61
17:00	33.59	1.235	77.62
18:00	33.19	1.16	86.92

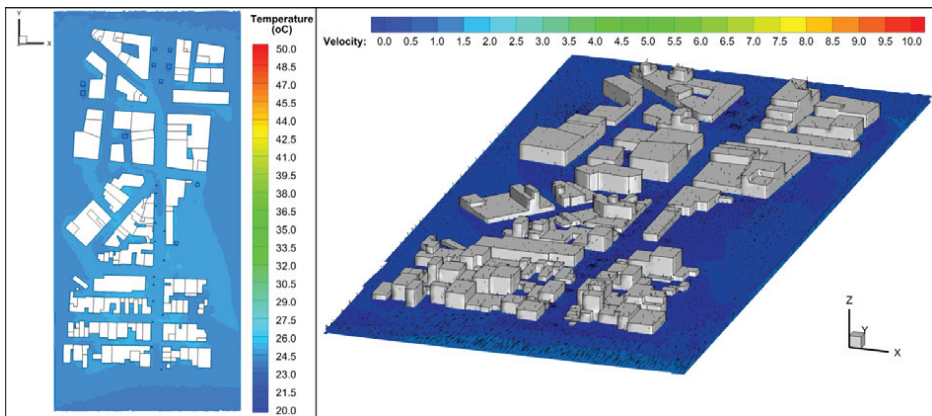
Δεδομένου ότι το αίσθημα δυσφορίας είναι συνάρτηση πολλών παραμέτρων και όχι μόνο της θερμοκρασίας υπολογίστηκε, ως δείκτης θερμικής άνεσης, ο δείκτης Ισχύος Απόψυξης (Cooling Power – CP). Στον πίνακα που ακολουθεί δίνονται η μέση χωρική θερμοκρασία σε

επίπεδο ύψους 1.8μ πάνω από την περιοχή επέμβασης, η μέση τιμή της ταχύτητας του αέρα στο ίδιο επίπεδο, η τιμή του Δείκτη Ισχύος Απώψυξης (CP), για κάθε μία ώρα από τις 10:00 έως τις 18:00 κατά τη διάρκεια μιας τυπικής καλοκαιρινής μέρας, όπως αυτή ορίστηκε στην

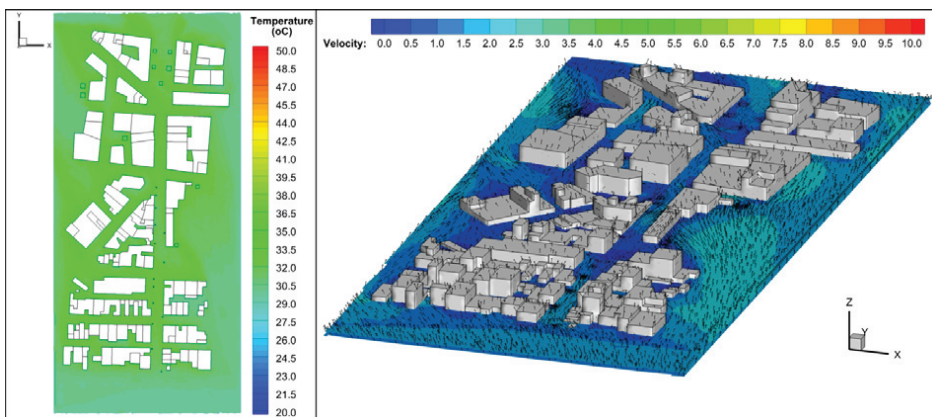
Όπως προκύπτει από τις τιμές του CP, σε όλη τη διάρκεια της ημέρας ο CP υποδηλώνει ότι ο περιπατητής θα έχει την αίσθηση υψηλής θερμότητας, παρά το γεγονός ότι οι θερμοκρασίες δεν είναι ιδιαίτερα υψηλές. Αυτό οφείλεται στις χαμηλές ταχύτητες ανέμου.

Στην περιοχή αναγνωρίζονται δύο πρότυπα ανέμου. Κατά τη διάρκεια της θερμότερης μέρας ο άνεμος είναι Βόρειο-Βόρειο-Ανατολικός. Το ίδιο συμβαίνει και τις πρώτες πρωινές ώρες της τυπικής ημέρας. Στη συνέχεια όμως, και κατά το υπόλοιπο τμήμα της τυπικής ημέρας ο άνεμος γίνεται Νότιος (μεταβάλλεται μεταξύ Νοτιο-Ανατολικού και Νοτιο-Δυτικού) και έρχεται από την πλευρά της θάλασσας. Η ύπαρξη όμως πυκνής δόμησης και ενός μικρού τείχους (ύψους 1μ) στο Νότιο μέτωπο της περιοχής, διατηρεί τις ταχύτητες του ανέμου σε χαμηλά.

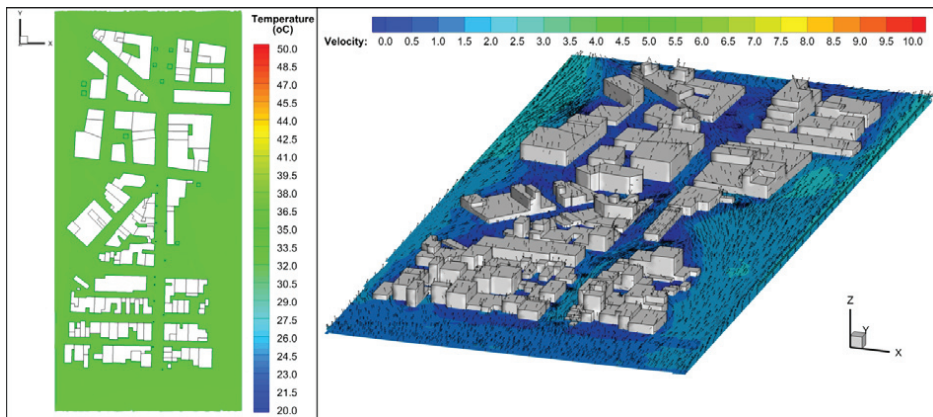
Στα Σχήματα 3 έως 5 το ροϊκό πεδίο δίνεται σε ύψος 1.8μ πάνω από το έδαφος: α) 2D όψη θερμοκρασιακού πεδίου και διανυσμάτων ταχύτητας, β) 3D άποψη ευρύτερης περιοχής με οριζόντια τομή σε ύψος 1.8μ των ισουψών του μέτρου και των διανυσμάτων ταχύτητας, για τις ώρες 8:00, 12:00 και 16:00 της τυπικής καλοκαιρινής μέρας.



Σχήμα 3. Θερμοκρασιακό και ροϊκό πεδίο κατά την ώρα 8:00, σε ύψος 1.8 μ



Σχήμα 4. Θερμοκρασιακό και ροϊκό πεδίο κατά την ώρα 12:00, σε ύψος 1.8 μ



Σχήμα 5. Θερμοκρασιακό και ροικό πεδίο κατά την ώρα 16:00, σε ύψος 1.8 μ

Κατά τις πρωινές ώρες και παρά τις πολύ χαμηλές ταχύτητες του ανέμου η θερμοκρασία διατηρείται σε ανεκτά επίπεδα. Στη συνέχεια η θερμοκρασία αυξάνεται κυρίως ανάμεσα στα κτήρια παρά τη θαλασσινή αύρα με αποτέλεσμα στις απογευματινές ώρες να είναι ήδη αρκετά υψηλή, λόγω και εκπεμπόμενης θερμικής ακτινοβολίας από τα κτήρια και τα υλικά επίστρωσης του εδάφους, σε όλο το υπολογιστικό πεδίο εφόσον η δόμηση και ο νότιος, προς το λιμάνι, τοίχος δεν επιτρέπουν στη θαλάσσια αύρα να ψύξει την περιοχή.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η πρόλεξη του μικροκλίματος μιας αστικής περιοχής είναι πρόβλημα πολυπαραμετρικό και απαιτεί τη μοντελοποίηση πλήθους παραγόντων που το επηρεάζουν. Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε ένα υπολογιστικό μοντέλο λαμβάνοντας υπόψη όχι μόνο τη γεωμετρία και τις τοπικές κλιματικές συνθήκες (ταχύτητα ανέμου, θερμοκρασία αέρα και ηλιακή ακτινοβολία), αλλά και τα υλικά που χρησιμοποιούνται, την ύπαρξη στοιχείων πρασίνου και νερού και τη δραστηριότητα που αναπτύσσεται στα κτήρια επιλύοντας εκτός από τις εξισώσεις διατήρησης της ορμής και της ενέργειας και τις εξισώσεις διατήρησης της ακτινοβολίας και στο ορατό και στο υπέρυθρο φάσμα.

Το μοντέλο που αναπτύχθηκε που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την περιγραφή του μικροκλίματος και τον εντοπισμό περιοχών με δυσμενές μικροκλίμα εντός αστικού ιστού, καθώς και για τον εντοπισμό των προβληματικών χαρακτηριστικών στις οποίες μπορεί να επέμβει κάποιος για να βελτιώσει το μικροκλίμα.

Στην περιοχή που εξετάστηκε προκύπτει ανάγκη επέμβασης βάσει του θερμικού δείκτη και των θερμοκρασιακών και ροικών πεδίων. Δεδομένου ότι τα βασικά προβλήματα είναι οι χαμηλές ταχύτητες αέρα και η αύξηση της θερμοκρασίας λόγω εκπομπής υπέρυθρης ακτινοβολίας από τα κτήρια και το έδαφος, προτείνεται η αναδιαμόρφωση του τοιχίου που χωρίζει την περιοχή από το λιμάνι ώστε να επιτρέπεται η διόδος του αέρα, η φύτευση των δημόσιων χώρων ώστε να υπάρχουν καταβόθρες θερμότητας καθώς και η τοποθέτηση σκιάστρων και τέλος η αντικατάσταση των στοιχείων επίστρωσης του εδάφους με ψυχρά υλικά ή απλά με υλικά με ανοιχτό χρώμα κυρίως σε ότι αφορά τον αύλειο χώρο του σχολείου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Takahashi, K., Yoshida, H., Tanaka, Y., Aotake, N., and Wang, F.L., 2004, "Measurement of thermal environment in Kyoto city and its prediction by CFD simulation", *Energy and Buildings*, 36, pp. 771–779.
- [2] Pospisil J., Jicha, M., Niachou, K., and Santamouris, M., 2005, "Computational modelling of airflow in urban street canyon and comparison with measurements", *Int. J. Environment and Pollution*, 25(1-4), pp. 191-200
- [3] Li, X., Yu, Z., Zhao, B., and Li, Y., 2005, "Numerical analysis of outdoor thermal environment around buildings", *Building and Environment*, 40, pp. 853–866.
- [4] Ashie, Y., Thanh Ca, V., and Asaeda, T., 1999, "Building canopy model for the analysis of urban climate", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 81, pp. 237-248.
- [5] Robitu, M., Musy, M., Inard, C. and Groleau, D., 2006, "Modeling the influence of vegetation and water pond on urban microclimate", *Solar Energy*, 80, pp. 435–447.
- [6] Mirzaei, P.A., and Haghghat, F., 2010, "Approaches to study Urban Heat Island – Abilities and limitations", *Building and Environment*, 45, pp. 2192-2201.
- [7] Stavrakakis, G.M., Tzanaki, E., Genetzaki, V.I., Anagnostakis, G., Galetakis, G., and Grigorakis, E., 2012, "A computational methodology for effective bioclimatic-design applications in the urban environment", *Sustainable Cities and Society*, 4, pp. 41-57.
- [8] Zoras, St., Tsermentselis, A., Kosmopoulos, P., and Dimoudi, A., 2014, "Evaluation of the application of cool materials in urban spaces: A case study in the center of Florina", *Sustainable Cities and Society*, 13, pp. 223-229.
- [9] 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.
- [10] Ferziger, J.H. and Peric, M., 1996, *Computational Methods for Fluid Dynamics*, Springer, London.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Gromke, C., Buccolieri, R., Sabatino, D.S. and Ruck, B., 2008, "Dispersion study in a street canyon with tree planting by means of wind tunnel and numerical investigations – Evaluation of CFD data with experimental data", *Atmospheric Environment*, 42, pp. 8640–8650
- [15] Allen, R.G, Pereira, L.S., Raes, D., and Smith, M., 1998, "FAO Irrigation and drainage ", *FAO paper No. 56*.
- [16] Μπεργελές, Γ., 1995, *Ανεμοκινητήρες, Εκδόσεις ΣΥΜΕΩΝ, Αθήνα*
- [17] Robitu, M., Musy, M., Inard, C., and Groleau, D., 2006, "Modeling the influence of vegetation and water pond on urban microclimate", *Solar Energy*, 80, pp. 435–447.
- [18] Duffie, J.A., and Beckman, W.A., 2006, *Solar engineering of thermal processes*, Wiley, New Jersey, 3rd Edition

ΗΛΙΑΚΑ ΘΕΡΜΙΚΑ

ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΛΥΨΗ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΑΝΑΓΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΧΥΤΕΥΣΗΣ ΣΙΔΗΡΟΥΧΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ

Π. Ν. Μπότσαρης, Ε. Λ. Νταντής, Χ. Τοπάλης

Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Μηχανικών
Παραγωγής & Διοίκησης, Τ.Κ. 67100, Ξάνθη, <http://medilab.pme.duth.gr>, e-mail:
panmpots@pme.duth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται στα πλαίσια της Ενεργειακής Διαχείρισης, η τεχνική και οικονομική κυρίως βιωσιμότητα, εγκατάστασης ηλιοθερμικού συστήματος, για την κάλυψη μέρους της θερμικής ενέργειας που απαιτεί η λειτουργία ενός χυτηρίου σιδηρούχων μετάλλων. Πιο συγκεκριμένα μελετάται η ενεργειακή κάλυψη κατά την κατεργασία της επαναφοράς. Σύμφωνα με τις ενεργειακές απαιτήσεις της θερμικής κατεργασίας, γίνεται η διαστασιολόγηση του ηλιοθερμικού συστήματος και προσδιορίζεται το κόστος εγκατάστασης. Στην συνέχεια γίνεται μελέτη βιωσιμότητας και ανάλυση ευαισθησίας της προτεινόμενης επένδυσης, ενώ τέλος παρουσιάζονται τα συμπεράσματα τα οποία προέκυψαν.

Λέξεις κλειδιά: Ενεργειακή Διαχείριση, εξοικονόμηση ενέργειας, χυτήριο σιδηρούχων μετάλλων, θερμική κατεργασία, ηλιοθερμικό σύστημα.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σύμφωνα με το ενεργειακό ισοζύγιο της χώρας, η συμμετοχή της βιομηχανίας στην συνολική κατανάλωση τελικής ενέργειας ανέρχεται περίπου στο 25,5% (ΕΛ.ΣΤΑΤ. 2011) [1], από την οποία μόνο το 4,4% προέρχεται από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ). Η διαφανόμενη εξάντληση των ενεργειακών αποθεμάτων των συμβατικών καυσίμων του πλανήτη, σε συνδυασμό με την διαρκώς αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας και την βαθμιαία επιδείνωση των περιβαλλοντικών προβλημάτων, έχουν καταστήσει την Ενεργειακή Διαχείριση ιδιαίτερα σημαντικό παράγοντα για την βιώσιμη λειτουργία και ανάπτυξη της βιομηχανίας. Με αφορμή τα παραπάνω, η παρούσα εργασία εστιάζει στον ενεργοβόρο κλάδο της βιομηχανίας μετάλλων [2] και πιο συγκεκριμένα στα χυτήρια σιδηρούχων μετάλλων, όπου εξετάζεται η τεχνική και οικονομική κυρίως βιωσιμότητα της κάλυψης μέρους της θερμικής ενέργειας που απαιτείται για τη λειτουργία τους μέσω ηλιοθερμικών συστημάτων.

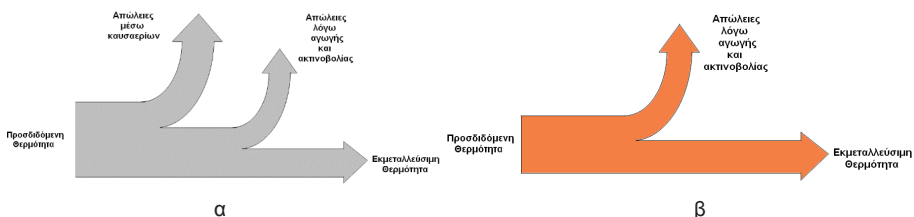
2. ΕΠΙΛΟΓΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ

Οι διεργασίες κατά την διαδικασία παραγωγής, σε μια μονάδα χύτευσης σιδηρούχων μετάλλων, με τις μεγαλύτερες ενεργειακές απαιτήσεις είναι πρωτίστως η τήξη του μετάλλου και έπονται οι θερμικές κατεργασίες [3-6]. Ανόπτηση υφίσταται μόνο το 20% των χυτών που παράγονται στο χυτήριο, ενώ το υπόλοιπο 80% υφίσταται βαφή και επαναφορά, καθώς η επαναφορά έπεται πάντα της βαφής. Τέλος, για το μεγαλύτερο μέρος των θερμικών κατεργασιών χρησιμοποιείται φούρνος προπανίου, ενώ σπάνια σε περιπτώσεις μεγάλου φόρτου χρησιμοποιείται και φούρνος πετρελαίου. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω στοιχεία για τις θερμικές κατεργασίες, επιλέγεται για μελέτη, ως προς την κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων, η κατεργασία της επαναφοράς καθώς:

- Οι θερμοκρασίες που απαιτούνται (450 °C έως 650 °C) είναι πιο χαμηλές σε σχέση με την τήξη και τις υπόλοιπες θερμικές κατεργασίες.
- Η συχνότητα με την οποία απαντάται στη λειτουργία του χυτηρίου είναι ιδιαίτερα υψηλή.
- Ο φούρνος προπανίου που χρησιμοποιείται επιδέχεται τροποποίηση.

3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Κατά τη διεργασία της επαναφοράς στην υφιστάμενη κατάσταση λειτουργίας, ένα σημαντικό μέρος της θερμότητας που προσδίδεται στο φούρνο από την καύση προπανίου, απορρίπτεται μέσω των καυσαερίων, ενώ ένα άλλο μέσω των τοιχωμάτων λόγω αγωγής και ακτινοβολίας. Η εναπομείνουσα θερμότητα είναι η εκμεταλλεύσιμη η οποία προσδίδεται στο χυτό για την άνοδο της θερμοκρασίας του ως τη θερμοκρασία επαναφοράς και την παραμονή του σ' αυτήν. Οι απώλειες και η ροή θερμότητας στο φούρνο αποτυπώνονται στο διάγραμμα Sankey του Σχήματος 1. Με την τροποποίηση του φούρνου, που μελετάται στην παρούσα εργασία, η ενέργεια που απαιτείται για τη διεργασία της επαναφοράς, δεν θα προέρχεται αποκλειστικά από την καύση προπανίου, αλλά και από ένα ηλιοθερμικό σύστημα. Επομένως κατά τη φάση λειτουργίας του φούρνου, δεν θα υπάρχουν πλέον οι απώλειες θερμότητας μέσω των καυσαερίων. Θα υπάρχουν μόνο οι απώλειες μέσω των τοιχωμάτων λόγω αγωγής και ακτινοβολίας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1: Ροή θερμότητας υφιστάμενης κατάστασης (α) και μετά την τροποποίηση του φούρνου (β)

Για τον υπολογισμό επομένως της ενέργειας που πρέπει να παρέχει το ηλιοθερμικό σύστημα κατά την επαναφορά, σύμφωνα και με το παραπάνω διάγραμμα, αρκεί να υπολογιστεί:

1. Η ενέργεια που απαιτείται για την άνοδο της θερμοκρασίας του χυτού και του αέρα του φούρνου από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος έως τη θερμοκρασία επαναφοράς.
2. Οι απώλειες μέσω των τοιχωμάτων λόγω αγωγής και ακτινοβολίας καθ' όλη τη διάρκεια της κατεργασίας.

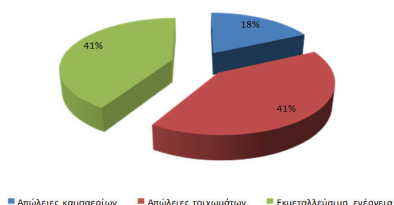
Η προσδιδόμενη ενέργεια επομένως θα είναι το άθροισμα των δύο παραπάνω ενεργειών.

$$Q_{\text{προσδιδόμενη}} = Q_{\text{απαιτούμενη}} + Q_{\text{απωλειών τοιχωμάτων}} \quad (1)$$

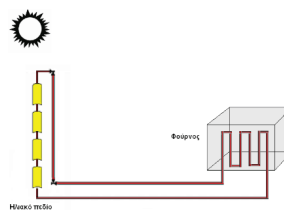
Ο χρόνος παραμονής του χυτού στη θερμοκρασία επαναφοράς εξαρτάται από το πάχος του, οπότε και σ' αυτήν την περίπτωση θεωρείται μια μέση κατάσταση. Θεωρείται λοιπόν ότι το χυτό παραμένει στη θερμοκρασία επαναφοράς για τέσσερις ώρες, επομένως η συνολική διάρκεια της κατεργασίας υπολογίζεται στις επτά ώρες, λαμβάνοντας υπόψη ότι η θερμοκρασία στο φούρνο αυξάνει κατά 150 °C/h. Θεωρείται επίσης ότι ο φούρνος δεν καταναλώνει το ίδιο και τις επτά ώρες, καθώς η λειτουργία του σταματάει όταν φτάσει στην επιθυμητή θερμοκρασία και ξαναρχίζει μόλις πέσει κάτω απ' αυτήν. Για τις πρώτες τρεις ώρες επομένως η κατανάλωση του φούρνου λαμβάνεται 24 kg/h, ενώ για τις υπόλοιπες τέσσερις λαμβάνεται 12 kg/h. Άρα η συνολική κατανάλωση του φούρνου σε προπάνιο για όλη τη διάρκεια της κατεργασίας εκτιμήθηκε σε 120kg ή 59,7m³. Στο Σχήμα 2 παρουσιάζονται όλα τα εκτιμώμενα μεγέθη. Σύμφωνα λοιπόν με τα παραπάνω και την σχέση (1), η θερμική ενέργεια την οποία θα πρέπει να προσδίδει το ηλιοθερμικό σύστημα, για την πλήρη κάλυψη της επαναφοράς είναι:

4. ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Τα ηλιοθερμικά συστήματα εκμεταλλεύονται την ηλιακή ακτινοβολία, η οποία συλλέγεται μέσω κατάλληλων διατάξεων, για την παραγωγή θερμικής ενέργειας. Η θερμική ενέργεια στην συνέχεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε για την κάλυψη θερμικών αναγκών (όπως στην περίπτωση της παρούσας μελέτης), είτε για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ενός κύκλου παραγωγής ενέργειας. Το προτεινόμενο σύστημα είναι τεχνολογίας παραβολικών κατόπτρων, όπου η ηλιακή ακτινοβολία συλλέγεται με τη βοήθεια παραβολικών κοίλων ανακλαστήρων και συγκεντρώνεται στον σωλήνα απορροφής, ο οποίος βρίσκεται κατά μήκος της εστιακής ευθείας των κατόπτρων και διαρρέεται από το μέσο μεταφοράς θερμότητας. Τα κατόπτρα θα έχουν ελάχιστη ανακλαστικότητα 85% θα είναι κατασκευασμένα από φύλλα αλουμινίου ή αντίστοιχης προδιαγραφής υλικό και πιστοποιημένη σύμφωνα με το ευρωπαϊκό πρότυπο EN123975-02:2006. Αρχικά το ρευστό μεταφοράς θερμαίνεται από την ηλιακή ακτινοβολία που συλλέγεται στο ηλιακό πεδίο από τα κατόπτρα. Στην συνέχεια εξέρχεται από αυτό σε θερμοκρασία 390°C και με κατάλληλο δίκτυο σωληνώσεων και αντλιών φτάνει μέχρι τον φούρνο θερμικών κατεργασιών, όπου προσδίδει θερμότητα στο χυτό. Τέλος εξέρχεται από το φούρνο ψυχρότερο για να επιστρέψει στο πεδίο, όπου αναθερμαίνεται, κλείνοντας έτσι τον κύκλο λειτουργίας. Η απλοποιημένη λειτουργία του συστήματος όπως περιεγράφηκε παραπάνω απεικονίζεται στο Σχήμα 3.



Σχήμα 2: Θερμικό ισοζύγιο υφιστάμενης κατάστασης λειτουργίας του φούρνου



Σχήμα 3: Απλοποιημένο λειτουργικό διάγραμμα συστήματος

5. ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙ ΚΟΣΤΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Επαναλαμβανόμενοι συλλέκτες τοποθετημένοι σε παράλληλες σειρές, μαζί με το σύστημα σωληνώσεων και το μέσο μεταφοράς θερμότητας, αποτελούν το ηλιακό πεδίο. Το μέγεθος του ηλιακού πεδίου επηρεάζεται άμεσα από τη ζητούμενη ονομαστική ισχύ του συστήματος, την συνολική ετήσια προσπίπτουσα ακτινοβολία στην περιοχή εγκατάστασης, καθώς και από την ύπαρξη ή μη συστήματος αποθήκευσης της παραγόμενης θερμότητας. Η άμεση προσπίπτουσα ακτινοβολία στην περιοχή της Ξάνθης και γενικότερα της Βόρειας Ελλάδας θεωρείται ίση με $1.700 \text{ kWh/m}^2/\text{y}$, όπως προκύπτει από τον παγκόσμιο χάρτη άμεσης προσπίπτουσας ακτινοβολίας που έχει δημοσιευτεί από την DLR (German Aerospace Center) σε συνεργασία με τη NASA [7]. Η ζητούμενη ονομαστική ισχύς του συστήματος προκύπτει από την απαιτούμενη θερμική ενέργεια για την κάλυψη των αναγκών κατά τη διεργασία της επαναφοράς, η οποία υπολογίστηκε προηγουμένως. Σύμφωνα λοιπόν με τους παραπάνω υπολογισμούς, για επαναφορά η οποία διαρκεί 7 h, απαιτείται θερμική ενέργεια ίση με $1.376,05 \text{ kWh}$, επομένως η εγκατεστημένη ισχύς του συστήματος θα πρέπει να είναι:

$$\text{Επιθυμητή Εγκατεστημένη Ισχύς} = \frac{1376,05 \text{ kWh}}{7 \text{ h}} = 196,58 \text{ kW} \quad (2)$$

Θεωρείται ότι η ισχύς κάθε κατόπτρου που θα χρησιμοποιηθεί είναι 60 KW, επομένως για την συγκεκριμένη εγκατάσταση απαιτούνται συνολικά 4 κάτοπτρα τα οποία θα είναι συνδεδεμένα σε σειρά. Άρα η εγκατεστημένη ισχύς του συστήματος θα είναι:

$$\text{Εγκατεστημένη Ισχύς} = 4 \text{ κάτοπτρα} \cdot 60 \text{ KW} = 240 \text{ KW} \quad (3)$$

Η επιφάνεια του κάθε κατόπτρου θεωρείται 82 m^2 , συνεπώς η συνολική ανακλαστική επιφάνεια θα είναι 328 m^2 . Στην συγκεκριμένη περίπτωση δε χρειάζεται να γίνει υπερδιαστασιολόγηση του πεδίου καθώς το σύστημα δεν θα περιλαμβάνει μονάδα αποθήκευσης. Το μήκος του σωλήνα απορρόφησης ταυτίζεται με το συνολικό μήκος των τεσσάρων συλλεκτών σε σειρά. Το μήκος του κάθε συλλέκτη θεωρείται $13,9 \text{ m}$, άρα το συνολικό μήκος του δέκτη θα είναι περίπου 56 m , με εσωτερική διάμετρο $0,086 \text{ m}$. Το υπόλοιπο δίκτυο σωληνώσεων, δηλαδή οι σωληνώσεις από το πεδίο μέχρι τον φούρνο και από το φούρνο πίσω στο πεδίο αποτελείται από απλούς σωλήνες με συνολικό μήκος 300 m και εσωτερική διάμετρο $0,062 \text{ m}$. Ως ρευστό μεταφοράς χρησιμοποιείται το συνθετικό έλαιο Therminol VP-1, ένα εύτηκτο μίγμα που αποτελείται σε ποσοστό $73,5 \%$ από οξείδιο του διφαινυλίου και $26,5\%$ από διφαινύλιο. Για την κυκλοφορία του υγρού είναι απαραίτητη η ύπαρξη αντλιών κυκλοφορίας και δοχείου διαστολής καθώς επίσης και ενός συστήματος αζώτου το οποίο θα διατηρεί το υγρό υπό πίεση. Επίσης υπολογίστηκε ότι, στην συγκεκριμένη εγκατάσταση απαιτούνται $1.304,88 \text{ kg}$ συνθετικού ελαίου. Τέλος, για την προστασία και την σωστή λειτουργία της εγκατάστασης, θα εγκατασταθεί ένας φράχτης για τον άνεμο και την σκόνη, καθώς και ένας μετεωρολογικός σταθμός. Όλα τα παραπάνω στοιχεία του ηλιοθερμικού συστήματος συνοψίζονται στον Πίνακα 1. Τα οικονομικά στοιχεία για την κοστολόγηση του συστήματος προέκυψαν ύστερα από επικοινωνία με εταιρείες που δραστηριοποιούνται στην αγορά των ηλιοθερμικών τεχνολογιών και αναγωγή μεγεθών από παρόμοια κατασκευασμένα έργα. Σύμφωνα λοιπόν με την παραπάνω διαστασιολόγηση και περιγραφή του συστήματος, τα κόστη των επιμέρους στοιχείων, αλλά και το συνολικό κόστος αποτυπώνονται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 1: Στοιχεία ηλιοθερμικού συστήματος

Στοιχεία συστήματος	
Προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία	$1.700 \text{ kWh/m}^2/\text{y}$
Επιθυμητή εγκατεστημένη ισχύς	$196,58 \text{ KW}$
Ισχύς κατόπτρου	60 KW
Αριθμός απαιτούμενων κατόπτρων	4
Εγκατεστημένη ισχύς	240 KW
Επιφάνεια κατόπτρου	82 m^2

Συνολική ανακλαστική επιφάνεια	328 m ²
Μήκος σωλήνα απορρόφησης	56 m
Μήκος λοιπών σωληνώσεων	300 m
Ρευστό μεταφοράς VP-1	1.304,88 kg
Θερμοκρασία εξόδου ρευστού	390 °C

Πίνακας 2: Κόστη συστήματος

Επιμέρους στοιχεία	Κόστος (€)
Συλλέκτες	67.705
Σωληνώσεις, Μόνωση, Βαλβίδες	10.431
Δοχείο διαστολής, Σύστημα αζώτου	1.266
Αντλίες	1.810
Ρευστό μεταφοράς θερμότητας	3.914
Βάσεις και θεμελίωση	2.896
Φράχτης	50.961
Μετεωρολογικός σταθμός	7.500
Έμμεσα κόστη	14.588
Εργατικά	26.346
Συνολικό κόστος	187.417

6. ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

6.1 . ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ

Ως χρονικός ορίζοντας της ανάλυσης ορίζονται τα **20 έτη** (N=20), θεωρώντας ότι στο τέλος του 20^{ου} έτους το σύστημα δεν έχει κάποια σημαντική ονομαστική αξία. Το αρχικό κόστος εγκατάστασης του συστήματος έχει υπολογιστεί (στρογγυλοποίηση) σε **187.420 €**. Το ετήσιο κόστος συντήρησης λαμβάνεται ως το 2% επί της αρχικής δαπάνης, επομένως ανέρχεται σε **3.748 €**. Ως επιτόκιο αναγωγής χρησιμοποιείται το $i = 2,5\%$. Ως ετήσια έσοδα λαμβάνονται υπόψη, το προπάνιο που εξοικονομείται από τη χρήση του ηλιοθερμικού συστήματος για την κάλυψη μέρους της θερμικής ενέργειας κατά τη διεργασία της επαναφοράς. Θεωρείται ότι πραγματοποιούνται **4 διεργασίες επαναφοράς την εβδομάδα**, και ότι το σύστημα δεν χρησιμοποιείται τις υπόλοιπες μέρες για άλλη διεργασία ή άλλη χρήση (θέρμανση χώρων, νερού, προθέρμανση μετάλλου, προθέρμανση εισερχόμενου αέρα στην καύση κτλ). Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η μέγιστη δυνατή θερμοκρασία εξόδου του συνθετικού ελαίου από το ηλιακό πεδίο είναι 390 °C. Γίνεται λοιπόν αντιληπτό ότι η θερμοκρασία που θα επιτευχθεί στο εσωτερικό του φούρνου από το ρευστό μεταφοράς θα είναι $T < 390$ °C, που απέχει σημαντικά από την επιθυμητή θερμοκρασία των 550 °C. Η επιπλέον ενέργεια που απαιτείται για την κάλυψη αυτής της θερμοκρασιακής διαφοράς θα δίνεται από το συμβατικό καύσιμο, δηλαδή προπάνιο. Για τον υπολογισμό του καυσίμου που εξοικονομείται, γνωρίζοντας το προπάνιο σε kg που απαιτείται για το σύνολο της κατεργασίας στην υφιστάμενη κατάσταση λειτουργίας του φούρνου (120 kg), αρκεί να υπολογιστεί το προπάνιο που χρειάζεται για την επιπλέον ενέργεια μέχρι τη θερμοκρασία των 550 °C. Επειδή είναι αρκετά πολύπλοκο να υπολογιστεί η ακριβής θερμοκρασία που θα επιτευχθεί στο εσωτερικό του φούρνου από το ρευστό μεταφοράς του ηλιοθερμικού, θα θεωρηθούν ως προς αυτήν τα εξής τρία σενάρια:

(Αισιόδοξο) Σενάριο 1^ο : Η θερμοκρασία που επιτυγχάνεται στο εσωτερικό του φούρνου από το ηλιοθερμικό σύστημα είναι 390 °C και η ενέργεια που υπολείπεται για την άνοδο της θερμοκρασίας από τους 390 °C στους 550 °C προσδίδεται από την καύση προπανίου.

(Ρεαλιστικό) Σενάριο 2^ο : Η θερμοκρασία που επιτυγχάνεται στο εσωτερικό του φούρνου από το ηλιοθερμικό σύστημα είναι 290 °C και η ενέργεια που υπολείπεται για την άνοδο της θερμοκρασίας από τους 290 °C στους 550 °C προσδίδεται από την καύση προπανίου.

(Απαισιόδοξο) Σενάριο 3^ο : Η θερμοκρασία που επιτυγχάνεται στο εσωτερικό του φούρνου από το ηλιοθερμικό σύστημα είναι 190 °C και η ενέργεια που υπολείπεται για την άνοδο της θερμοκρασίας από τους 190 °C στους 550 °C προσδίδεται από την καύση προπανίου.

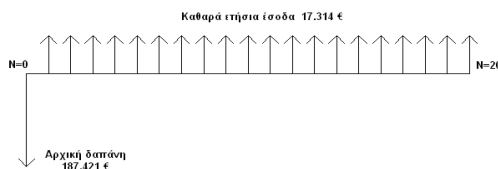
Από τα παραπάνω τρία σενάρια, το πρώτο χαρακτηρίζεται ως ιδανικό και στην πράξη ουσιαστικά μη εφικτό. Το δεύτερο είναι το καλό σενάριο, το οποίο είναι το πιο πιθανό και ρεαλιστικό, ενώ το τρίτο είναι το κακό σενάριο.

6.2. ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ 1^ο: ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΦΟΥΡΝΟΥ $T_1=390\text{ }^\circ\text{C}$

Για να υπολογιστούν τα ετήσια έσοδα από την εξοικονόμηση προπανίου, αρκεί να υπολογιστεί η ποσότητα προπανίου σε kg που απαιτείται για την άνοδο της θερμοκρασίας από τους $390\text{ }^\circ\text{C}$ στους $550\text{ }^\circ\text{C}$ και στην συνέχεια να αφαιρεθεί από την συνολική ποσότητα που απαιτείται για όλη τη διεργασία στην υφιστάμενη κατάσταση λειτουργίας, η οποία είναι 120 kg. Αρχικά υπολογίζεται η απαιτούμενη ενέργεια για την αύξηση της θερμοκρασίας χυτού και αέρα από τους $390\text{ }^\circ\text{C}$ στους $550\text{ }^\circ\text{C}$ είναι . Λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες καυσαερίων και τοιχωμάτων (Σχήμα 1), η ενέργεια που θα πρέπει να προσδίδει το καύσιμο για την κάλυψη της παραπάνω ενέργειας αλλά και των απωλειών που μόλις αναφέρθηκαν είναι $Q_{\text{καυσίμου}} = 515,92\text{ KWh}$, η οποία σύμφωνα με τη θερμογόνο δύναμη του προπανίου, προσδίδεται από 37 kg καυσίμου. Επομένως η εξοικονόμηση σε προπάνιο για μία μόνο διεργασία επαναφοράς θα είναι $120-37 = 83\text{ kg}$. Σύμφωνα με την παραδοχή, ότι το σύστημα χρησιμοποιείται 4 φορές την εβδομάδα, δηλαδή 208 φορές το χρόνο, η ετήσια εξοικονόμηση προπανίου ανέρχεται σε 17.264 kg. Άρα λαμβάνοντας υπόψη την τιμή ανά κιλό προπανίου, η οποία ανέρχεται σε 1,22 €/kg (02/2014) και θεωρώντας την τιμή αυτή σταθερή και χωρίς ανατιμήσεις, τα ετήσια έσοδα για αυτό το σενάριο διαμορφώνονται σε 21.062 €. Αφαιρώντας το ετήσιο κόστος συντήρησης, τα καθαρά ετήσια έσοδα ανέρχονται σε 17.314 €. Όλα τα παραπάνω στοιχεία παρουσιάζονται και για τα τρία σενάρια, συγκεντρωτικά στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3: Οικονομικά στοιχεία και Οικονομικοί δείκτες Σεναρίων	
Οικονομικά Στοιχεία	Σενάριο 1ο
$Q_{\text{απαιτούμενη}}$	211.53 KWh
$Q_{\text{καυσίμου}}$	515.92 KWh
Απαιτούμενο προπάνιο	37 kg
Εξοικονόμηση σε προπάνιο από μια κατεργασία	83 kg
Χρήση συστήματος ανά εβδομάδα	4 φορές
Ετήσια χρήση συστήματος	208 φορές
Ετήσια εξοικονόμηση προπανίου	17.264 kg
Τιμή προπανίου ανά κιλό	1,22 €/kg
Ετήσια έσοδα από εξοικονόμηση προπανίου	21.062 €
Ετήσιο κόστος συντήρησης	3.748 €
Καθαρά ετήσια έσοδα	17.314 €
Αρχική δαπάνη	187.421 €
Οικονομικοί Δείκτες	Σενάριο 1ο
ΚΠΑ	82.490 €
IRR	6,70%
Περίοδος αποπληρωμής	12,78 έτη

Σύμφωνα λοιπόν με τα παραπάνω οικονομικά στοιχεία η ταμειακή ροή της επένδυσης, για το συγκεκριμένο σενάριο, έχει την μορφή του σχήματος 4.

Σχήμα 4 Ταμειακή ροή 1^{ου} Σεναρίου

Η Καθαρή Παρούσα Αξία της παραπάνω ταμειακής ροής υπολογίζεται από την σχέση (4):

$$ΚΠΑ = \text{Καθαρά ετήσια έσοδα} \cdot \left[\frac{(1+i)^N - 1}{i \cdot (1+i)^N} \right] - \text{Αρχική δαπάνη} \quad (4)$$

όπου N ο χρονικός ορίζοντας της μελέτης και i ο Συντελεστής Επικαιροποίησης (ΣΕ), τα οποία έχουν οριστεί προηγουμένως στις παραδοχές σε 20 έτη και 2,5% αντίστοιχα. Από την (4) προκύπτει ότι η ΚΠΑ ισούται με 82.490 €. Ο Εσωτερικός Ρυθμός Απόδοσης (IRR) της ταμειακής ροής, είναι ο Συντελεστής Επικαιροποίησης ο οποίος μηδενίζει την ΚΠΑ. Με δοκιμές προκύπτει τελικά ότι ο IRR ισούται με 6,7%. Τέλος η Περίοδος αποπληρωμής δίνεται από την σχέση (5):

$$\text{Περίοδος αποπληρωμής} = - \frac{\log \left[1 - \frac{K_0 \cdot i}{K_c} \right]}{\log(1+i)} \quad (5)$$

όπου K_0 η αρχική δαπάνη, K_c τα καθαρά ετήσια έσοδα και i ο ΣΕ. Αντικαθιστώντας στην Σχέση (5), προκύπτει ότι ο χρόνος αποπληρωμής στο συγκεκριμένο σενάριο είναι 12,78 έτη. Όλοι οι οικονομικοί δείκτες που υπολογίστηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 3. Σύμφωνα με τον Πίνακα 3, παρόλο που η ΚΠΑ είναι θετική και ο Εσωτερικός Ρυθμός Απόδοσης μεγαλύτερος του Συντελεστή Επικαιροποίησης (ευκαιριακό κόστος χρημάτων), η επένδυση κρίνεται οριακά ως μη βιώσιμη, καθώς ο χρόνος αποπληρωμής είναι μεγαλύτερος της δεκαετίας.

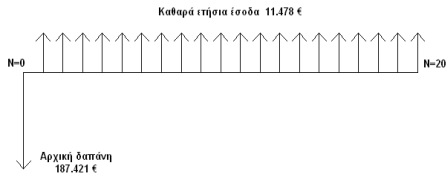
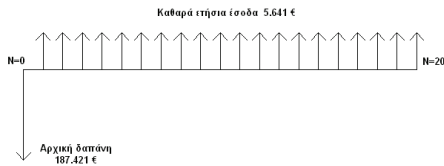
7.3. ΣΕΝΑΡΟ 2^ο: ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΦΟΥΡΝΟΥ $T_2=290$ °C

Εργαζόμενοι με τον ίδιο τρόπο, προκύπτουν για το 2^ο Σενάριο τα στοιχεία του Πίνακα 3. Σύμφωνα λοιπόν με τα παραπάνω οικονομικά στοιχεία η ταμειακή ροή της επένδυσης, για το συγκεκριμένο σενάριο, έχει την μορφή του σχήματος 5. Από την Σχέση (4), όπως υπολογίστηκε και προηγουμένως, η ΚΠΑ για το συγκεκριμένο σενάριο ισούται με -8.489 €. Ο Εσωτερικός Ρυθμός Απόδοσης (IRR) ισούται με 2%, ενώ σύμφωνα με την Σχέση (5), ο χρόνος απόσβεσης ανέρχεται σε 21,25 έτη. (Πίνακας 3). Σύμφωνα και με τους τρεις δείκτες, η επένδυση κρίνεται μη βιώσιμη, αφού η ΚΠΑ είναι αρνητική, ο IRR μικρότερος του 2,5% και ο χρόνος απόσβεσης μεγαλύτερος από τη διάρκεια ζωής του έργου.

7.4. ΣΕΝΑΡΙΟ 3^ο: ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΦΟΥΡΝΟΥ $T_3=190$ °C

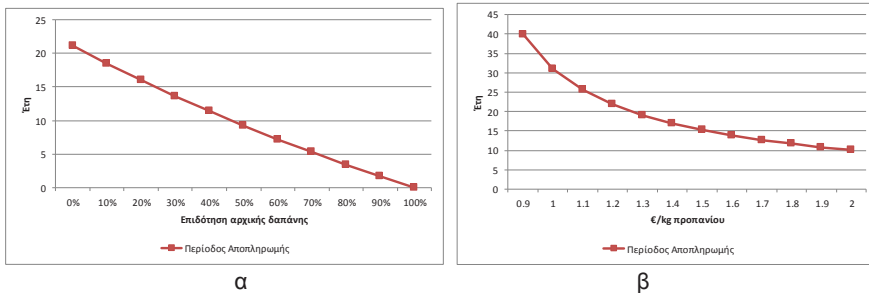
Ακολουθώντας τον ίδιο τρόπο υπολογισμού με τα δύο προηγούμενα σενάρια, προκύπτουν τα οικονομικά στοιχεία του Πίνακα 3. Σύμφωνα λοιπόν με τον Πίνακα 3 η ταμειακή ροή της επένδυσης, για το συγκεκριμένο σενάριο, θα έχει την μορφή του σχήματος 6.

Από την Σχέση (4), όπως υπολογίστηκε και προηγουμένως, η ΚΠΑ για το συγκεκριμένο σενάριο ισούται με -99.483 €. Ο Εσωτερικός Ρυθμός Απόδοσης (IRR) δεν έχει λύση στο πεδίο 0-100%, ενώ σύμφωνα με την Σχέση (5), ο χρόνος απόσβεσης ανέρχεται σε 71,9 έτη. (Πίνακας 3). Από τα παραπάνω είναι προφανές ότι η και σ' αυτή την περίπτωση η επένδυση είναι οικονομικά μη βιώσιμη.

Σχήμα 5: Ταμειακή ροή 2^{ου} ΣεναρίουΣχήμα 6: Ταμειακή ροή 3^{ου} Σεναρίου

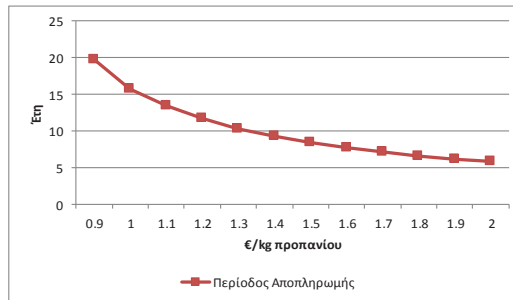
8. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

Όπως προέκυψε από την οικονομική αξιολόγηση που έγινε στις προηγούμενες ενότητες, η επένδυση και στα τρία σενάρια ως προς την θερμοκρασία που θα επιτευχθεί στο εσωτερικό του φούρνου από το ρευστό μεταφοράς, αποδεικνύεται οικονομικά είτε οριακά βιώσιμη είτε μη βιώσιμη. Για το λόγο αυτό, διενεργήθηκε και μια μελέτη ευαισθησίας για τον προσδιορισμό εκείνων των συνθηκών και προϋποθέσεων κάτω από τις οποίες, μπορεί ενδεχομένως η επένδυση να καταστεί τελικώς βιώσιμη. Η ανάλυση ευαισθησίας γίνεται ως προς την περίοδο αποπληρωμής και μόνο για το 2^ο Σενάριο, το οποίο όπως έχει ήδη αναφερθεί, θεωρείται το πιο ρεαλιστικό και πιθανό από τα τρία. Οι παράμετροι οι οποίοι επιδρούν και μεταβάλλουν το δείκτη περιόδου αποπληρωμής και οι οποίοι εξετάζονται είναι α) η συχνότητα χρήσης του συστήματος, β) η επιδότηση της αρχικής δαπάνης και γ) η τιμή του προπανίου. Υπενθυμίζεται ότι στο αρχικό σενάριο θεωρήθηκε πως το σύστημα χρησιμοποιείται 4 φορές την εβδομάδα, δεν υπάρχει επιδότηση επί της αρχικής δαπάνης και ότι η τιμή του προπανίου είναι σταθερή και ανέρχεται σε 1,22 €/kg. Αρχικά εξετάζεται για την ίδια χρήση του συστήματος, πως επηρεάζεται ο χρόνος αποπληρωμής στην περίπτωση που υπάρχει επιδότηση επί της αρχικής δαπάνης, αλλά και από ενδεχόμενη μεταβολή στην τιμή του καυσίμου. Η περίοδος αποπληρωμής διαμορφώνεται ως προς το ποσοστό επιδότησης όπως φαίνεται στο σχήμα 7. Παρατηρεί κανείς ότι, ο χρόνος αποπληρωμής μειώνεται κάτω από τα δέκα χρόνια, δηλαδή η επένδυση καθίσταται βιώσιμη, για επιδότηση επί της αρχικής δαπάνης μεγαλύτερης ή ίσης του 50%. Για μεταβολή στην τιμή διάθεσης του καυσίμου από 0,9 έως 2 €/kg, η περίοδος αποπληρωμής διαμορφώνεται όπως στο σχήμα 7.



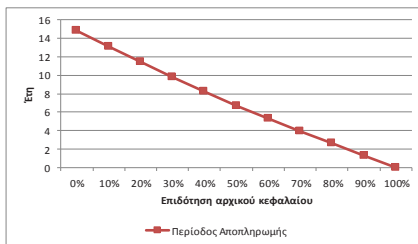
Σχήμα 7: Περίοδος αποπληρωμής (α) αρχικού κεφαλαίου και (β) τιμή προπανίου

Από την καμπύλη του σχήματος 8 παρατηρείται ότι μόνο στην περίπτωση που η τιμή ξεπεράσει τα 2 €/kg, η περίοδος αποπληρωμής αγγίζει τα 10 χρόνια. Αξίζει σ' αυτό το σημείο να δει κανείς πως μεταβάλλεται η περίοδος αποπληρωμής ως προς το καύσιμο, στο πιθανό σενάριο, όπου το σύστημα χρησιμοποιείται και πάλι 4 μέρες τη βδομάδα αλλά ταυτόχρονα επιδοτείται το 40% της αρχικής δαπάνης. (Σχήμα 8)

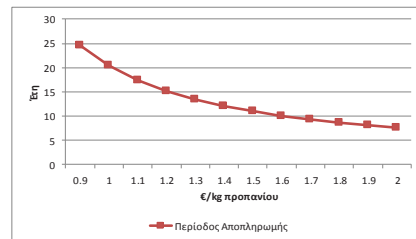


Σχήμα 8: Περίοδος αποπληρωμής ως προς την τιμή προπανίου

Παρατηρείται τώρα ότι η επένδυση καθίσταται βιώσιμη, καθώς η περίοδος αποπληρωμής μειώνεται κάτω της δεκαετίας, αν η τιμή του προπανίου ξεπεράσει το 1,3 €/kg. Αν αυξηθεί η χρήση του συστήματος από 4 σε 5 φορές εβδομαδιαίως, τα ετήσια έσοδα αυξάνονται και επομένως η περίοδος αποπληρωμής μειώνεται. Στο σχήμα 9 φαίνεται πως επηρεάζεται σε αυτή την περίπτωση ο χρόνος αποπληρωμής, από το ποσοστό επιδότησης του αρχικού κόστους εγκατάστασης και την τιμή του καυσίμου αντίστοιχα. Παρατηρείται από τις παραπάνω καμπύλες ότι στην περίπτωση που το σύστημα χρησιμοποιείται 5 μέρες την εβδομάδα, η περίοδος αποπληρωμής μειώνεται κάτω από τα 10 έτη και η επένδυση καθίσταται βιώσιμη, αν υπάρξει επιδότηση του κόστους εγκατάστασης σε ποσοστό μεγαλύτερο του 30% ή αν η τιμή διάθεσης του προπανίου ξεπεράσει το 1,6 €/kg. Βεβαίως επισημαίνεται πως αν υπάρξει συνδυαστικά επιδότηση αλλά και αύξηση του κόστους καυσίμου, η περίοδος αποπληρωμής μειώνεται επιπλέον. Στην περίπτωση που αυξηθεί περαιτέρω η εβδομαδιαία χρήση του συστήματος, η αποπληρωμή επέρχεται γρηγορότερα και ο δείκτης διαμορφώνεται για τα διάφορα σενάρια επιδότησης αλλά και το κόστος καυσίμου, όπως φαίνεται στο σχήμα 10.

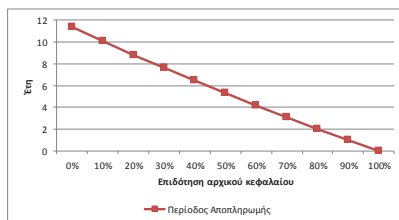


α

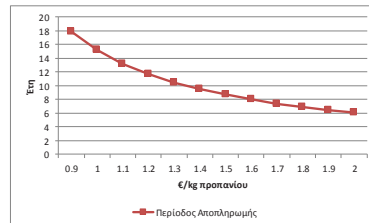


β

Σχήμα 9: Περίοδος αποπληρωμής (α) αρχικού κεφαλαίου και (β) τιμή προπανίου



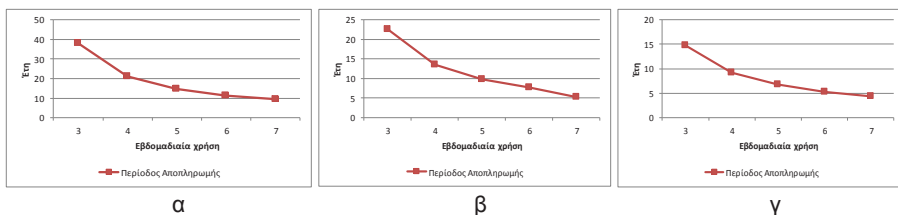
α



β

Σχήμα 10: Περίοδος αποπληρωμής (α) αρχικού κεφαλαίου και (β) τιμή προπανίου

Παρατηρείται ότι, η περίοδος αποπληρωμής μειώνεται κάτω της δεκαετίας αν η επιδότηση του αρχικού κεφαλαίου είναι μεγαλύτερη από 10% ή αν αντίστοιχα η τιμή διάθεσης του προπανίου ξεπεράσει το 1,4 €/kg. Αντίστροφα τώρα θα ήταν ενδιαφέρον να δει κανείς για τα διάφορα σενάρια επιδότησης του αρχικού κεφαλαίου, την εβδομαδιαία χρήση που καθιστά την επένδυση βιώσιμη. Αρχικά στο σενάριο όπου δεν υπάρχει επιδότηση επί της αρχικής δαπάνης, η περίοδος αποπληρωμής αποτυπώνεται στο Σχήμα 11. Παρατηρείται ότι για να καταστεί βιώσιμη η επένδυση, θα πρέπει το σύστημα να χρησιμοποιείται 7 φορές την εβδομάδα, δηλαδή με άλλα λόγια ο φούρνος να δουλεύει καθημερινά, το οποίο είναι μάλλον απίθανο. Στο σενάριο όπου το αρχικό κόστος εγκατάστασης επιδοτείται σε ποσοστό 30%, η αποπληρωμή επιτυγχάνεται με μικρότερη εβδομαδιαία χρήση, όπως φαίνεται και στο σχήμα 11β. Σε αυτή την περίπτωση αρκεί το σύστημα να χρησιμοποιείται 5 φορές την εβδομάδα ώστε η επένδυση να είναι βιώσιμη. Τέλος, παρατηρώντας στο ίδιο σχήμα συμπεραίνει κανείς, ότι για επιδότηση 50% επί της αρχικής δαπάνης, η επένδυση καθίσταται βιώσιμη, ακόμα και αν το σύστημα χρησιμοποιείται 4 φορές εβδομαδιαίως.



Σχήμα 11: Περίοδος αποπληρωμής (α) χωρίς επιδότηση, με επιδότηση (β) 30% και (γ) 50%.

9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση της δυνατότητας (τεχνική εφικτότητα, οικονομική βιωσιμότητα) χρήσης Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, ως μέσου επίτευξης εξοικονόμησης πόρων στα πλαίσια ενός σχεδίου Ενεργειακής Διαχείρισης σε μια βιομηχανία χύτευσης μετάλλων. Προς την επίτευξη του παραπάνω σκοπού, εξετάστηκε η περίπτωση εγκατάστασης ενός ηλιοθερμικού συστήματος για την κάλυψη μέρους της θερμικής ενέργειας που απαιτείται για τη λειτουργία ενός χυτηρίου σιδηρούχων μετάλλων. Πιο συγκεκριμένα εξετάστηκε η δυνατότητα κάλυψης μιας μόνο διεργασίας κατά την παραγωγική διαδικασία. Επιλέχθηκε για μελέτη μία εκ των θερμικών κατεργασιών, η επαναφορά, καθώς πραγματοποιείται στην πλειοψηφία των χυτών που παράγονται και απαιτεί χαμηλότερες θερμοκρασίες συγκριτικά με άλλες εργασίες της παραγωγικής διαδικασίας. Αφού αρχικά υπολογίστηκαν οι ενεργειακές απαιτήσεις της συγκεκριμένης διεργασίας (1.376,05 KWh θερμικής ενέργειας), έγινε η διαστασιολόγηση και έπειτα η κοστολόγηση του προτεινόμενου ηλιοθερμικού συστήματος. Το σύστημα είναι τεχνολογίας παραβολικών κατόπτρων, αποτελούμενο από τέσσερα κάτοπτρα συνδεδεμένα σε σειρά, συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 240 KW. Το κόστος του συγκεκριμένου συστήματος ανέρχεται σε 187.420 €. Διαπιστώθηκε όμως ότι, το σύστημα δεν μπορεί να καλύψει το σύνολο της απαιτούμενης θερμικής ενέργειας για την κατεργασία, καθώς η μέγιστη θερμοκρασία με την οποία εξέρχεται το ρευστό μεταφοράς από το ηλιακό πεδίο είναι 390 °C. Η θερμοκρασία επομένως που επιτυγχάνεται στο εσωτερικό του φούρνου μέσω του ρευστού μεταφοράς είναι ακόμα χαμηλότερη, επομένως η επιπλέον ενέργεια που απαιτείται για την άνοδο της θερμοκρασίας μέχρι τους 550 °C (θερμοκρασία επαναφοράς) θα συνεχίσει να δίνεται από συμβατικό καύσιμο, στην συγκεκριμένη περίπτωση από προπάνιο. Θεωρήθηκαν τρία σενάρια λειτουργίας ως προς τη θερμοκρασία στο εσωτερικό του φούρνου. Στο 1^ο Σενάριο η θερμοκρασία που επιτυγχάνεται είναι $T_1 = 390$ °C, στο 2^ο Σενάριο $T_2 = 290$ °C και στο 3^ο Σενάριο $T_3 = 190$ °C. Και για τα τρία σενάρια έγινε οικονομική αξιολόγηση με τα κριτήρια της Καθαρής Παρούσας Αξίας (ΚΠΑ), του Εσωτερικού Ρυθμού Απόδοσης (EPA) και της περιόδου αποπληρωμής (ΠΑ), θεωρώντας αρχικά ότι το σύστημα θα χρησιμοποιείται

τέσσερις φορές την εβδομάδα, με μηδενική επιδότηση επί της αρχικής δαπάνης και τρέχουσα τιμή προπανίου. Επισημαίνεται ότι, στα ετήσια έσοδα ελήφθησαν υπόψη μόνο τα οφέλη από την εξοικονόμηση του καυσίμου (προπανίου) κατά τη διάρκεια της θερμικής κατεργασίας (επαναφορά), χωρίς να συνυπολογιστούν ενδεχόμενα έσοδα από άλλες χρήσεις του συστήματος, όπως η προθέρμανση του μετάλλου κατά την τήξη, η προθέρμανση του εισερχόμενου στην καύση αέρα, η θέρμανση των χώρων κ.τ.λ. Σύμφωνα λοιπόν με τις παραπάνω παραδοχές, η επένδυση και στα τρία σενάρια αποδείχτηκε οικονομικά οριακά βιώσιμη (1^ο Σενάριο) ή μη βιώσιμη (2^ο και 3^ο). Στην συνέχεια έγινε ανάλυση ευαισθησίας, επί του 1^{ου} Σεναρίου, μεταβάλλοντας την συχνότητα χρήσης του συστήματος, το ποσοστό επιδότησης επί της αρχικής δαπάνης και την τιμή του προπανίου. Από την ανάλυση προέκυψε ότι η επένδυση καθίσταται βιώσιμη για τις ακόλουθες περιπτώσεις α) αν το σύστημα χρησιμοποιείται τέσσερις μέρες την εβδομάδα, θα πρέπει το ποσοστό επιδότησης να είναι μεγαλύτερο από 50% ή η τιμή αγοράς του προπανίου από την επιχείρηση να ξεπεράσει τα 2 €/kg, β) αν το σύστημα χρησιμοποιείται πέντε μέρες, θα πρέπει η επιδότηση να είναι μεγαλύτερη από 30% ή η τιμή διάθεσης του προπανίου να ξεπεράσει το 1,6 €/kg και γ) τέλος, αν το σύστημα χρησιμοποιείται έξι μέρες, θα πρέπει η επιδότηση επί της αρχικής δαπάνης να είναι μεγαλύτερη από 10% ή η τιμή του προπανίου να ξεπεράσει το 1,4 €/kg. Παρατηρείται λοιπόν ότι για να καταστεί βιώσιμη η επένδυση, απαραίτητη προϋπόθεση είναι η επιδότηση της αρχικής δαπάνης, έστω σε κάποιο ποσοστό. Εν ολίγοις, θα πρέπει να δοθούν τα κατάλληλα κίνητρα από πλευράς πολιτείας για να υλοποιηθεί και να φέρει τα επιθυμητά αποτελέσματα μια τέτοια επένδυση.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] http://www.statistics.gr/portal/page/portal/ESYE/PAGE-themes?p_param=A0301&r_param=SIN03&y_param=2011_00&mytabs=0
- [2] http://www.cres.gr/motorchallenge/Praktika/pdf_synedriou/Energy_consumption_Industry.pdf
- [3] Arasu M, Rogers L. Jeffrey (2009) *ENERGY CONSUMPTION STUDIES IN CAST IRON FOUNDRIES*. 57th Indian Foundry Congress
- [4] Creutz Dan, Karlsson Magnus, Söderström Mats, Thollander Patrik. *Reducing industrial energy costs through energy-efficiency measures in a liberalized European electricity market: case study of a Swedish iron foundry*. Applied Energy 81 (2005) 115–126
- [5] Huang Dan, Jie Luo, Qiping Liu, Shifang Su, Weiping Chen, Yongcheng Chen, Yuanyuan Li, Zhe Liu (2010) *Energy conservation and emissions reduction strategies in foundry industry*. CHINA FOUNDRY Vol.7 No.4
- [6] Seweryn Jarża, *IMPORTANCE OF ENERGY MANAGEMENT IN FOUNDRIES*, POLISH JOURNAL OF MANAGEMENT STUDIES, 2011 vol.4
- [7] <http://www.dlr.de/tt/Portaldata/41/Resources/dokumente/institut/system/projects/reacces/snedni60.jpg>

ΤΕΧΝΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΩΝ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΤΜΟΥ

Π. Τσεκούρας^{1*}, Ρ. Χριστοδουλάκη², Ε. Κορωνάκη², Γ. Τσεκούρας, Β. Λαμάρης³,
Π. Λαμάρης³,

^{1*} Μηχανολόγος Μηχανικός ΕΜΠ, e-mail: ptsek@teemail.gr

² Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Εργ.
Εφαρμοσμένης Θερμοδυναμικής

³ SOLE ABEE, Βιομηχανία Ηλιακών Συσκευών

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σε Ευρωπαϊκό επίπεδο το 27% της συνολικής ενέργειας αφορά θερμότητα που καταναλώνεται από τις βιομηχανίες. Το 30% της θερμότητας αυτής αφορά θερμοκρασίες κάτω των 100 °C, το 27% θερμοκρασίες μεταξύ 100 °C και 400 °C και το υπόλοιπο 43% υψηλότερες θερμοκρασίες. Όσον αφορά τις βιομηχανίες στην Ελλάδα, η θερμότητα παράγεται από την κοστοβόρα και ρυπογόνα χρήση των καυσίμων, όπως πετρέλαιο, φυσικό αέριο και μαζούτ. Οι σημαντικές κλιματικές αλλαγές και η αυξητική τάση του κόστους της ενέργειας επιτάσσουν βιώσιμες λύσεις που αξιοποιούν το εγχώριο ηλιακό δυναμικό.

Αξιόπιστη πρόταση στην παραγωγή θερμότητας αποτελούν τα ηλιοθερμικά συστήματα. Για θερμοκρασίες έως 100 °C, οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες είναι η επικρατέστερη τεχνολογία, η οποία υποστηρίζεται από εγχώρια προϊόντα. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες, δηλαδή έως 400 °C, απαιτούνται συλλέκτες με συγκέντρωση ακτινοβολίας, ώστε να μειωθούν δραστικά οι θερμικές απώλειες ενώ ταυτόχρονα να παραμείνει υψηλός ο βαθμός αξιοποίησης της ηλιακής ακτινοβολίας, της τάξης του 40-60%. Παρά το αναμφισβήτητο πλούσιο ηλιακό δυναμικό της Ελλάδας δεν υπάρχουν εγκατεστημένα εμπορικά συστήματα με συγκεντρωτικούς ηλιακούς συλλέκτες μέχρι στιγμής.

Η παρούσα δημοσίευση αφορά την τεchnο-οικονομική μελέτη ενός συγκεντρωτικού ηλιακού συστήματος για παραγωγή ατμού σε βιομηχανία. Επιλέγεται βιομηχανία τροφίμων με ετήσια και καθημερινή λειτουργία. Το ηλιακό σύστημα που μελετάται αποτελείται από συγκεντρωτικούς ηλιακούς συλλέκτες γραμμικής εστίασης, τύπου Fresnel, με θερμικό λάδι ως μέσο μεταφοράς θερμότητας. Αρχικά, παρουσιάζονται ενδεικτικές διατάξεις του ηλιακού συστήματος, εκ των οποίων επιλέγεται μία για την οποία γίνεται η αρχική διαστασιολόγηση του συστήματος. Ακολουθεί η ενεργειακή μελέτη με χρήση υπολογιστικού προγράμματος δυναμικών προσομοιώσεων. Κατά τις παραμετρικές προσομοιώσεις λαμβάνονται υπόψη τεchnο-οικονομικές παράμετροι, όπως ο προσανατολισμός, το επίπεδο θερμοκρασίας και η επιφάνεια των συλλεκτών. Τέλος, παρουσιάζονται τα ενεργειακά αποτελέσματα της προτεινόμενης πρότασης σε συνδυασμό με τα οικονομικά στοιχεία του συστήματος.

Απώτερος στόχος της μελέτης είναι η ανάδειξη της βιωσιμότητας καινοτόμων ηλιοθερμικών τεχνολογιών που παραδόξως δεν τυγχάνουν εφαρμογής έως σήμερα στην Ελλάδα.

Λέξεις κλειδιά: Ηλιακό σύστημα, Συγκεντρωτικοί ηλιακοί συλλέκτες, Τεχνολογία Fresnel, Εξοικονόμηση ενέργειας, Ατμοπαραγωγή

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το 2011, η κατανάλωση ενέργειας στην Ευρώπη έφτασε τους 1109 Mtoe. Ένα τρίτο του ποσού αυτού καταναλώθηκε από τον τομέα μεταφορών (33%), ακολουθούμενο από τον τομέα της βιομηχανίας (26%), τις κατοικίες (25%) και τις υπηρεσίες (13%) [1]. Ο ηλεκτρισμός και το φυσικό αέριο είναι οι σημαντικότερες πηγές ενέργειας για τη βιομηχανία, καταλαμβάνοντας το 32% και το 30% της αγοράς της Ευρώπης αντίστοιχα [2]. Το 2007, οι βιομηχανίες στην Ευρώπη ήταν υπεύθυνες για το 32% των συνολικών εκπομπών CO₂. Τα φορτία ηλεκτρισμού και θερμότητας ήταν υπεύθυνα για το 86% των εκπομπών CO₂ των βιομηχανιών [3].

Σημαντικές διαφορές εντοπίζονται ανάμεσα στα κράτη της Ευρώπης: στη Φιλανδία οι βιομηχανίες αφορούν το 50% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας, ενώ στην Ελλάδα το ποσοστό αυτό είναι λιγότερο από 20% [2]. Στην Ελλάδα, η συνολική παραγωγή πρωτογενούς ενέργειας το 2011 κυμάνθηκε στους 10 Mtoe; 78% από τα οποία παρήχθησαν από λιγνίτη, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (21%) και πετρέλαιο (1%) [1]. Η εγχώρια κατανάλωση το 2011 ήταν 28 Mtoe. Το ποσοστό του πετρελαίου στη συνολική παραγωγή ενέργειας ήταν 48%, του λιγνίτη 27%, ενώ των ΑΠΕ μόνο 8% [1]. Η συνολική κατανάλωση ενέργειας στην Ελλάδα το 2011 ήταν 18,84 Mtoe, 3,32 Mtoe από τα οποία καταναλώθηκαν από τη βιομηχανία [1].

Τρία διαφορετικά επίπεδα θερμοκρασίας περιγράφουν την ποιότητα της ενέργειας που απαιτείται σε κάθε βιομηχανία:

- Χαμηλό θερμοκρασιακό επίπεδο: < 100°C,
- Μέσο θερμοκρασιακό επίπεδο: από 100°C έως 400°C,
- Υψηλό θερμοκρασιακό επίπεδο: > 400°C,

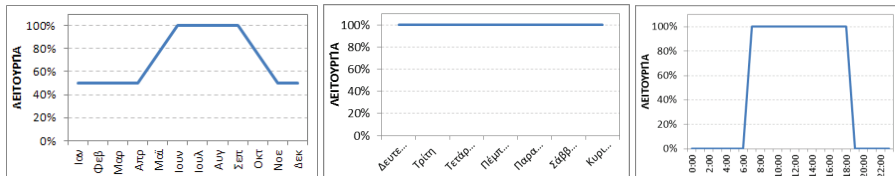
Στο σύνολο της κατανάλωσης θερμότητας στις βιομηχανίες, το 30% αφορά θερμοκρασίες κάτω των 100 °C, το 27% θερμοκρασίες μεταξύ 100 °C και 400 °C και το υπόλοιπο 43% υψηλότερες θερμοκρασίες [4].

Σχετικά με τις υπάρχουσες εγκαταστάσεις θερμικών ηλιακών συστημάτων, η πλειονότητα τους αναφέρεται σε εγκαταστάσεις σε κατοικίες και μόνο το 0.03% αφορά βιομηχανίες είτε για θερμότητα διεργασιών είτε για θέρμανση χώρου [4]. Συνολικά, 33.991 m² θερμικών ηλιακών συλλεκτών έχουν εγκατασταθεί σε βιομηχανίες έχοντας ισχύ 24 MW_{th} [4]. Λαμβάνοντας υπόψη την ένταση ηλιακής ακτινοβολίας στην Νότια Ευρώπη, υπάρχει μεγάλο δυναμικό εξοικονόμησης ενέργειας στις βιομηχανίες που δεν έχει εκμεταλλευθεί ακόμη.

Η δημοσίευση αυτή υπολογίζει τα οφέλη, όσον αφορά την ενέργεια και τα οικονομικά, που απορρέουν από την εγκατάσταση ενός συγκεντρωτικού ηλιακού συστήματος σε μία αντιπροσωπευτική βιομηχανία στην περιοχή της Αθήνας.

2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΧΡΗΣΤΗ

Η παρούσα μελέτη αφορά σύστημα εξοικονόμησης ενέργειας σε δυνητική βιομηχανία τροφίμων στην περιοχή της Αττικής, η οποία θεωρείται ότι καλύπτει τις ενεργειακές της ανάγκες από ατμολέβητα πετρελαίου. Η παραγωγή των προϊόντων της βιομηχανίας θεωρείται ότι γίνεται σε ετήσια βάση, 7 μέρες ανά εβδομάδα από τις 7:00 έως τις 18:00, με μεταβαλλόμενες ενεργειακές απαιτήσεις όπως φαίνεται στις ακόλουθες εικόνες.



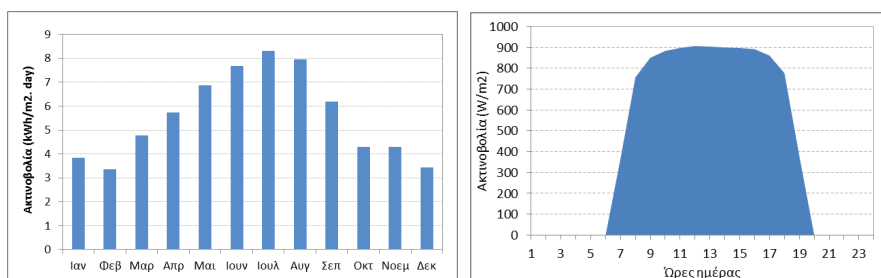
Εικόνα 1 Προφίλ ετήσιας, εβδομαδιαίας και ωριαίας λειτουργίας

Οι ενεργειακές ανάγκες της βιομηχανίας θεωρείται ότι εξυπηρετούνται από σύστημα ατμού, το οποίο αποτελείται από ατμολέβητα πετρελαίου, το δίκτυο διανομής του ατμού (steam) και των συμπυκνωμάτων του (condensate) καθώς και τους καταναλωτές θερμότητας (εξωτερικούς εναλλάκτες και μανδύες δοχείων). Τα χαρακτηριστικά του συστήματος ατμού που χρησιμοποιεί η βιομηχανία συγκεντρώνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά συστήματος ατμού	
Θερμοκρασία ατμού	170 °C
Πίεση ατμού	7 bar
Παροχή ατμού	700 kg/hr
Ετήσια κατανάλωση ενέργειας	1.555 MWh/ έτος
Βαθμός απόδοσης καυστήρα	75 %
Ετήσια κατανάλωση πετρελαίου	207 tn / έτος

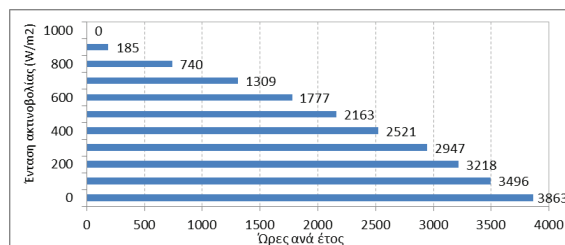
3. ΗΛΙΑΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ

Για την εξαγωγή των μετεωρολογικών δεδομένων για την περιοχή της Αθήνας, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Meteoprom με περίοδο αναφοράς από το 1986 έως το 2005. Οι συγκεντρωτικοί ηλιακοί συλλέκτες αξιοποιούν μόνο την άμεση (DNI) συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας. Ειδικότερα, για την περιοχή της Αθήνας η άμεση ακτινοβολία καθέτου επιπέδου (DNI) ανέρχεται σε 2.008 kWh/m² ανά έτος.



Εικόνα 2: Μηνιαία κατανομή της ακτινοβολίας DNI, Αθήνα

Στην επόμενη εικόνα απεικονίζονται οι ώρες του έτους κατά τις οποίες η ακτινοβολία βρίσκεται πάνω από ένα συγκεκριμένο επίπεδο. Παρατηρείται πως κατά τη διάρκεια ενός έτους η DNI ακτινοβολία είναι μεγαλύτερη των 500 W/m² για 2.163 ώρες από τις συνολικά 8.760 ώρες, δηλαδή για το 25% του έτους. Επισημαίνεται πως η διάρκεια αυτή είναι κρίσιμη για την ετήσια απόδοση και την οικονομική απόσβεση ενός ηλιακού συστήματος.



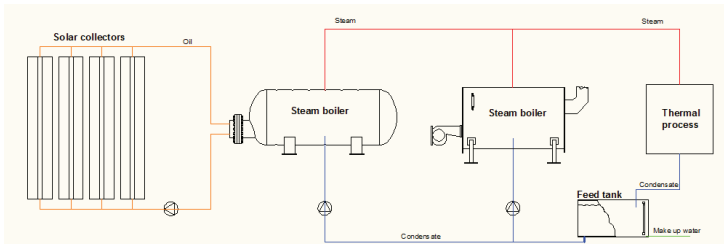
Εικόνα 3: Ετήσια κατανομή ωρών για συγκεκριμένα επίπεδα έντασης ακτινοβολίας, Αθήνα.

4. ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Σκοπός της ενότητας αυτής είναι η παράθεση των δυνατών συστημάτων παραγωγής ατμού για βιομηχανίες, χρησιμοποιώντας τους συγκεντρωτικούς ηλιακούς συλλέκτες ως βασική πηγή ενέργειας και το λέβητα πετρελαίου ως υποβοηθητική.

Διάταξη Α. Παραγωγή ατμού μέσω θερμικού λαδιού χωρίς αποθήκευση

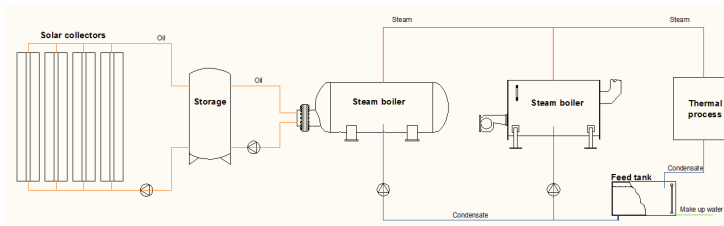
Ξεκινώντας από τον συγκεντρωτικό ηλιακό συλλέκτη, η ακτινοβολία ανακλάται στα κάτοπτρα, συγκεντρώνεται στον υπερυψωμένο δέκτη που βρίσκεται επάνω από τους ηλιακούς συλλέκτες και έτσι, θερμαίνεται το θερμικό λάδι που κυκλοφορεί εσωτερικά των σωλήνων. Το λάδι αυτό έχοντας αυξήσει τη θερμοκρασία του σε επίπεδα μεγαλύτερα από την αναγκαία θερμοκρασία του δικτύου ατμού, οδηγείται σε ειδικό λέβητα ατμού. Εκεί, η θερμότητα του θερμικού λαδιού μεταφέρεται στο νερό και έτσι, παράγεται ατμός συγκεκριμένης πίεσης. Στη συνέχεια, ο ατμός που παράγεται στο λέβητα διοχετεύεται στην κατανάλωση.



Εικόνα 4: Διάταξη Α - Παραγωγή ατμού μέσω θερμικού λαδιού χωρίς αποθήκευση

Διάταξη Β. Παραγωγή ατμού μέσω θερμικού λαδιού και αποθήκευσης

Παρομοίως με τη Διάταξη Α, με τη διαφορά ότι ενσωματώνεται σύστημα αποθήκευσης θερμότητας, με σκοπό την εξομάλυνση της προσφοράς με τη ζήτηση. Με τον τρόπο αυτόν επιτυγχάνεται περισσότερη ομοιομορφία στην παραγωγή θερμότητας από το ηλιακό σύστημα και στην κατανάλωση του ατμού από τη βιομηχανία, έχοντας λιγότερες αιχμές φορτίου. Το θερμό λάδι προερχόμενο από τους ηλιακούς συλλέκτες οδηγείται πάντα στην δεξαμενή αποθήκευσης. Όταν υπάρχει ζήτηση ατμού, το θερμό λάδι οδηγείται από την δεξαμενή αποθήκευσης στο λέβητα ατμού, ο οποίος παράγει ατμό συγκεκριμένης πίεσης. Ο ατμός διοχετεύεται έπειτα στην κατανάλωση, όπως ακριβώς συμβαίνει και με τη Διάταξη Α. Όταν δεν υπάρχει ζήτηση ατμού, οι ηλιακοί συλλέκτες παράγουν θερμό λάδι που αποθηκεύεται στη δεξαμενή, έτοιμο για χρήση από το λέβητα.

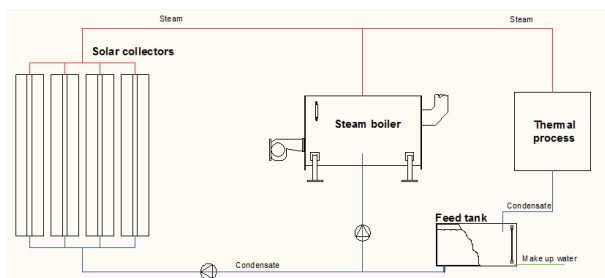


Εικόνα 5: Διάταξη Β - Παραγωγή ατμού μέσω θερμικού λαδιού και αποθήκευσης

Διάταξη Γ. Απευθείας παραγωγή ατμού

Η διάταξη αυτή είναι η απλούστερη, καθώς δεν ενσωματώνει ούτε επιπλέον λέβητα ατμού ούτε δεξαμενή αποθήκευσης και δεν κυκλοφορεί λάδι στον δέκτη των συλλεκτών, αλλά νερό. Έτσι, όταν η ακτινοβολία ανακλάται στα κάτοπτρα και συγκεντρώνεται στο δέκτη των ηλιακών συλλεκτών, θερμαίνεται νερό σε πίεση του δικτύου ατμού. Καθώς τώρα το νερό διέρχεται από το πρώτο τμήμα των ηλιακών συλλεκτών θερμαίνεται μέχρι την καμπύλη

κορεσμένου υγρού. Στη συνέχεια, περνάει στο επόμενο τμήμα των συλλεκτών, όπου παράγεται ο ατμός. Ο παραγόμενος ατμός εισάγεται απευθείας στο δίκτυο του ατμού, από όπου οδεύει προς κατανάλωση.



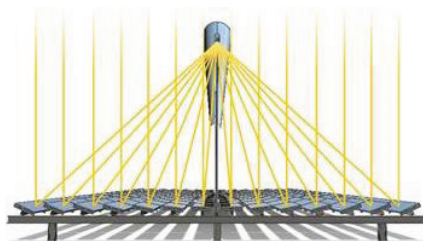
Εικόνα 6: Διάταξη Γ – Απευθείας παραγωγή ατμού

5. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Για την παρούσα μελέτη επιλέγεται η διάταξη παραγωγής ατμού μέσω θερμικού λαδιού χωρίς αποθήκευση (**Διάταξη Α**), καθώς πλεονεκτεί σε σχέση με τις υπόλοιπες διατάξεις στα εξής χαρακτηριστικά:

- Ικανοποιητική μεταφορά θερμότητας και δυνατότητα εξοικονόμησης ενέργειας
- Μέσο κόστος θερμικού μέσου (λαδιού)
- Μηδενική πιθανότητα διάβρωσης συλλεκτών
- Χαμηλή πίεση λειτουργίας ηλιακού συστήματος, άρα μικρότερο αρχικό κόστος συστήματος
- Διαθεσιμότητα εξαρτημάτων και συσκευών στο εμπόριο
- Δυνατότητα υποστήριξης μελέτης και κατασκευής παρομοίων διατάξεων από μηχανικούς, άρα μεγαλύτερη πιθανότητα επαναληψιμότητας διάταξης.

Οι **συγκεντρωτικοί ηλιακοί συλλέκτες Fresnel** αποτελούνται από επίπεδες λωρίδες κατόπτρων, οι οποίες στρέφονται σε έναν άξονα και ακολουθούν την κίνηση του ήλιου. Η ηλιακή ακτινοβολία ανακλώμενη κατευθύνεται προς τον δέκτη, όπου βρίσκεται σωλήνας κενού επιλεκτικής βαφής. Η συγκεντρωμένη πλέον ακτινοβολία απορροφάται από το θερμικό λάδι που κυκλοφορεί εσωτερικά του σωλήνα, το οποίο κατευθύνεται στον ατμολέβητα για την παραγωγή του ατμού.



Εικόνα 7: Ηλιακός συλλέκτης Fresnel

Στην Εικόνα 7 απεικονίζεται η υπό εξέταση τεχνολογία συλλέκτη με την μέγιστη θερμοκρασία του συλλέκτη να ανέρχεται στους 400°C και μέγιστο βαθμό απόδοσης $\eta_0=0.66$.

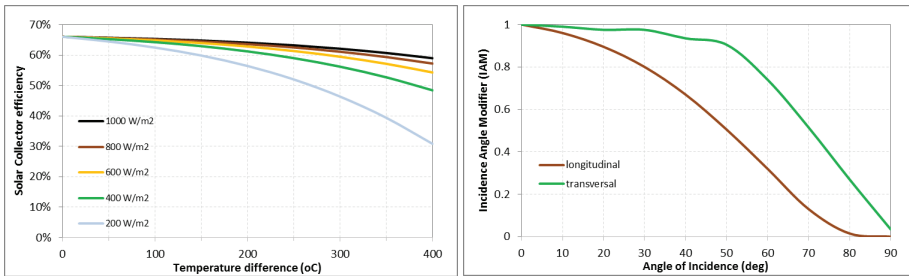
Το **ηλιακό πεδίο** διαστασιολογήθηκε έτσι ώστε η θερμότητα που παράγεται από τους συλλέκτες το καλοκαίρι να απορροφάται πλήρως από το δίκτυο. Το ηλιακό πεδίο αποτελείται

από ηλιακούς συλλέκτες, καθαρής επιφάνειας κατόπτρων 1.022 m^2 και συνολικής επιφάνειας συλλεκτών 1.432 m^2 . Οι ηλιακοί συλλέκτες σχηματίζουν 2 παράλληλες σειρές με προσανατολισμό Νότου – Βορρά.

Η θερμική απόδοση του ηλιακού συλλέκτη (n_{coll}) και ο γωνιακός συντελεστής απεικονίζονται γραφικά στην Εικόνα 8.

$$n_{\text{coll}} = K \cdot n_0 - \left(K \cdot b_0 \cdot \Delta T + \frac{b_1 \cdot \Delta T + b_2 \cdot \Delta T^2 + b_3 \cdot \Delta T^3 + b_4 \cdot \Delta T^4}{\text{DNI}} \right) \quad \text{Εξ. 1}$$

Όπου: $n_0=0.66$, $b_0=0$, $b_1=0.056$, $b_2=0.001$, $b_3=0.0000005$, $b_4=0$, $K=IAM_{\text{long}} \cdot IAM_{\text{trans}}$



Εικόνα 8: Καμπύλες ενεργειακής απόδοσης του ηλιακού συλλέκτη (αριστερά) και γωνιακός συντελεστής (δεξιά).

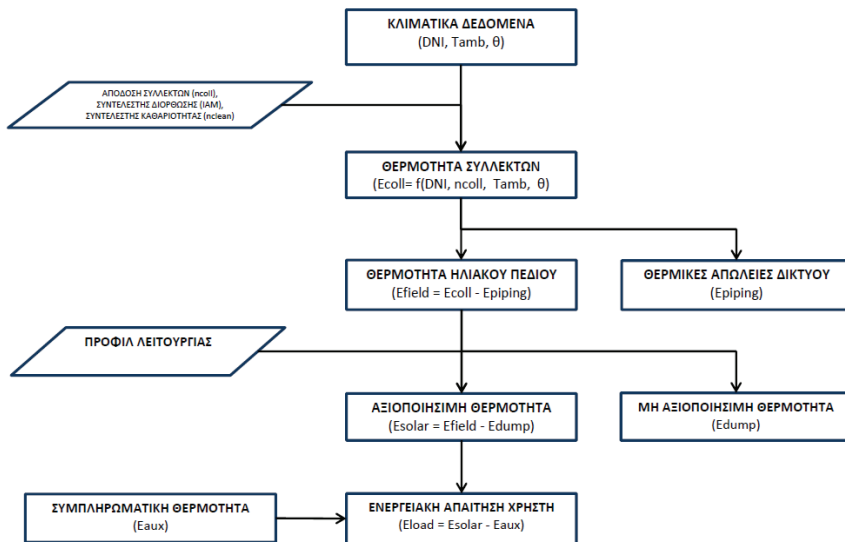
Ο **ατμολέβητας** του ηλιακού συστήματος συνδέεται παράλληλα στον ατμολέβητα πετρελαίου και παράγει κορεσμένο ατμό πίεσης 7 bar με ονομαστική ισχύ 515 kW. Η θερμοκρασία παροχής/ επιστροφής του λαδιού είναι $250^\circ\text{C} / 200^\circ\text{C}$, με παροχή όγκου $19.4 \text{ m}^3/\text{hr}$.

Το **μέσο μεταφοράς θερμότητας** είναι συνθετικό λάδι που πληροί τις ακόλουθες προϋποθέσεις: υγρή φάση στο θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας, χαμηλό σημείο πήξης, υψηλή μεταφορά θερμότητας, μη διαβρωτικό για τον εξοπλισμό και οικονομία. Τα χαρακτηριστικά του φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 2: Τεχνικά χαρακτηριστικά του θερμικού λαδιού				
Θερμοκρασία	Πυκνότητα	Θερμοχωρητικότητα	Θερμική αγωγιμότητα	Συνεκτικότητα
0°C	891 kg/m^3	$1,72 \text{ kJ/kg.K}$	$0,117 \text{ W/m.K}$	238 cP
100°C	827 kg/m^3	$2,18 \text{ kJ/kg.K}$	$0,109 \text{ W/m.K}$	3,4 cP
200°C	761 kg/m^3	$2,60 \text{ kJ/kg.K}$	$0,099 \text{ W/m.K}$	0,84 cP
315°C	678 kg/m^3	$3,00 \text{ kJ/kg.K}$	$0,085 \text{ W/m.K}$	0,34 cP

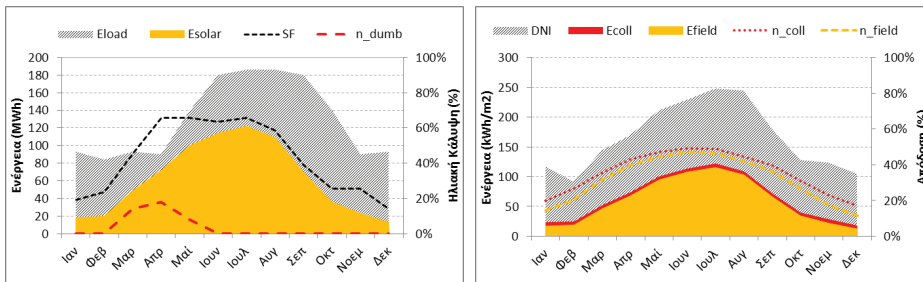
6. ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Για την ενεργειακή μελέτη του ηλιακού συστήματος χρησιμοποιήθηκε λογισμικό δυναμικών προσομοιώσεων (TRNSYS) με ωριαίο χρονικό βήμα. Προκειμένου να υπολογισθεί η θερμότητα που παράγεται από τους συλλέκτες, η εκκίνηση γίνεται από τα κλιματικά δεδομένα σε συνδυασμό με τα τεχνικά χαρακτηριστικά των συλλεκτών. Αφού υπολογιστεί η θερμότητα που παράγεται από τους συλλέκτες, σειρά έχει ο υπολογισμός της θερμότητας που παράγεται από όλο το ηλιακό πεδίο, λαμβάνοντας υπόψη τις θερμικές απώλειες του δικτύου. Στη συνέχεια, δεδομένου του προφίλ λειτουργίας της βιομηχανίας, υπολογίζεται η θερμότητα που δεν είναι αξιοποιήσιμη εξαιτίας χρονικών περιορισμών, οπότε τελικά καθορίζεται η θερμότητα που μπορεί να αξιοποιηθεί. Η συνολική ενεργειακή απαίτηση του χρήστη υπολογίζεται από το άθροισμα της θερμότητας που παράγεται από το ηλιακό πεδίο συν τη συμπληρωματική θερμότητα που παράγεται από τον λέβητα πετρελαίου.



Εικόνα 9: Αλγόριθμος προσομοίωσης ηλιακού συστήματος

Σύμφωνα με τα ετήσια αποτελέσματα της προσομοίωσης, η ηλιακή ακτινοβολία ανέρχεται σε 2.008 kWh/m²έτος και οι ηλιακοί συλλέκτες παράγουν 777 kWh/m²έτος θερμότητας επιτυγχάνοντας ετήσιο βαθμό απόδοσης 39%. Λαμβάνοντας υπόψη τις θερμικές απώλειες του ηλιακού πεδίου και τη θερμική αδράνεια του κυκλώματος, η παραχθείσα θερμότητα (Efield) είναι 746 MWh (706 kWh/m²). Ωστόσο, κάποιο μέρος της παραχθείσας θερμότητας (Edump) δεν απορροφάται από το δίκτυο, οπότε η θερμότητα που διοχετεύεται στην κατανάλωση (Esolar) είναι 718 MWh (680 kWh/m²). Το ηλιακό σύστημα επιτυγχάνει ηλιακή κάλυψη 46% και η εξοικονόμηση πετρελαίου ανέρχεται σε 95.733 l/έτος.

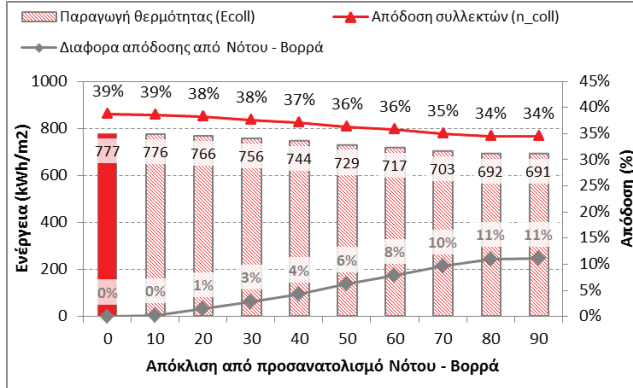


Εικόνα 10: Ενεργειακή συμπεριφορά ηλιακού συστήματος (αριστερά) και ηλιακών συλλεκτών και ηλιακού πεδίου σε ανηγμένες τιμές ως προς την επιφάνεια των κατόπτρων (δεξιά)

Οι απαραίτητες **παραμετρικές προσομοιώσεις** διενεργήθηκαν μεταβάλλοντας τον προσανατολισμό των ηλιακών συλλεκτών, τη θερμοκρασία λειτουργίας και την επιφάνεια των κατόπτρων.

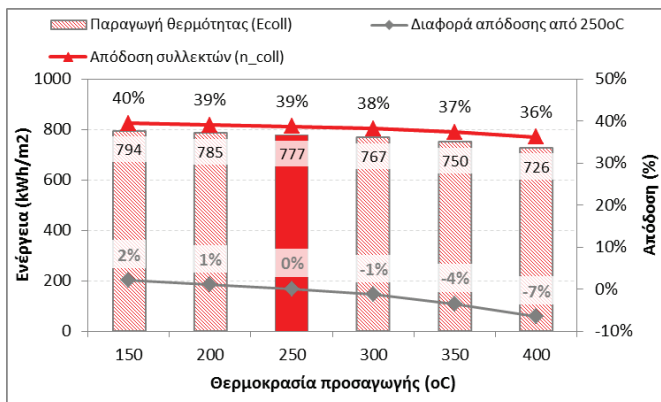
Για το ηλιακό σύστημα καθαρής επιφάνειας κατόπτρων ίσης με 1.056 m², θερμοκρασία παραγωγής του θερμικού λαδιού ίση με 250°C εξετάστηκε παραμετρικά η **επίδραση του προσανατολισμού**. Συνολικά εξετάστηκαν 10 περιπτώσεις από τον προσανατολισμό Νότου – Βορρά (απόκλιση 0°) έως τον προσανατολισμό Ανατολής – Δύσης (απόκλιση 90°) με βήμα 10°. Η βέλτιστη περίπτωση αφορά τον προσανατολισμό Νότου – Βορρά, κατά τον οποίο η ετήσια παραγωγή θερμότητας είναι 777 kWh/m² με βαθμό απόδοσης 39%. Αποκλίσεις έως

20° επιφέρουν σχεδόν αμελητέα μείωση στην παραγωγή θερμότητας. Η μείωση γίνεται εμφανής από τις 30° έως τις 90°. Ιδιαίτερα στις 90° η απόδοση είναι 11% και η παραγωγή θερμότητας 691 kWh/m². Κατά το θερινό εξάμηνο, ο προσανατολισμός Νότου – Βορρά επιτυγχάνει μεγαλύτερη παραγωγή θερμότητας έναντι του προσανατολισμού Ανατολής – Δύσης, ενώ συμβαίνει το αντίθετο για το χειμερινό εξάμηνο.



Εικόνα 11: Επίδραση προσανατολισμού στην ενεργειακή απόδοση των ηλιακών συλλεκτών

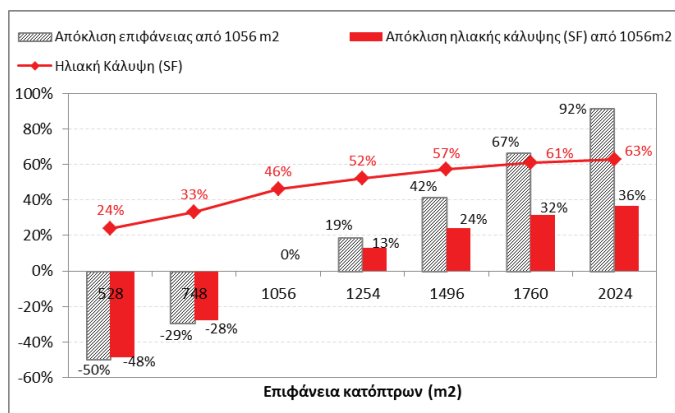
Για το ηλιακό σύστημα καθαρής επιφάνειας κατόπτρων ίσης με 1.056 m², και προσανατολισμού Νότου – Βορρά, εξετάστηκε παραμετρικά η **επίδραση της θερμοκρασίας** λειτουργίας. Συνολικά εξετάστηκαν 6 περιπτώσεις με θερμοκρασία εξόδου από τους συλλέκτες από τους 150°C έως τους 400°C, με βήμα 50°C. Η διαφορά θερμοκρασίας εισόδου και εξόδου στους ηλιακούς συλλέκτες είναι 50°C. Η ελάχιστη θερμοκρασία για τη συγκεκριμένη εφαρμογή για παραγωγή ατμού στους 170°C είναι στους 250°C, ωστόσο εξετάστηκαν και οι περιπτώσεις των 150°C και 200°C. Συμπερασματικά, η λειτουργία πάνω από τους 250°C οδηγεί σε μείωση της παραγωγής ενέργειας κατά 1% στους 300°C, 4% στους 350°C και 7% στους 400°C. Από τεχνο-οικονομική άποψη, η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε χρήση πιο εξειδικευμένου και δαπανηρού υδραυλικού εξοπλισμού, κυκλοροφητών, μονώσεων και θερμικού λαδιού. Ωστόσο, η αύξηση της θερμοκρασίας μειώνει την ισχύ του εναλλάκτη του ατμολέβητα και επομένως το κόστος του. Για τους παραπάνω λόγους κρίνεται σκόπιμη η λειτουργία στους 250°C.



Εικόνα 12: Επίδραση θερμοκρασίας λειτουργίας στην απόδοση των ηλιακών συλλεκτών

Για το ηλιακό σύστημα με προσανατολισμό Νότου – Βορρά και θερμοκρασία παραγωγής 250°C, εξετάστηκε παραμετρικά η **επίδραση της επιφάνειας** των κατόπτρων. Εξετάστηκαν

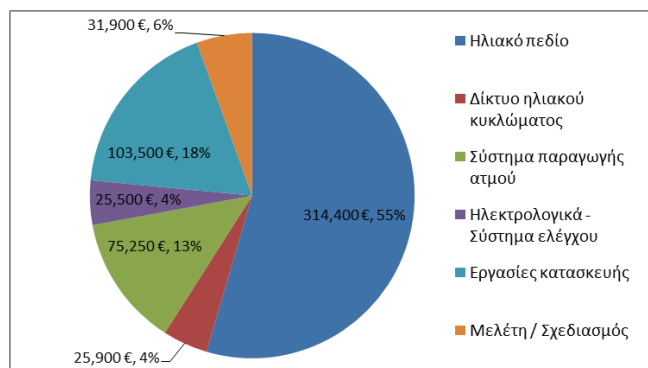
7 περιπτώσεις, ξεκινώντας από 500 m² έως 2.000 m² με βήμα ~250m². Η διαστασιολόγηση του ηλιακού πεδίου στα 1,056 m² κρίνεται ικανοποιητική. Μείωση της επιφάνειας οδηγεί σε αναλογική μείωση της ηλιακής κάλυψης, επομένως δεν κρίνεται σκόπιμη. Για παράδειγμα, για 528 m² επιφάνειας κατόπτρων η ηλιακή κάλυψη μειώνεται κατά 48%, φτάνοντας στο 24%. Ωστόσο, αύξηση της επιφάνειας των ηλιακών συλλεκτών οδηγεί σε συγκριτικά λιγότερη αύξηση της ηλιακής κάλυψης. Για παράδειγμα αύξηση του ηλιακού πεδίου κατά 42% (1.496m²) οδηγεί σε αύξηση της ηλιακής κάλυψης μόνο κατά 24% (από 46% σε 57%).



Εικόνα 13: Επίδραση επιφάνειας κατόπτρων στην ηλιακή κάλυψη του συνολικού φορτίου

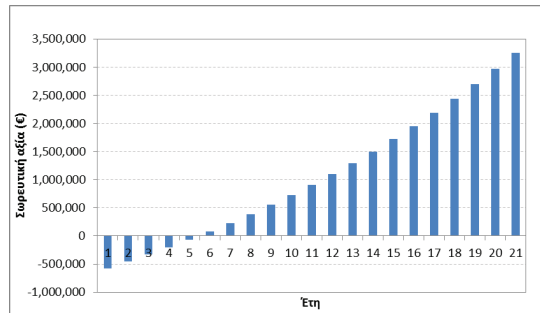
7. ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Ο πίνακας που ακολουθεί παρουσιάζει τον αναμενόμενο προϋπολογισμό του έργου. Οι τιμές προέκυψαν από επαφές με προμηθευτές των επιμέρους εξοπλισμών και από δημοσιευμένα στοιχεία προηγούμενων έργων. Ο συνολικός προϋπολογισμός του έργου ανέρχεται σε 576.450 €. Η κατανομή του κόστους απεικονίζεται στην Εικόνα 14, με τους ηλιακούς συλλέκτες να απορροφούν το μεγαλύτερο ποσοστό (55%) του συνολικού προϋπολογισμού.



Εικόνα 14: Καταμερισμός προϋπολογισμού έργου

Η ελκυστικότητα της επένδυσης τεκμηριώνεται από την απλή απόσβεση που εκτιμάται σε 5,5 έτη χωρίς επιδότηση. Οι παραδοχές της οικονομικής ανάλυσης είναι: μείωση απόδοσης συστήματος 1%/έτος, λειτουργικά έξοδα 4%, κόστος πετρελαίου 1,25€/l, ρυθμός αύξησης κόστους ενέργειας 10%, επιτόκιο προεξόφλησης 4% και επιδότηση 0%.



Εικόνα 15: Οικονομική ανάλυση έργου

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα δημοσίευση αφορά την τεchnο-οικονομική μελέτη ενός συγκεντρωτικού ηλιακού συστήματος για παραγωγή ατμού σε βιομηχανία. Το σύστημα αποτελείται από τους ηλιακούς συλλέκτες, τον ειδικό λέβητα ατμού ισχύος 515kW, τον συμβατικό λέβητα πετρελαίου, το κύκλωμα θερμικού λαδιού και το κύκλωμα ατμού. Το ηλιακό πεδίο, ολικής επιφάνειας συλλεκτών 1.432 m², διαστασιολογήθηκε έτσι ώστε η θερμότητα που παράγεται από τους συλλέκτες κατά τις αίθριες μέρες του καλοκαιριού να απορροφάται πλήρως από το δίκτυο.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, οι ηλιακοί συλλέκτες παράγουν 777 kWh/m²/έτος και ο ετήσιος βαθμός απόδοσής τους ανέρχεται στο 39%. Η θερμότητα που παράγεται από το ηλιακό πεδίο και τελικά διοχετεύεται στην κατανάλωση ισούται με 680 kWh/m²/έτος. Το ηλιακό σύστημα επιτυγχάνει ηλιακή κάλυψη ίση με 46% και η τελική εξοικονόμηση πετρελαίου είναι ίση με 95.733 l/έτος. Από την παραμετρική μελέτη του συστήματος προέκυψε ότι η βέλτιστη ετήσια λειτουργία του πεδίου απαιτεί προσανατολισμό των συλλεκτών Νότου – Βορρά, θερμοκρασία λειτουργίας του ηλιακού πεδίου 250°C και επιφάνεια κατόπτρων 1.056 m². Η οικονομική μελέτη του συστήματος υπολογίζει το συνολικό προϋπολογισμό του έργου στα 576.450 €. Η απόσβεση, χωρίς καμία επιδότηση στο αρχικό κόστος, πραγματοποιείται στα 5,5 έτη.

Η παρούσα μελέτη δείχνει ότι η κατασκευή και λειτουργία ενός συγκεντρωτικού ηλιακού συστήματος στην Ελλάδα για παραγωγή ατμού βιομηχανικής χρήσεως παρουσιάζει ενθαρρυντικά οικονομοτεχνικά αποτελέσματα.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η μελέτη αυτή πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του έργου Solecon «Συγκεντρωτικοί ηλιακοί συλλέκτες υψηλής θερμοκρασίας και απόδοσης», που συγχρηματοδοτείται από το Πρόγραμμα Ανάπτυξης Βιομηχανικής Έρευνας και Τεχνολογίας ΠΑΒΕΤ ΕΣΠΑ 2007 – 2013.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] European Union, Eurostat Pocketbooks, 2013, “Energy, transport and environment indicators”, ISBN 978-92-79-33105-3
- [2] ODYSSEE MURE Intelligent Energy for Europe Program, 2012, “Energy Efficiency Trends in industry in the EU - Lessons from the ODYSSEE MURE project”
- [3] European Commission, Market Observatory For Energy, 2009, “Europe’s energy position markets and supply”, ISBN: 978-92-79-14175-1
- [4] ECOHEATCOOL Intelligent Energy for Europe Program, 2006, “Solar heating for industrial processes”

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΙΑΚΟΥ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΥ ΩΣ ΕΝΑ ΒΗΜΑ ΠΡΟΣ ΤΑ ΚΤΙΡΙΑ ΣΧΕΔΟΝ ΜΗΔΕΝΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ

Φ. Αναστασίου, Γ. Μαρτινόπουλος*

Σχολή Επιστημών Τεχνολογίας, Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος, ΤΚ 57001,
14^ο χλμ Θεσσαλονίκης Μουδανιών, Θεσσαλονίκη - Θέρμη

* e-mail: g.martinopoulos@ihu.edu.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα ηλιακά θερμικά συστήματα για θέρμανση χώρου και ζεστού νερού χρήσης (ZNX) αποτελούν εδώ και χρόνια μια δοκιμασμένη εναλλακτική στη χρήση ορυκτών καυσίμων ή/και ηλεκτρισμού, αποτελώντας τόσο μια ώριμη αγορά όσο και μια λύση στην προσπάθεια για επίτευξη κτιρίων με μηδενική ενεργειακή κατανάλωση.

Στην εργασία διερευνάτε η δυνατότητα κάλυψης μέρους του ψυκτικού και θερμικού φορτίου μια τυπικής τριώροφης πολυκατοικίας με συνολική επιφάνεια 300 m² η οποία έχει κατασκευαστεί σύμφωνα με τον KENAK σε κάθε μια από τις τέσσερις κλιματικές ζώνες της χώρας με τη χρήση ενός συστήματος ηλιακού κλιματισμού. Το σύστημα αποτελείται από επίπεδους επιλεκτικούς ηλιακούς συλλέκτες, δεξαμενές αποθήκευσης, ένα ψύκτη Li-Br και λέβητα αερίου ως βοηθητική πηγή.

Αρχικά, χρησιμοποιείται το λογισμικό TEE KENAK για τον υπολογισμό των θερμικών και ψυκτικών φορτίων των κτιρίων ενώ στη συνέχεια πραγματοποιείται δυναμική προσομοίωση του συστήματος ηλιακού κλιματισμού με το λογισμικό TRANSOL το οποίο χρησιμοποιεί τη μηχανή δυναμικής προσομοίωσης του TRNSYS για κάθε κλιματική ζώνη.

Από τη προσομοίωση προκύπτει ότι τα συστήματα ηλιακού κλιματισμού μπορούν να συμβάλλουν στη σημαντική μείωση χρήσης συμβατικών μορφών ενέργειας στον κτιριακό τομέα και να αποτελέσουν μια λύση στην προσπάθεια για επίτευξη κτιρίων με μηδενική ενεργειακή κατανάλωση.

Λέξεις Κλειδιά: Ηλιακή Ενέργεια, Κλιματισμός, Ενεργειακός Σχεδιασμός Κτιρίου

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο κτιριακός τομέας στην Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) είναι υπεύθυνος για σχεδόν 40% της τελικής κατανάλωσης ενέργειας (1.158 Mtoe το 2007) εκ του οποίου 284,6 Mtoe αφορούν σε κατοικίες και 145,2 Mtoe στον υπόλοιπο κτιριακό τομέα [1], [2]. Στη χώρα μας, με βάση το Εθνικό Πληροφοριακό Σύστημα Ενέργειας [3], η τελική κατανάλωση ενέργειας στον κτιριακό τομέα κυμάνθηκε στο 34% της συνολικής ζήτησης ενέργειας.

Καθώς ο κτιριακός τομέας αποτελεί έναν τόσο μεγάλο χρήστη ενέργειας, με συνεχώς αυξητικές τάσεις, η εξοικονόμηση ενέργειας και η μεγαλύτερη διείσδυση τεχνολογιών Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας αποτελούν έναν από τους βασικούς στόχους της ΕΕ στη προσπάθεια της για μείωση της ενεργειακής της εξάρτησης αλλά και για τη μείωση των θερμοκηπικών αερίων [4]. Για τους λόγους αυτούς η ιδέα του κτιρίου μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης αποτελεί στις μέρες μας τον μελλοντικό στόχο στον σχεδιασμό κτιρίων. Βέβαια, πριν τη πλήρη ενσωμάτωση αυτού του προτύπου στις εθνικές νομοθεσίες των χωρών της ΕΕ, είναι απαραίτητη η διατύπωση ενός ορισμού για το κτίριο μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης [5].

Ως κτίρια μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης ορίζονται τα κτίρια με μηδενική (συνολικά) κατανάλωση ενέργειας και μηδενικές εκπομπές CO₂ σε ετήσια βάση [6]. Καθώς με τις υπάρχουσες τεχνολογίες τέτοια κτίρια δεν είναι, ακόμα, οικονομικά βιώσιμα έχει υιοθετηθεί ο όρος «κτίρια σχεδόν μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης». Με βάση την κοινοτική οδηγία 2010/31/ΕΕ, η ενέργεια που απαιτείται από ένα κτίριο σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας θα πρέπει να καλύπτεται σε σημαντικό βαθμό από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Επιπρόσθετα, θα πρέπει από το 2021 όλα τα νέα κτίρια να είναι κτίρια σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας, ενώ τα δημόσια κτίρια από το 2019 [5].

Επομένως στο άμεσο μέλλον όλα τα κτίρια θα πρέπει, εκτός από μειωμένα θερμικά, ψυκτικά και ηλεκτρικά φορτία, να έχουν τη δυνατότητα να καλύπτουν τα φορτία τους σε σημαντικό βαθμό από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Καθώς το μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειας αυτής χρησιμοποιείται για κάλυψη των θερμικών και ψυκτικών φορτίων, στη παρούσα εργασία μελετάται η δυνατότητα χρήσης συστήματος ηλιακού κλιματισμού για κάλυψη μέρους αυτών των αναγκών.

Στην εργασία διερευνάτε η δυνατότητα κάλυψης μέρους του ψυκτικού και θερμικού φορτίου μια τυπικής τριώροφης πολυκατοικίας με συνολική επιφάνεια 300 m² η οποία έχει κατασκευαστεί σύμφωνα με τον ΚΕΝΑΚ σε κάθε μια από τις τέσσερις κλιματικές ζώνες της χώρας με τη χρήση ενός συστήματος ηλιακού κλιματισμού. Το σύστημα αποτελείται από επίπεδους επιλεκτικούς ηλιακούς συλλέκτες, δεξαμενές αποθήκευσης ένα ψύκτη Li-Br και λέβητα αερίου ως βοηθητική πηγή.

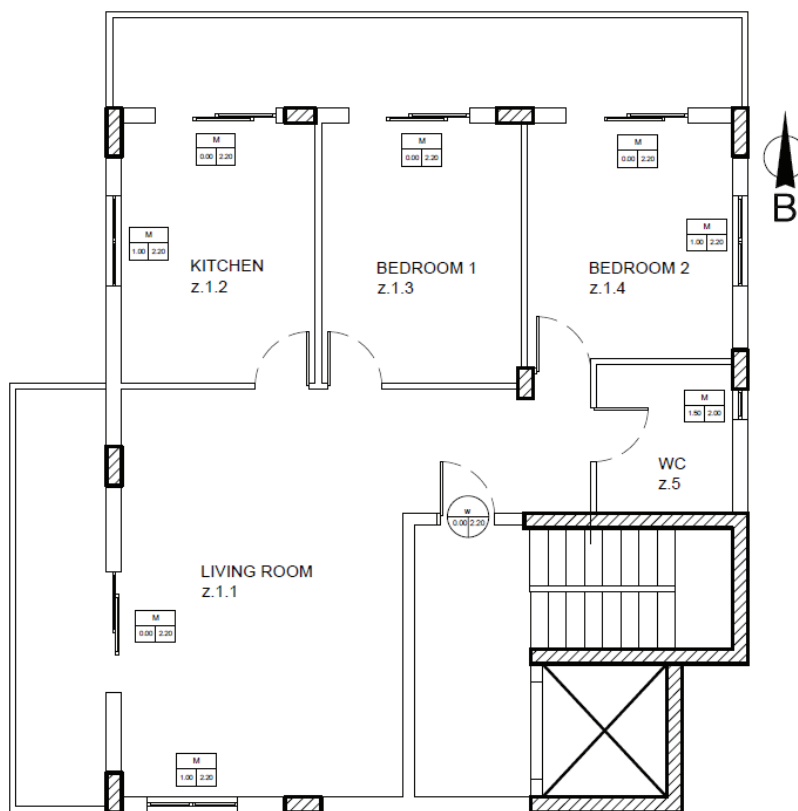
Αρχικά, χρησιμοποιείται το λογισμικό TEE KENAK για τον υπολογισμό των θερμικών και ψυκτικών φορτίων των κτιρίων ενώ στη συνέχεια πραγματοποιείται δυναμική προσομοίωση του συστήματος ηλιακού κλιματισμού με το λογισμικό TRANSOL το οποίο χρησιμοποιεί τη μηχανή δυναμικής προσομοίωσης του TRNSYS, για κάθε κλιματική ζώνη.

2. ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ ΚΤΙΡΙΟΥ ΚΑΙ ΦΟΡΤΙΑ

Ως κτίριο επιλέχθηκε μια τριώροφη πολυκατοικία με εμβαδόν 97,5 m² σε κάθε όροφο και συνολικά θερμαινόμενο όγκο 873 m³ ενώ οι υπολογισμοί έγιναν για τέσσερις πόλεις (Αθήνα, Θεσσαλονίκη, Καστοριά, Ηράκλειο) οι οποίες αντιστοιχούν στις τέσσερις κλιματικές ζώνες του ΚΕΝΑΚ.

Το κτίριο έχει μήκος 10,6 m, πλάτος 10,5m και ύψος ορόφου 3m, ενώ ο λόγος ανοιγμάτων προς τη συνολική επιφάνεια του ανέρχεται σε 0,23. Η κάτοψη του κτιρίου παρουσιάζεται στην Εικόνα 1. Για τις εξωτερικές επιφάνειες του κτιρίου οι συντελεστές απορρόφησης και εκπομπής λήφθησαν 0,4 και 0,8 αντίστοιχα, ενώ η συνολική τιμή του συντελεστή θερμικής

αγωγιμότητας του κτιρίου σε κάθε περίπτωση δεν υπερέβαινε το αντίστοιχο ανώτατο όριο κάθε ζώνης.

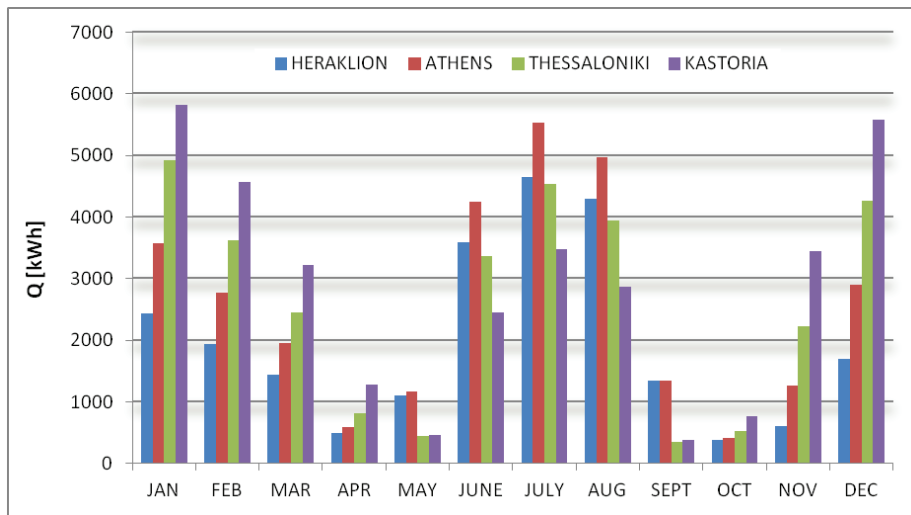


Εικόνα 1: Κάτοψη κτιρίου

Το κτίριο θεωρούμε ότι έχει ταράτσα, ώστε να είναι εφικτή η τοποθέτηση όσο το δυνατόν μεγαλύτερης επιφάνειας συλλεκτών, ενώ το ισόγειο θεωρήθηκε ως μη θερμαινόμενος χώρος. Σε όλες τις περιπτώσεις τα συστήματα κλιματισμού θεωρήθηκε ότι ξεκινούν τη λειτουργία τους όταν η εσωτερική θερμοκρασία του κτιρίου ξεπερνά τους 26°C για τη περίοδο ψύξης και όταν πέφτει κάτω από τους 20°C για την περίοδο θέρμανσης.

Οι υπολογισμοί με το λογισμικό TEE KENAK για τα θερμικά και ψυκτικά φορτία του κτιρίου έγιναν για ένα έτος, ενώ ακολουθήθηκαν οι οδηγίες του KENAK για τη χρονική διάρκεια της θερμικής και ψυκτικής περιόδου κάθε ζώνης. Τα συνολικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Συνολικά Φορτία για κάθε ζώνη				
Φορτίο [kWh/m ²]	ΑΘΗΝΑ	ΘΕΣ/ΝΙΚΗ	ΚΑΣΤΟΡΙΑ	ΗΡΑΚΛΕΙΟ
Θερμικό φορτίο	34,2	51,5	70,7	19,7
Ψυκτικό φορτίο	53,0	37,1	26,2	45,7
Ζεστό νερό χρήσης	17,8	19,0	20,5	16,6



Εικόνα 2: Συνολικό μηνιαίο φορτίο για κάθε ζώνη

Όπως αναμενόταν οι υψηλότερες θερμικές ανάγκες εμφανίζονται στην Καστοριά και οι χαμηλότερες στο Ηράκλειο, ενώ αντίστοιχα οι υψηλότερες ανάγκες σε ψυκτικό φορτίο στην Αθήνα και οι χαμηλότερες στην Καστοριά. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι το μεγαλύτερο ψυκτικό φορτίο δεν εμφανίζεται στο Ηράκλειο, το οποίο βρίσκεται στο νοτιότερο σημείο, αλλά στην Αθήνα και μάλιστα σε ποσοστό 16% μεγαλύτερο από το αντίστοιχο του Ηρακλείου. Στην Εικόνα 2 παρουσιάζεται η μηνιαία διακύμανση του συνολικού φορτίου στις τέσσερις ζώνες.

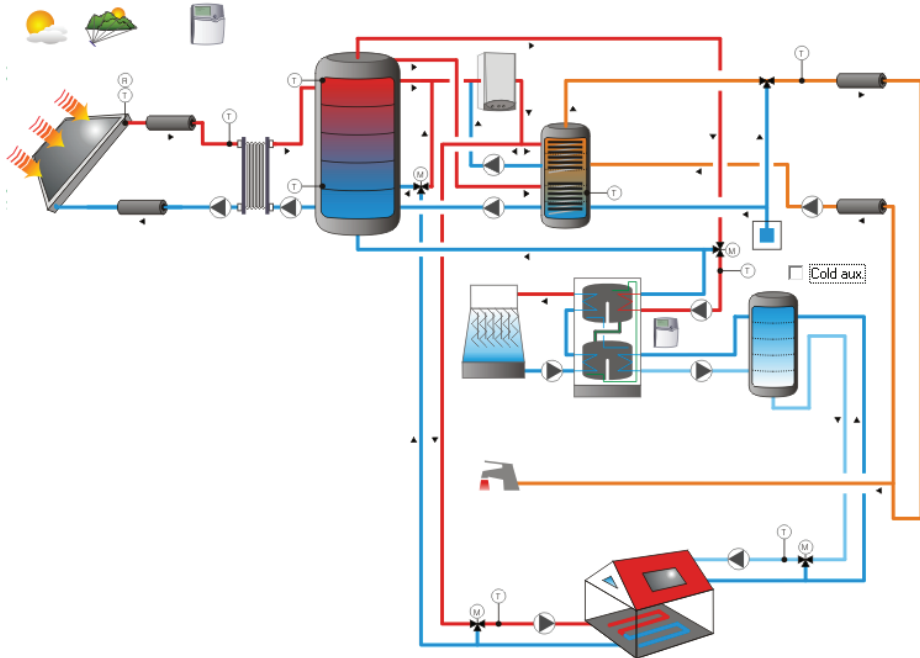
3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΙΑΚΟΥ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΥ

Για τη κάλυψη των φορτίων του κτιρίου προσομοιώθηκε η λειτουργία ενός συστήματος ηλιακού κλιματισμού. Το σύστημα αποτελείται από μια συστοιχία επίπεδων ηλιακών συλλεκτών η οποία χρησιμοποιεί εξωτερικό εναλλάκτη για τη μεταφορά θερμότητας στην κύρια δεξαμενή αποθήκευσης. Εκτός της κύριας δεξαμενής αποθήκευσης, υπάρχει και μια βοηθητική δεξαμενή η οποία περιέχει έναν εμβαπτιζόμενο εναλλάκτη ο οποίος συνδέεται και με την κύρια δεξαμενή. Στο πάνω μέρος της κύριας δεξαμενής βρίσκεται συνδεδεμένος ένας βοηθητικός λέβητας αερίου.

Το κύκλωμα θέρμανσης χώρου τροφοδοτείται είτε από το κάτω μέρος της κύριας δεξαμενής αποθήκευσης, είτε απευθείας από τον βοηθητικό λέβητα αερίου, στις περιπτώσεις που η επιθυμητή θερμοκρασία δεν μπορεί να επιτευχθεί από τη δεξαμενή αποθήκευσης όπως παρουσιάζεται σχηματικά στην Εικόνα 3.

Ο ψύκτης Li-Br συνδέεται επίσης με την κύρια δεξαμενή και ενεργοποιείται όταν υπάρχει ανάγκη κάλυψης ψυκτικού φορτίου και η θερμοκρασία στη δεξαμενή αποθήκευσης είναι πάνω από μια ορισμένη τιμή. Το σύστημα αποτελείται από 24 επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες συνολικής επιφάνειας 50,4 m² με νότιο προσανατολισμό και κλίση 35° οι οποίοι κατανέμονται σε τέσσερις κλάδους με μήκος 6,5 m ο καθένας και μεταξύ τους διάστιχο 3,5 m. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των συλλεκτών είναι αυτά τα οποία ορίζει η τεχνική οδηγία του ΤΕΕ.

Η κύρια δεξαμενή έχει συνολική χωρητικότητα 2 m^3 και είναι μονωμένη με διογκωμένη πολυουρεθάνη πάχους 100 mm , ενώ η βοηθητική δεξαμενή έχει χωρητικότητα $0,5 \text{ m}^3$ ώστε να δίνει τη δυνατότητα πλήρους κάλυψης των ημερήσιων αναγκών σε ζεστό νερό χρήσης. Ο λέβητας αερίου έχει ισχύ $23,8 \text{ kW}$. Για τη κάλυψη του ψυκτικού φορτίου χρησιμοποιείται ένας ψύκτης Li-Br με $\text{COP}_{\text{th}} 0,7$ και ισχύος $8,8 \text{ kW}$, ενώ επιπρόσθετα υπάρχει βοηθητική δεξαμενή χωρητικότητας 1 m^3 .



Εικόνα 3: Σχηματικό διάγραμμα λειτουργίας συστήματος ηλιακού κλιματισμού

Αν και θεωρητικά τα φορτία που πρόκειται να καλυφθούν σε κάθε περιοχή είναι διαφορετικά, για όλες τις περιπτώσεις χρησιμοποιούνται ίδιας ισχύος βοηθητικές πηγές καθώς αποτελούν τις μικρότερες που κυκλοφορούν στην αγορά. Για τη ψύξη και θέρμανση του κτιρίου θεωρήθηκε ότι χρησιμοποιούνται fan coils ως θερματικές μονάδες.

4. ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

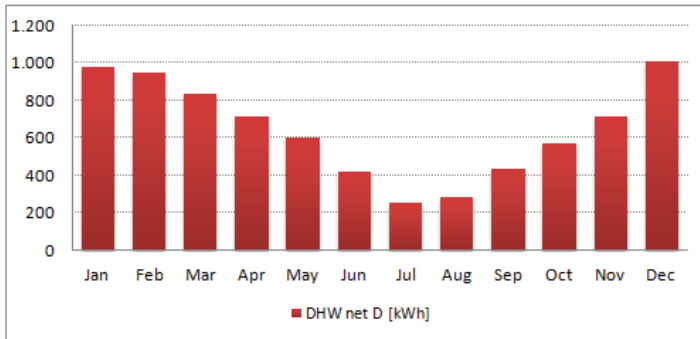
Έχοντας ήδη υπολογίσει τα φορτία με το λογισμικό TEE-KENAK, πραγματοποιούμε δυναμική προσομοίωση του συστήματος με τη χρήση του λογισμικού TRANSOL το οποίο αποτελεί εργαλείο για το σχεδιασμό, τη βελτιστοποίηση και την προσομοίωση ηλιακών θερμικών συστημάτων και το οποίο βασίζεται στην μηχανή προσομοίωσης του TRNSYS [7][8]. Το λογισμικό περιλαμβάνει πληθώρα διαφορετικών επιλογών και συστημάτων για την ακριβή προσομοίωση ηλιακών θερμικών συστημάτων τα οποία μπορούν να καλύψουν φορτία θέρμανσης και ψύξης σε βιομηχανικές και κτιριακές εφαρμογές, όπως μονοκατοικίες, πολυκατοικίες, οικισμούς κ.α. [9].

Το λογισμικό υπολογίζει δυναμικά και το συνολικό φορτίο του κτιρίου, ενώ για τα απαραίτητα μετεωρολογικά δεδομένα χρησιμοποιεί δεδομένα σε μορφή τυπικού

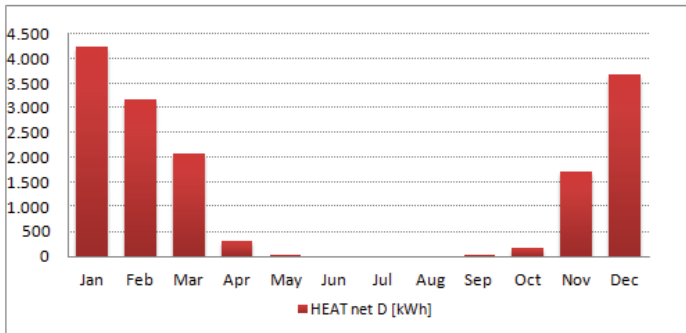
μετεωρολογικού έτους (TMY-2). Η προσομοίωση γίνεται με χρονικό βήμα μισής ώρας για 8.760 ώρες (πλήρες ημερολογιακό έτος).

Για τον υπολογισμό του ZNX θεωρήθηκε ότι θα πρέπει να καλυφθούν οι ανάγκες τριών νοικοκυριών των τεσσάρων ατόμων (ένα νοικοκυριό ανά οροφδιαμέρισμα) και η θερμοκρασία του ζεστού νερού λήφθηκε ως 45°C.

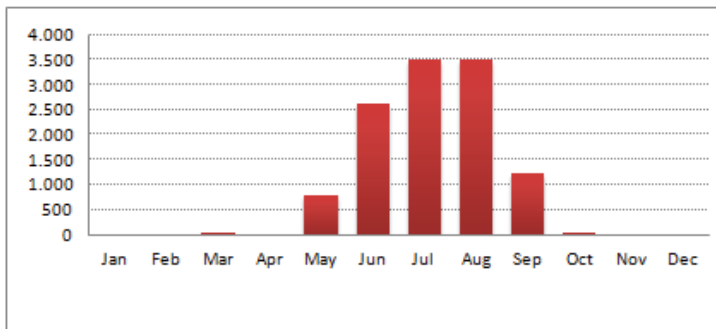
Αρχικά επαναυπολογίστηκε το συνολικό φορτίο ανά μήνα (Εικόνες 4, 5 και 6) το οποίο προέκυψε παραπλήσιο με το φορτίο από το TEE-KENAK, με μικρές αποκλίσεις της τάξης του 2 και 7% για το θερμικό και το ψυκτικό φορτίο αντίστοιχα.



Εικόνα 4: Μηνιαίο φορτίο ζεστού νερού χρήσης για τη Θεσσαλονίκη

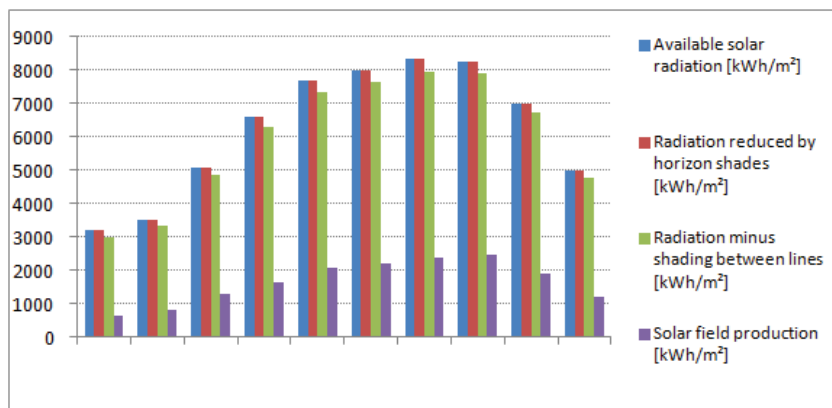


Εικόνα 5: Μηνιαίο θερμικό φορτίο για θέρμανση χώρου για τη Θεσσαλονίκη



Εικόνα 6: Μηνιαίο ψυκτικό φορτίο για τη Θεσσαλονίκη

Από τις συνολικά 65.744 kWh ενέργειας οι οποίες προσπίπτουν στο ηλιακό πεδίο (για τη περίπτωση της Θεσσαλονίκης) τελικά μόνο 18.068kWh μπορούν να αξιοποιηθούν από το σύστημα. Οι απώλειες στο ηλιακό πεδίο παρουσιάζονται στην Εικόνα 7.



Εικόνα 7: Απώλειες στο ηλιακό πεδίο

Για τη Θεσσαλονίκη οι συνολικές ανάγκες του κτιρίου, ανέρχονται σε 37.163 kWh με αποτέλεσμα η συνολική κάλυψη του συστήματος να ανέρχεται στο 46,2%. Αντίστοιχα η κάλυψη ανέρχεται σε 59% για την Αθήνα, σε 49% για την Καστοριά και σε 67% για το Ηράκλειο για το σύνολο των απαιτούμενων φορτίων.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όπως προκύπτει, η χρήση ηλιακών συστημάτων για την κάλυψη των θερμικών και ψυκτικών φορτίων στον κτιριακό τομέα είναι εφικτό να οδηγήσει σε καλύψεις άνω του 50% των συνολικών αναγκών για κτίρια τα οποία έχουν κτισθεί μετά την εφαρμογή του KENAK και επομένως και για κτίρια τα οποία θα ακολουθήσουν τη φιλοσοφία του κτιρίου σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας.

Κύριοι περιοριστικοί παράγοντες στην αύξηση της ενεργειακής κάλυψης από τα ηλιακά συστήματα είναι η περιορισμένη αγορά ψυκτών μικρής ισχύος οι οποίοι θα μπορούσαν να εγκατασταθούν σε ατομικές εγκαταστάσεις, μειώνοντας το κόστος εγκατάστασης. Επίσης με την εφαρμογή του KENAK και στο δρόμο για τα κτίρια μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας, το θερμικό φορτίο για το ZNX δεν μπορεί να συμπιεσθεί με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή και η περαιτέρω συμπίεση του συνολικού απαιτούμενου φορτίου.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. EC – European Commission. “European Union: Energy & Transport in Figures 2005” Published by EC DG-TREN and EUROSTAT, Brussels (2002).
2. Martinopoulos, G., and G. Tsalikis, “Active Solar Heating Systems for Energy Efficient Buildings in Greece: A Technical Economic and Environmental Evaluation”, Energy and Buildings 68 (2014):130-137.
3. National Information System for Energy. < <http://www.ypeka.gr/>>.
4. European Commission. “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, L153 of 18.2010 (2010): 13-35.
5. A.J. Marszal, P. Heiselberg, J.S. Bourrelle, E. Musall, K. Voss, I. Sartori, A. Napolitano, "Zero Energy Building – A review of definitions and calculation methodologies", *Energy and Buildings*, Volume 43, Issue 4, April 2011, Pages 971-979.
 6. Bourrelle, Julien S., Inger Andresen, and Arild Gustavsen. "Energy Payback: An Attributional and Environmentally Focused Approach to Energy Balance in Net Zero Energy Buildings", *Energy and Buildings* 65 (2013): 84-92.
 7. Klein, S.A. et al., (2006). TRNSYS 16: A Transient System Simulation Program, SEL, University of Wisconsin, Madison USA.
 8. Martinopoulos G., "Solar heating systems as a viable solution towards nearly zero energy buildings", 8th ASME International Conference in Energy Sustainability, Boston 2014.
 9. Eicker U., Colmenar-Santos A., Teran L., Cotrado M., Borge-Diez D., "Economic evaluation of solar thermal and photovoltaic cooling systems through simulation in different climatic conditions: An analysis in three different cities in Europe", *Energy and Buildings*, Volume 70, February 2014, Pages 207-223.

ΥΒΡΙΔΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΙΑΚΟΥ ΠΥΡΓΟΥ ΜΕ ΚΑΥΣΗ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Σ. Χ. Αλεξόπουλος

Solar-Institut Jülich (SIJ), FH Aachen, Aachen University of Applied Sciences
Heinrich-Mußmann-Str. 5, D-52428 Jülich, e-mail: alexopoulos@sjj.fh-aachen.de

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε ηλιοθερμικά εργοστάσια, όπως οι ηλιακοί πύργοι, είναι ένας τρόπος, ώστε να αναπληρωθεί μακροπρόθεσμα η χρήση συμβατικών μορφών ενέργειας.

Στη Γερμανία κατασκευάστηκε και είναι από το 2009 σε λειτουργία ο πρώτος πειραματικός σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ηλιακό πύργο ισχύος 1,5 MW. Με την συγκέντρωση της απευθείας ηλιακής ακτινοβολίας μέσω ηλιοστατών σε έναν αποδέκτη θερμότητας επιτυγχάνονται σε έναν ηλιακό πύργο πολύ υψηλές θερμοκρασίες στον μεταφορά θερμότητας. Η θερμότητα αυτή μετατρέπεται σε έναν θερμικό κύκλο σε μηχανική ενέργεια και στη συνέχεια με γεννήτρια σε ηλεκτρική ενέργεια.

Η χρήση αέρος ως μεταφορέα θερμότητας καθώς και κεραμικών δομών ως αποδεκτών της συγκεντρωμένης ηλιακής ακτινοβολίας επιτυγχάνει υψηλούς συντελεστές απόδοσης και ταχύτερα υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας της ενεργειακής εγκατάστασης.

Οι ηλιακοί πύργοι σε συνδυασμό με υβριδικά συστήματα, όπως καύση φυσικού αερίου μπορούν να φτάσουν μέχρι 8000 ώρες λειτουργίας το χρόνο. Η Ελλάδα διαθέτει καλό, αλλά μέχρι πρόσφατα ανεξερεύνητο δυναμικό κοιτασμάτων υδρογονανθράκων. Τους τελευταίους μήνες η ελληνική αγορά έρευνας και παραγωγής υδρογονανθράκων δραστηριοποιείται σηματοδοτώντας ένα νέο ξεκίνημα στο τομέα της αξιοποίησης κοιτασμάτων υδρογονανθράκων.

Η δυνατότητα της καύσης συμβατικών καυσίμων ή βιοκαυσίμων με τον ηλιακό πύργο επιτρέπει την μακροπρόθεσμη κάλυψη μέρους των ενεργειακών αναγκών της Ελλάδας από ηλιακές συγκεντρωτικές τεχνολογίες. Σε ένα ενδιάμεσο μεσοπρόθεσμο στάδιο με τη εγκατάσταση υβριδικών συστημάτων ηλιακού πύργου με καύση φυσικού αερίου, επιτυγχάνεται η εξοικονόμηση συμβατικών καυσίμων και η μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα με ταυτόχρονη μείωση του ενεργειακού κόστους.

Ειδικά στην Ελλάδα, με ένα αξιόλογο ηλιακό δυναμικό είναι επιτακτική ανάγκη η ανάπτυξη και αυτής της ανταγωνιστικής ηλιακής τεχνολογίας, η οποία ήδη σε άλλα κράτη της Μεσογείου και στην Αμερική αποτελεί πρώτη προτεραιότητα.

Λέξεις Κλειδιά: ηλιακός πύργος, ηλιακές συγκεντρωτικές τεχνολογίες, ηλιοθερμικά εργοστάσια, υβριδικά συστήματα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ανάπτυξη των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) στην ηλεκτροπαραγωγή, αποτελεί σταθερή επιδίωξη της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ) εξυπηρετώντας τους στόχους της αειφορίας του ενεργειακού συστήματος, την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής, την ενίσχυση της ασφάλειας της ενεργειακής τροφοδοσίας και την αποδοτική λειτουργία της εσωτερικής αγοράς ενέργειας.

Μια βασική μορφή ΑΠΕ είναι η ηλιακή ενέργεια. Η ηλιακή ενέργεια μπορεί να μετατραπεί απευθείας σε ηλεκτρική, χρησιμοποιώντας φωτοβολταϊκά στοιχεία, ή σε θερμική και στη συνέχεια σε ηλεκτρική με διάφορους τύπους συγκεντρωτικών ηλιακών συλλεκτών.

Σ' αυτούς συγκαταλέγεται και ο ηλιακός πύργος. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε ηλιοθερμικά εργοστάσια, όπως οι ηλιακοί πύργοι, είναι ένας τρόπος, ώστε να αναπληρωθεί μακροπρόθεσμα η χρήση συμβατικών μορφών ενέργειας. Τα σημαντικότερα τμήματα του ηλιακού πύργου είναι το ηλιοστατικό πεδίο, ο αποδέκτης και ο συμβατικός κύκλος, ο οποίος είναι ο ίδιος που χρησιμοποιείται στα ατμοηλεκτρικά εργοστάσια.

2. ΗΛΙΟΘΕΡΜΙΚΟ ΗΛΙΑΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ

Η Ελλάδα προσφέρεται όσο λίγες ευρωπαϊκές χώρες για την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας. Η ετήσια ηλιοφάνεια αυξάνει στην Ελλάδα από βορρά προς νότο και από τα εσωτερικά ηπειρωτικά τμήματα προς την κατεύθυνση των ακτών [1]. Το ηλιακό δυναμικό της Ελλάδας είναι πολύ υψηλό ξεπερνώντας τις 4200 κιλοβατώρες ανά τετραγωνικό μέτρο ημερησίως.

Το μέσο ετήσιο φυσικώς διαθέσιμο (θεωρητικό) δυναμικό της ηλιακής ακτινοβολίας για την Ελλάδα υπολογίζεται σε $195 \cdot 10^6$ GWh/a [2]. Το φυσικώς διαθέσιμο ηλιακό δυναμικό δεν είναι άμεσα εκμεταλλεύσιμο. Το οικονομικά εκμεταλλεύσιμο δυναμικό των συγκεντρωτικών ηλιακών τεχνολογιών για την Ελλάδα και άρα και της τεχνολογίας του ηλιακού πύργου είναι πάνω από 4.000 GWh/a.

3. ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΠΥΡΓΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια αναγέννηση στον τομέα των συγκεντρωτικών ηλιοθερμικών συστημάτων με την δημιουργία νέων μονάδων σε όλο τον κόσμο. Πρωτοπόροι στην εγκατάσταση και ανάπτυξη της τεχνολογίας στην Ευρώπη σήμερα είναι η Γερμανία και η Ισπανία, όπου ήδη λειτουργούν ηλιακοί πύργοι με συνολική ονομαστική ισχύ άνω των 50 MW.

Ακόμη και στη Γερμανία, η οποία δεν διαθέτει υψηλό ηλιακό δυναμικό, ολοκληρώθηκε το 2009 η εγκατάσταση ηλιακού εργοστασίου με ηλεκτρική ισχύ 1,5 MW [3]. Στην πόλη του Γιούλιχ (Jülich), στο κρατίδιο της Ρηνανίας Βεσφαλίας, δημιουργήθηκε γι' αυτόν τον σκοπό πεδίο με ηλιοστάτες με συνολική επιφάνεια περίπου 20.000 τ.μ. [4]. Αριστερά στην Εικόνα 1 διακρίνεται τμήμα του ηλιοστατικού πεδίου και δεξιά ο ηλιακός πύργος στο Γιούλιχ, ύψους 60 μέτρων με τον αποδέκτη.

Στον ηλιακό πύργο, ηλιοστάτες εστιάζουν την ηλιακή ακτινοβολία σε έναν μετατροπέα θερμότητας. Ο αποδέκτης βρίσκεται στην κορυφή του ηλιακού πύργου. Ο ρόλος του είναι η απορρόφηση της συγκεντρωμένης ηλιακής ακτινοβολίας και η απόδοση της θερμικής ενέργειας σε ένα μέσο μεταφοράς της σε υψηλές θερμοκρασίες.



Εικόνα 1: Ηλιακός πύργος του Γιούλιχ, Πηγή: DLR

Για την επίτευξη υψηλών θερμοκρασιών, άνω των 1000°C στην επιφάνειά του, χρειάζεται ένας μεγάλος αριθμός ηλιοστατών με επιφάνεια, η οποία ανάλογα με την ονομαστική ισχύ ξεπερνά δεκάδες χιλιάδες τετραγωνικά μέτρα. Η συγκεντρωμένη ακτινοβολία απορροφάται από ένα μέσο μεταφοράς της θερμότητας και μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια [3]. Η παραγόμενη θερμική ενέργεια χρησιμεύει για την παραγωγή ατμού για χρήση σε ατμοστρόβιλο με παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος σε γεννήτρια. Ο ατμός στη συνέχεια ψύχεται και συμπυκνώνεται σε νερό.

4. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΠΥΡΓΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Σημαντικό όμως δεν είναι μόνο το μέγεθος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από ηλιακούς πύργους. Αντίθετα κρίσιμη είναι η αλληλεπίδραση της ζήτησης ενέργειας με την προσφορά στο δίκτυο. Στη χώρα μας και ειδικά στις μεγάλες πόλεις και στα τουριστικά θέρετρα, η προσφορά της ηλιακής ενέργειας καλύπτει ιδανικά τη ζήτηση. Η ζήτηση ενέργειας είναι το καλοκαίρι υψηλότερη λόγω της αυξημένης χρήσης των κλιματιστικών κατά τις μεσημεριανές ώρες. Στην Ελλάδα υπάρχει η δυνατότητα χρήσης της τεχνολογίας του ηλιακού πύργου για μεγάλα συστήματα άνω των 10 MW, τα οποία έχουν υψηλό βαθμό απόδοσης [5].

Η Ελλάδα προσφέρεται όσο λίγες ευρωπαϊκές χώρες για την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας. Στις αρχές του 2008 το κόστος παραγωγής ρεύματος αγγίζει τιμές των 25 λεπτών/kWh. Η εμπειρία των καινούργιων ηλιακών μονάδων με πύργο στην Ευρώπη δείχνουν μια συνεχή μείωση του κόστους, το οποίο μπορεί μελλοντικά να κυμανθεί σε επίπεδα κάτω των 10 λεπτών ανά κιλοβατώρα. Έως το 2020 υπολογίζεται ότι το κόστος παραγωγής ρεύματος θα φτάσει τα 5 λεπτά ανά κιλοβατώρα.

Γενικά ο ηλιακός πύργος συμβάλλει όπως και όλες οι εναλλακτικές μορφές ενέργειας:

- στην εξοικονόμηση ενέργειας

- στην μείωση της εκπομπής διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, καθώς κατά τη λειτουργία αυτών των συστημάτων δεν παρατηρείται εκπομπή επιβλαβών αερίων
- στην ενεργειακή αυτάρκεια και την απεξάρτηση από τις συμβατικές πηγές ενέργειας
- στην εύρεση θέσεων εργασίας και στην ανάπτυξη μιας αγοράς σε ένα καινούργιο οικονομικό τομέα δραστηριότητας

H τεχνολογία του ηλιακού πύργου ειδικά για την Ελλάδα έχει πολλά πλεονεκτήματα διότι [6]:

- επιτυγχάνει έναν υψηλό αριθμό ωρών λειτουργίας σε συνδυασμό με
 - ο υβριδικά συστήματα ή με
 - ο θερμικούς συσσωρευτές
- συντελεί στην παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος σε μη διασυνδεδεμένα συστήματα
- έχει σύμφωνα με μια μελέτη του Γερμανικού Κέντρου Κίνησης στην Ατμόσφαιρα και στο Διάστημα (DLR) από το έτος 2004 το υψηλότερο δυναμικό εξοικονόμησης κόστους
- έχει τον υψηλότερο βαθμό απόδοσης για μεγάλες μονάδες, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών και της χρήσης του συμβατικού κύκλου
- μειώνει την εκπομπή του διοξειδίου του άνθρακα
- το ηλιοστατικό πεδίο δεν επιβαρύνει τις καλλιέργειες (λαχανικά) ή τα βοσκοτόπια
- είναι φιλική προς το περιβάλλον καθώς τα μέσα μεταφοράς της θερμότητας είναι μη επιβλαβή
- έχει υψηλή αξιοπιστία, καθώς τα περισσότερα τμήματα του εργοστασίου προέρχονται από συμβατικούς κύκλους
- επιτρέπει την τοποθέτηση των μονάδων και σε μη πεδινά εδάφη

Ιδανικές είναι πεδινές και ημιπεδινές περιοχές της Νότιας Ηπειρωτικής Ελλάδας, η Κρήτη και η Ρόδος. Στην ηπειρωτική Ελλάδα υπάρχει η δυνατότητα χρήσης της τεχνολογίας του ηλιακού πύργου για μεγάλα συστήματα άνω των 10 MW.

Τα πλεονεκτήματα αυτά της τεχνολογίας του ηλιακού πύργου επιβεβαιώνονται και από την ερευνητική δραστηριότητα του Ηλιακού Ινστιτούτου του Γιούλιχ (IJ) σε σχέση με τη δυνατότητα συνδυασμού της σε υβριδικά συστήματα με την καύση φυσικού αερίου ή βιοαερίου, καθώς και την σύνταξη μελετών και την συνεργασία του με μεγάλες εταιρείες, για την κατασκευή και λειτουργία νέων μονάδων ηλιακού πύργου σε διάφορα μέρη του κόσμου.

5. ΥΒΡΙΔΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΙΑΚΟΥ ΠΥΡΓΟΥ ΜΕ ΚΑΥΣΗ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Τους τελευταίους μήνες η ελληνική αγορά έρευνας και παραγωγής υδρογονανθράκων δραστηριοποιείται σηματοδοτώντας ένα νέο ξεκίνημα στο τομέα της αξιοποίησης κοιτασμάτων υδρογονανθράκων.

Τη δημιουργία ενός νέου τομέα της εθνικής οικονομίας σηματοδοτεί για παράδειγμα η υπογραφή των συμβάσεων μίσθωσης μεταξύ του ελληνικού δημοσίου και των ανάδοχων σχημάτων, για την έρευνα και εκμετάλλευση υδρογονανθράκων στα Ιωάννινα, τον Πατραϊκό Κόλπο και το Κατάκολο [7].

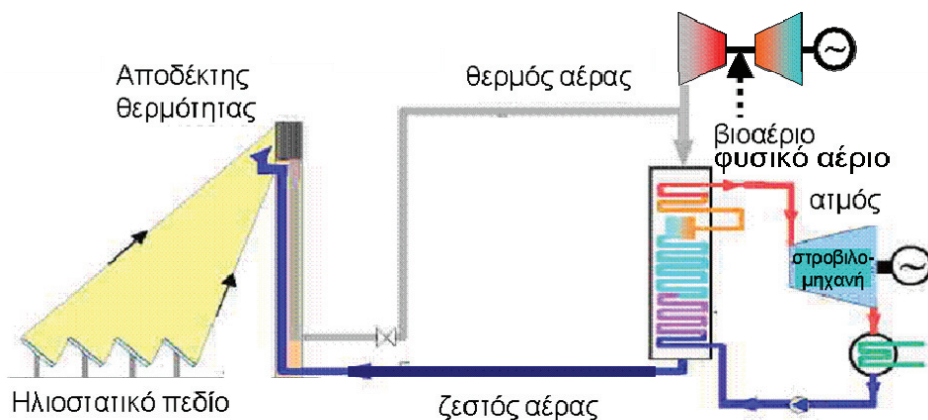
Ένα μικρό μέρος των εκμεταλλεύσιμων υδρογονανθράκων μπορούν ως καυσίμα να χρησιμοποιηθούν για την καύση σε αεριοστροβίλους σε συνδυασμό με ηλιακό πύργο (Εικόνα 2). Ένα τέτοιο υβριδικό σύστημα λειτουργεί τις ημέρες με καλή ηλιοφάνεια με τον ηλιακό πύργο χρησιμοποιώντας τη θερμότητα για την παραγωγή ατμού και τη νύχτα ή τις συννεφιασμένες μέρες μόνο με τη χρήση του αεριοστροβίλου [8]. Στον αεριοστροβίλο

επιτυγχάνεται η καύση καυσίμων και η απευθείας παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος με γεννήτρια, ενώ τα καυσάερια χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ατμού στον κοινό συμβατικό κύκλο του ηλιακού πύργου.

Η δυνατότητα της καύσης συμβατικών καυσίμων ή βιοκαυσίμων με τον ηλιακό πύργο επιτρέπει την μακροπρόθεσμη κάλυψη μέρους των ενεργειακών αναγκών της Ελλάδας από ηλιακές συγκεντρωτικές τεχνολογίες. Σε ένα ενδιάμεσο μεσοπρόθεσμο στάδιο με τη εγκατάσταση υβριδικών συστημάτων ηλιακού πύργου με καύση φυσικού αερίου, επιτυγχάνεται η εξοικονόμηση συμβατικών καυσίμων και η μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα με ταυτόχρονη μείωση του ενεργειακού κόστους και του κόστους επένδυσης.

Οι ηλιακοί πύργοι σε συνδυασμό με υβριδικά συστήματα μπορούν να φτάσουν μέχρι 8.000 ώρες λειτουργίας το χρόνο. Έτσι λειτουργούν ως μονάδες βάσεις, καθώς μπορούν να παράγουν σταθερά μεγάλες ποσότητες ενέργειας [9].

Ο συνδυασμός της καύσης φυσικού αερίου ή βιοαερίου με τον ηλιακό πύργο καθιστά εφικτή την χρησιμοποίηση ήδη υπάρχουσας τεχνολογίας και επιτυγχάνει κατ' αυτόν τον τρόπο τη συνεχή λειτουργία της μονάδας παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος, ακόμη και σε περιόδους ανεπαρκούς ηλιοφάνειας.



Εικόνα 2: Αρχή λειτουργίας του υβριδικού συστήματος του ηλιακού πύργου με καύση βιοαερίου ή φυσικού αερίου

Στα πλαίσια του προγράμματος «Ήλιος» θα μπορούσαν, εκτός από φωτοβολταϊκά συστήματα, να τοποθετηθούν τέτοιοι ηλιακοί πύργοι σε δημόσια ακίνητα προς όφελος της εθνικής οικονομίας και προς εξυπηρέτηση της αποπληρωμής του δημοσίου χρέους. Το πρόγραμμα «Ήλιος» είναι ένα ενεργειακό επενδυτικό πρόγραμμα, το οποίο προβλέπει την εξαγωγή καθαρής ενέργειας από την Ελλάδα προς τις χώρες της Κεντρικής Ευρώπης. Αντικείμενο του προγράμματος αποτελεί η ανάπτυξη, παραγωγή και αξιοποίηση του ηλιακού ενεργειακού δυναμικού της Ελλάδας [10].

Παράλληλα η διασύνδεση των Κυκλάδων με το ηπειρωτικό σύστημα οδεύει προς πραγματοποίηση, καθώς η ηλεκτρική του υποβρύχιο καλώδιο, που θα διασυνδέσει το Λαύριο με τη Σύρο και τη Σύρο με την Πάρο, την Τήνο και τη Μύκονο, προβλέπεται να γίνει στο β' εξάμηνο του 2016. Αυτό το έργο αποτελεί τον πρόδρομο για τη διασύνδεση όλων των νησιών του Αιγαίου. Επίσης, τεχνικά εφικτή με τα σημερινά τεχνολογικά δεδομένα κρίνεται και η διασύνδεση της Κρήτης με το ηπειρωτικό σύστημα. Έτσι θα μπορούν μελλοντικές εγκαταστάσεις υβριδικών συστημάτων με ηλιακό πύργο, για παράδειγμα στην Κρήτη, να τροφοδοτούν τόσο το νησιωτικό όσο και το ηπειρωτικό σύστημα με ηλεκτρική ενέργεια.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο ηλιακός πύργος αποτελεί μια ανταγωνιστική τεχνολογία. Ήδη σε ευρωπαϊκές χώρες λειτουργούν ή δημιουργούνται τέτοιες εγκαταστάσεις για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος.

Το οικονομικά εκμεταλλεύσιμο δυναμικό της τεχνολογίας του ηλιακού πύργου για την Ελλάδα είναι αρκετά υψηλό. Υπάρχουν πολλές περιοχές στην Ελλάδα, στις οποίες μπορούν να τοποθετηθούν ηλιακοί πύργοι για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Η Ελλάδα έχει πολύ περισσότερες ώρες ηλιοφάνειας από κάθε χώρα της Βόρειας Ευρώπης και θα μπορούσε να εξάγει ηλεκτρικό ρεύμα σε αυτές τις χώρες.

Οι ηλιακοί πύργοι σε συνδυασμό με υβριδικά συστήματα, όπως καύση φυσικού αερίου, μπορούν να φτάσουν μέχρι τις 8000 ώρες λειτουργίας το χρόνο. Με τη εγκατάσταση υβριδικών συστημάτων ηλιακού πύργου με καύση φυσικού αερίου, επιτυγχάνεται η εξοικονόμηση συμβατικών καυσίμων και η μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, με ταυτόχρονη μείωση του ενεργειακού κόστους.

Στην Ελλάδα είναι επιτακτική ανάγκη η ανάπτυξη της τεχνολογίας του ηλιακού πύργου, η οποία αποτελεί μια ανταγωνιστική ηλιακή τεχνολογία και ήδη σε άλλα κράτη της Μεσογείου αποτελεί πρώτη προτεραιότητα. Εάν αξιοποιηθεί μεταξύ των άλλων ΑΠΕ και η συγκεντρωτική ηλιακή τεχνολογία, μπορεί η Ελλάδα να αποτελέσει ενεργειακό κόμβο εξαγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στα Βαλκάνια και στην Κεντρική Ευρώπη. Η ελληνική οικονομία θα είχε έτσι ένα ανταγωνιστικό εξαγωγικό προϊόν και μάλιστα περιζήτητο.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ο συγγραφέας θέλει να ευχαριστήσει 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] Α. Ματζαράκης, Β. Κατσούλης: Διάρκεια των ωρών της ηλιοφάνειας στον ελληνικό χώρο. 7^ο Πανελλήνιο (Διεθνές) Συνέδριο Μετεωρολογίας, Κλιματολογίας και Φυσικής της Ατμόσφαιρας Λευκωσία, 28-30 Σεπτέμβρη 2004.
- [2] Γ. Τσιλιγκιρίδης: Το δυναμικό των εγχώριων ενεργειακών πόρων, Πρακτικά 5^{ου} Εθνικού Συνεδρίου για τις ΑΠΕ, σελ. 165-199, Αθήνα, 6-8 Νοεμβρίου 1996.
- [3] Σ. Αλεξόπουλος: Η τεχνολογία του ηλιακού πύργου και προοπτικές στην Ελλάδα, Ο κόσμος της Ενέργειας, τεύχος 11, σελ. 28-29, Απρίλιος - Ιούνιος 2007.
- [4] Praxistest für neuartiges Sonnenkraftwerk Solarturm Jülich: Strom aus gebündelten Licht, BMU, Berlin, 4. Juli 2006.
- [5] Σ. Αλεξόπουλος: Ηλιακός πύργος Έχουμε ήλιο, θέλουμε πύργους, Περιβάλλον 21, τεύχος 27, σελ. 30-31, Ιανουάριος-Φεβρουάριος 2009.
- [6] Σ. Χ. Αλεξόπουλος, Β. Χόφσμιτ: Εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με ηλιακό πύργο στη Γερμανία και μελλοντικές δυνατότητες ανάπτυξης της τεχνολογίας στην Ελλάδα και στην Κύπρο, 9ο Εθνικό Συνέδριο για τις ΑΠΕ, Γεροσκήπου, Πάφος, Κύπρος, 26-28 Μαρτίου 2009.
- [7] ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΘΕΜΑΤΑ ΙΕΝΕ ΜΑΙΟΣ 2014 ΤΕΥΧΟΣ 104.
- [8] S. Alexopoulos, B. Hoffschmidt, C. Rau, J. Sattler: Choice of solar share of a hybrid power plant of a central receiver system and a biogas plant in dependency of the geographical latitude, World Renewable Energy Congress Proceedings, Linköping, Sweden, 08.-11.05.2011.

- [9] Σ. Χ. Αλεξόπουλος: Η ηλιακή ενέργεια παράγων ανάπτυξης, Ο κόσμος της Ενέργειας, τεύχος 31, σελ. 43-46, Ιανουάριος – Μάρτιος 2013.
- [10] ΕΦΗΜΕΡΙΣ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ ΤΗΣ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑΣ ΤΕΥΧΟΣ ΠΡΩΤΟ Αρ. Φύλλου 70 ΝΟΜΟΣ ΥΠ' ΑΡΙΘ. 4062 Αξιοποίηση του πρώην Αεροδρομίου Ελληνικού – Πρόγραμμα ΗΛΙΟΣ – Προώθηση της χρήσης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές (Ενσωμάτωση Οδηγίας 2009/28/ΕΚ) – Κριτήρια Αειφορίας Βιοκαυσίμων και Βιορευστών (Ενσωμάτωση Οδηγίας 2009/30/ΕΚ), 30 Μαρτίου 2012.

ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΜΙΓΜΑΤΩΝ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΩΝ ΜΕΣΩΝ ΓΙΑ ΗΛΙΑΚΟΥΣ ΚΥΚΛΟΥΣ RANKINE

Π. Μαύρου^{1,2}, Α. Ι. Παπαδόπουλος¹, Mirko Stijerovic³, Π. Σεφερλής^{1,2*},
Patrick Linke³, Σ. Βουτετάκης¹

¹Ινστιτούτο Χημικών Διεργασιών και Ενεργειακών Πόρων, Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης, 57001 Θέρμη

²Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 54124 Θεσσαλονίκη, email: seferlis@auth.gr

³Chemical Engineering Department, Texas A&M University at Qatar, P.O. Box 23874, Doha, Qatar

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η επίδοση διαφόρων μιγμάτων δύο συστατικών για σύστημα ηλιακού οργανικού κύκλου Rankine (ORC) χαμηλής θερμοκρασίας με αποθήκευση θερμότητας. Συμβατικά μίγματα τα οποία έχουν μελετηθεί ευρέως στην δημοσιευμένη βιβλιογραφία συγκρίθηκαν με βέλτιστα μίγματα τα οποία έχουν προηγουμένως αποκτηθεί χρησιμοποιώντας μεθόδους υπολογιστικής μοριακής σχεδίασης (computer aided molecular design) στο Paradooulos et al. (2013). Η επίδοση του συστήματος μελετήθηκε αξιοποιώντας ένα τυπικό ετήσιο προφίλ ηλιακής ακτινοβολίας. Περιεκτικά μαθηματικά μοντέλα μόνιμης κατάστασης χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση του ηλιακού συλλέκτη καθώς και του ORC. Μελετήθηκε η επίδραση διαφορετικών μιγμάτων σε σημαντικές λειτουργικές παραμέτρους του συστήματος. Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι μίγματα σε διαφορετικές συστάσεις και συγκεντρώσεις έχουν σημαντικά διαφορετική επίδοση όσον αφορά παραμέτρους όπως το παραγόμενο έργο ή η απαιτούμενη επιφάνεια συλλέκτη. Συμπερασματικά, υψηλή συνολική επίδοση σε ηλιακούς ORC εμφανίζουν ρευστά με πρώτο συστατικό το νεοπεντάνιο.

Λέξεις Κλειδιά: Οργανικοί κύκλοι Rankine, Εργαζόμενα μέσα, Μίγματα, Ηλιακοί συλλέκτες

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα συστήματα οργανικών κύκλων Rankine (ORC) έχουν μελετηθεί ευρέως ως τεχνολογία παραγωγής ισχύος από πεδία χαμηλής ενθαλπίας εξ' αιτίας την εύκολης υλοποίησης και της υψηλής επίδοσης τους. Η λειτουργία τους βασίζεται στην απαγωγή θερμότητας με χρήση κατάλληλου οργανικού εργαζόμενου μέσου, το οποίο εξατμίζεται και στην συνέχεια εκτονώνεται σε στρόβιλο παράγοντας έργο. Το παραγόμενο έργο μπορεί στην συνέχεια να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες εφαρμογές, όπως σε συστήματα αφαλάτωσης (Li et al., 2013) ή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Quoilin et al., 2011). Οι ORC με πηγή την ηλιακή ακτινοβολία παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς διαφορετικά είδη συλλεκτών μπορούν να αξιοποιηθούν οδηγώντας σε διαφορετικά εύρη θερμοκρασιών του εκάστοτε ρευστού μεταφοράς θερμότητας. Ποικίλα είδη συλλεκτών έχουν μελετηθεί στην βιβλιογραφία όπως επίπεδοι (Wang et al., 2013), παραβολικοί (Quoilin et al., 2011) ή σύνθετοι παραβολικοί ηλιακοί συλλέκτες (Gang et al., 2011). Η επιλογή του εργαζόμενου μέσου, του ηλιακού συλλέκτη καθώς και ο τρόπος σύνδεσης των συσκευών επιδρούν σημαντικά στην απόδοση ολόκληρου του συστήματος. Οι επιδράσεις σημαντικών ιδιοτήτων των εργαζόμενων μέσων έχουν αναλυθεί στην εργασία των Stijerovic et al. (2012). Αρκετές από αυτές τις ιδιότητες χρησιμοποιήθηκαν ως κριτήρια απόδοσης στην εργασία των Papadopoulos et al. (2010a) η οποία αποτελεί την πρώτη αναφορά εφαρμογής μεθόδου υπολογιστικής μοριακής σχεδίασης σε εργαζόμενα μέσα για ORC. Η εργασία αυτή επεκτάθηκε πρόσφατα από τους Papadopoulos et al. (2013) σε μια καινοτόμα προσέγγιση για σχεδιασμό μιγμάτων οργανικών ρευστών για ORC.

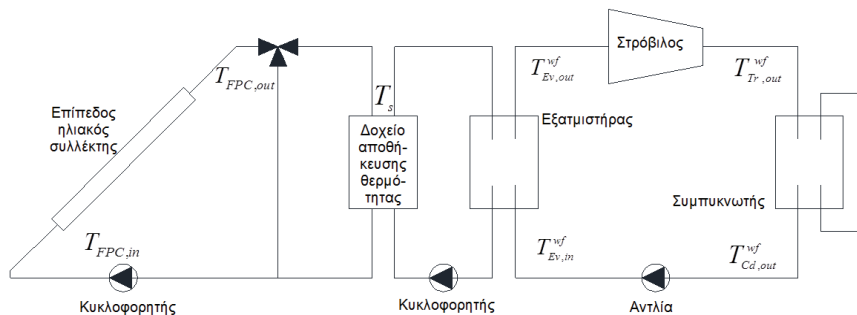
Οι περισσότερες ερευνητικές εργασίες που αφορούν σε συστήματα ORC αξιοποιούν ρευστά ενός συστατικού ως εργαζόμενο μέσο (Wang et al., 2013), εξ' αιτίας των πιο απλών θερμοδυναμικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών τους σε σχέση με τα μίγματα. Ο σημαντικότερος περιορισμός των καθαρών ρευστών είναι το σταθερό προφίλ θερμοκρασίας κατά την αλλαγή φάσης (Papadopoulos et al., 2013). Η εμφάνιση του σημείου ανάσχεσης (pinch) οδηγεί σε μεγάλη διαφορά θερμοκρασίας στο ένα άκρο του εναλλάκτη, με αποτέλεσμα η διεργασία να είναι ισχυρά μη-αντιστρεπτή και να έχει μειωμένο εξεργειακό βαθμό απόδοσης. Τα περισσότερα συστήματα ORC που έχουν μελετηθεί αξιοποιούν παραβολικούς ή σύνθετους παραβολικούς συλλέκτες οι οποίοι οδηγούν σε υψηλότερες θερμοκρασίες ρευστού μεταφοράς θερμότητας ακόμα και σε χαμηλές τιμές ηλιακής ακτινοβολίας με αποτέλεσμα την αυξημένη παραγωγή έργου. Ο πιο απλός κατασκευαστικά και ευρέως διαδεδομένος επίπεδος ηλιακός συλλέκτης οδηγεί σε χαμηλότερες θερμοκρασίες ρευστού μεταφοράς θερμότητας με αποτέλεσμα την χαμηλότερη παραγωγή έργου. Η αξιοποίηση μιγμάτων σε συστήματα ORC με επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένη απόδοση του συστήματος καθώς η εμφάνιση του σημείου ανάσχεσης αποφεύγεται. Αυτό συμβαίνει εξ' αιτίας του μεταβλητού προφίλ θερμοκρασίας των μιγμάτων κατά την αλλαγή φάσης με αποτέλεσμα την επίτευξη υψηλότερου εξεργειακού βαθμού απόδοσης. Μέχρι σήμερα λίγες εργασίες έχουν αναφερθεί στην αξιοποίηση μιγμάτων οργανικών ρευστών για ηλιακούς ORC (π.χ. Wang et al., 2010), μελετώντας κυρίως ένα σετ συμβατικών μορίων. Στην παρούσα εργασία συγκρίνονται για πρώτη φορά συμβατικά μίγματα με άλλα τα οποία έχουν προηγουμένως σχεδιαστεί για βέλτιστη λειτουργία (Papadopoulos et al. 2013). Τα μίγματα αυτά μελετώνται σε συνθήκες ετήσιου προφίλ ηλιακής ακτινοβολίας, εν αντιθέσει με την πλειοψηφία των δημοσιευμένων εργασιών οι οποίες θεωρούν σταθερές τιμές ηλιακής ακτινοβολίας.

2. ΜΟΝΤΕΛΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Η παρούσα εργασία μελετά την επίδοση ενός ηλιακού ORC με αποθήκευση θερμότητας ως προς διάφορα μίγματα οργανικών ρευστών (Εικόνα 1). Το σύστημα αποτελείται από κύκλωμα ηλιακού συλλέκτη το οποίο μεταφέρει θερμότητα σε ένα ενδιάμεσο κύκλωμα δοχείου αποθήκευσης θερμότητας και στην συνέχεια στον ORC διαμέσου του εξατμιστήρα.

Αρχικά, το ρευστό μεταφοράς θερμαίνεται στον συλλέκτη. Όταν η θερμοκρασία του ρευστού στην έξοδο του συλλέκτη $T_{FPC,out}$ γίνει μεγαλύτερη από την θερμοκρασία του ρευστού στο δοχείο αποθήκευσης θερμότητας T_s , η τρίοδη βάννα επιτρέπει στην ροή να κινηθεί προς το δοχείο. Στην αντίθετη περίπτωση η ροή επανακατευθύνεται στον συλλέκτη για περαιτέρω θέρμανση. Ο ORC ενεργοποιείται όταν η θερμοκρασία στο δοχείο γίνει μεγαλύτερη από μια θερμοκρασία $T_{s,min}$. Προς αποφυγή των καταστροφικών συνεπειών της συμπύκνωσης του εργαζόμενου μέσου στον στρόβιλο, η θερμοκρασία στην έξοδο του $T_{Tr,out}^{wf}$ ελέγχεται ώστε να είναι μεγαλύτερη της θερμοκρασίας δρόσου $T_{dew,Tr}^{wf}$ στις συνθήκες αυτές.



Εικόνα 1: Σχηματική απεικόνιση μελετώμενου συστήματος

Για τον επίπεδο συλλέκτη αναπτύχθηκε ένα δυναμικό μοντέλο λαμβάνοντας υπόψη αναλυτικές ροές θερμότητας και κατασκευαστικά χαρακτηριστικά. Ομοίως για τον κύκλο Rankine χρησιμοποιήθηκε ένα λεπτομερές μοντέλο της διεργασίας προσομοιώνοντας τα χαρακτηριστικά μεταφοράς θερμότητας και παραγωγής ισχύος, αποτυπώνοντας τη μη ιδανική συμπεριφορά των μιγμάτων. Το δοχείο αποθήκευσης θερμότητας συμπεριλαμβάνεται στο σύστημα για να εξασφαλίζει την συνεχή και ασφαλή λειτουργία του κύκλου παρά την διακοπτόμενη φύση της ηλιακής ακτινοβολίας.

2.2. ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ

Η ωφέλιμη παραγόμενη θερμότητα Q_u (W) από έναν επίπεδο ηλιακό συλλέκτη σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης υπολογίζεται ως η διαφορά μεταξύ της απορροφώμενης ηλιακής ακτινοβολίας και των θερμικών απωλειών (Duffie and Beckman, 1991):

$$Q_u = A_c [I_s - U_L (T_{pm} - T_{amb})] \quad (1)$$

όπου A_c (m^2) είναι η επιφάνεια του συλλέκτη, U_L (W/m^2K) ο συνολικός συντελεστής απωλειών θερμότητας και T_{pm} (K) και T_{amb} είναι η μέση θερμοκρασία της απορροφητικής πλάκας και η θερμοκρασία του περιβάλλοντος χώρου αντιστοίχως. Η απορροφώμενη ηλιακή ακτινοβολία I_s (W/m^2) υπολογίζεται ως εξής:

$$I_s = I_b R_b (\tau\alpha)_b + I_d (\tau\alpha)_d \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) + \rho_g (I_b + I_d) (\tau\alpha)_g \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) \quad (2)$$

όπου R_b είναι ο λόγος της ηλιακής ακτινοβολίας σε επικλινή επιφάνεια ως προς την ακτινοβολία σε επίπεδη επιφάνεια στο βόρειο ημισφαίριο, $(\tau\alpha)$ είναι ο γινόμενο διαπερατότητας - απορροφητικότητας και I είναι η προσπίπτουσα ακτινοβολία. Οι δείκτες b , d και g αντιπροσωπεύουν την άμεση, διάχυση και από το έδαφος ανακλώμενη συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας. Ο συνολικός συντελεστής απωλειών U_L είναι το άθροισμα των συντελεστών απωλειών από την άνω πλευρά U_{top} , την κάτω U_{bt} καθώς και τις πλαϊνές επιφάνειες U_e του συλλέκτη ως εξής:

$$U_L = U_{top} + U_{bt} + U_e \quad (3)$$

Η εξίσωση (1) μπορεί να εκφραστεί και ως:

$$\dot{Q}_u = F_R A_c [I_s - U_L (T_{in,FPC} - T_{amb})] \quad (4)$$

όπου F_R είναι ένας συντελεστής απαγωγής θερμότητας και $T_{in,FPC}$ (K) η θερμοκρασία εισόδου του ρευστού στον συλλέκτη. Οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται θέτοντας $\dot{Q}_u = \dot{Q}_u$.

2.3. ΜΟΝΤΕΛΟ ΔΟΧΕΙΟΥ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Θεωρώντας ότι το ρευστό στο δοχείο αποθήκευσης θερμότητας είναι σε πλήρη ανάμιξη με το ρευστό το οποίο επιστρέφει από την έξοδο του εξατμιστήρα και του συλλέκτη, το δοχείο μοντελοποιείται χρησιμοποιώντας το παρακάτω ισοζύγιο ενέργειας:

$$(MC_p) \frac{dT_s}{dt} = \dot{Q}_u - \dot{Q}_{loss} - \dot{Q}^{Ev} \quad (5)$$

όπου \dot{Q}_u (W) είναι ο ρυθμός θερμικού κέρδους από τον συλλέκτη, \dot{Q}_{loss} είναι ο ρυθμός απωλειών προς το περιβάλλον και \dot{Q}^{Ev} είναι ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας στον ORC διαμέσου του εξατμιστήρα. Η μεταβλητή M (kg) αντιπροσωπεύει την συνολική μάζα του ρευστού μέσα στο δοχείο. Καθώς τα δεδομένα για την ηλιακή ακτινοβολία I είναι ωριαία, για να υπολογίσουμε την τιμή του \dot{Q}_u στην διάρκεια της μίας ώρας, το \dot{Q}_u πολλαπλασιάζεται με 3600 s/h.

2.4. ΜΟΝΤΕΛΟ ORC

Ο ORC αξιοποιεί ένα μίγμα οργανικών ρευστών (wf) για την απαγωγή θερμότητας από το ρευστό μεταφοράς θερμότητας (hc). Οι συσκευές που τον απαρτίζουν είναι ένας εξατμιστήρας (Ev), ένας στρόβιλος (Tr), ένας συμπυκνωτής (Cd) και μια αντλία (Pm). Για να εκτιμηθεί η μέγιστη P_{max} (bar) και η ελάχιστη P_{min} πίεση το μίγμα θεωρείται κορεσμένος ατμός στην έξοδο του εξατμιστήρα. Ως αποτέλεσμα η P_{max} θεωρείται ίση με την πίεση δρόσου $P_{dew,wf}$ του εργαζόμενου μέσου στην έξοδο του εξατμιστήρα. Στην έξοδο του συμπυκνωτή το εργαζόμενο μέσο θεωρείται κορεσμένο υγρό με αποτέλεσμα η ελάχιστη πίεση P_{min} να θεωρείται ίση με την πίεση φυσαλίδας $P_{bub,wf}$. Η εκτίμηση των $P_{dew,wf}$ και $P_{bub,wf}$ πραγματοποιείται διαμέσου υπολογισμών ισορροπίας υγρού-αερίου με την χρήση κατάλληλης καταστατικής εξίσωσης. Η παροχή μάζας του εργαζόμενου ρευστού υπολογίζεται μέσω ισοζυγίου θερμότητας και μάζας στον εξατμιστήρα. Θεωρείται ότι το σημείο ανάσχεσης εμφανίζεται στον εξατμιστήρα την χρονική στιγμή που ξεκινά ο βρασμός. Ως αποτέλεσμα, η θερμοκρασία του ρευστού μεταφοράς θερμότητας στην έξοδο του

εναλλάκτη $T^{Ev,hc}$ που αντιστοιχεί στην θερμοκρασία του σημείου φυσαλίδας του εργαζόμενου μέσου $T_{bub}^{Ev,wf}$ υπολογίζεται ως εξής (Papadopoulos et al., 2013):

$$T^{Ev,hc} = T_{bub}^{Ev,wf} + \Delta T_{\min} \quad (6)$$

Στον εξατμιστήρα θεωρείται ισοβαρής προσθήκη θερμότητας και ισόθερμη αλλαγή φάσης. Η απορροφώμενη θερμότητα περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\dot{Q}^{Ev} = \dot{m}_f^{wf} (H_{Ev,out}^{wf} - H_{Ev,in}^{wf}) \quad (7)$$

όπου \dot{m}_f^{wf} (kg/s) είναι η παροχή μάζας του εργαζόμενου μέσου και H_{Ev}^{wf} (kJ/kg) η ενθαλπία του σε συνθήκες εισόδου και εξόδου από τον εξατμιστήρα. Στον στρόβιλο θεωρείται αδιαβατική και ισεντροπική εκτόνωση και το παραγόμενο έργο (kW) υπολογίζεται ως εξής:

$$\dot{W}^{Tr} = \eta^{Tr} \dot{m}_f^{wf} (H_{Tr,out}^{wf} - H_{Ev,out}^{wf}) \quad (8)$$

όπου η^{Tr} είναι ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του στρόβιλου. Για τον συμπυκνωτή θεωρείται ισοβαρής απόρριψη θερμότητας και ισόθερμη αλλαγή φάσης. Η απορριπτόμενη θερμότητα υπολογίζεται ως εξής:

$$\dot{Q}^{Cd} = \dot{m}^{wf} (H_{Cd,out}^{wf} - H_{Tr,out}^{wf}) \quad (9)$$

Για την αντλία θεωρείται αδιαβατική και ισόθερμη λειτουργία. Το καταναλισκόμενο έργο λαμβάνεται από την εξής εξίσωση:

$$\dot{W}^{Pm} = \dot{m}_f^{wf} (1/\rho^{wf}) (1/\eta^{Pm}) (P_{\max} - P_{\min}) \quad (10)$$

όπου ρ^{wf} (kg/m³) είναι η μέση πυκνότητα του εργαζόμενου μέσου μεταξύ της εισόδου και εξόδου της αντλίας και η^{Pm} είναι ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης της. Στην εξίσωση (10) οι μονάδες της πίεσης οφείλουν να είναι σε N/m².

Το μοντέλο του ORC επιλύεται σειριακά ξεκινώντας από τον εξατμιστήρα και προχωρώντας προς τις επόμενες συσκευές. Για τους απαραίτητους υπολογισμούς των ισορροπιών υγρού-αερίου χρησιμοποιείται η μέθοδος Newton-Raphson.

2.5. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

Τα θερμοδυναμικά κριτήρια απόδοσης τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση του συστήματος συμπεριλαμβάνουν τον θερμικό και εξεργειακό βαθμό απόδοσης. Ο θερμικός βαθμός απόδοσης του ORC υπολογίζεται ως εξής:

$$\eta_{th,ORC} = \frac{(\dot{W}^{Tr} - \dot{W}^{Pm})}{\dot{Q}^{Ev}} \quad (11)$$

Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης του ORC υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\eta_{II,ORC} = \frac{|\dot{W}^{Tr}| - \dot{W}^{Pm}}{\dot{m}^{hc} [(H^{hc} - H^{0,hc}) - T^{0,hc} (S^{hc} - S^{0,hc})]} \quad (12)$$

όπου \dot{m}^{hc} είναι η παροχή μάζας του ρευστού μεταφοράς θερμότητας, δηλαδή του ρευστού στο κύκλωμα του δοχείου αποθήκευσης θερμότητας. Οι μεταβλητές H^{hc} και S^{hc} (kJ/kgK) αντιπροσωπεύουν την ενθαλπία και εντροπία του ρευστού μεταφοράς θερμότητας στην θερμοκρασία του νερού μέσα στο δοχείο αποθήκευσης θερμότητας και $H^{0,hc}$ και $S^{0,hc}$ είναι η

ενθαλπία και η εντροπία του ρευστού μεταφοράς θερμότητας σε ονομαστική θερμοκρασία $T^{0,hc}$ ίση με 298 K.

3. ΕΦΑΡΜΟΓΗ

3.1. ΕΠΙΛΟΓΗ ΜΙΓΜΑΤΩΝ

Η διάταξη της Εικόνας 1 χρησιμοποιήθηκε για να μελετηθούν διάφορα μίγματα δύο συστατικών τα οποία έχουν προηγουμένως προταθεί για χρήση σε ηλιακούς ORC. Αυτά τα ρευστά συγκρίθηκαν με βέλτιστα μίγματα τα οποία έχουν σχεδιαστεί χρησιμοποιώντας μεθόδους υπολογιστικής μοριακής σχεδίασης (Papadopoulos et al., 2013). Τα μόρια που επιλέχθηκαν είναι αλκάνια, φθοριωμένα αλκάνια ή φθορομεθοξυ-αλκάνια εξ' αιτίας των διαθέσιμων αξιόπιστων δεδομένων για την πρόβλεψη των ιδιοτήτων τους χρησιμοποιώντας μεθόδους συνεισφοράς ομάδων (group contribution methods). Τέτοιες μέθοδοι περιλαμβάνουν μοντέλα για την πρόβλεψη μοριακών ιδιοτήτων οι οποίες απαιτούνται για την μετέπειτα εκτίμηση των ιδιοτήτων των μιγμάτων μέσω κυβικής καταστατικής εξίσωσης. Τα μίγματα που επιλέχθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Προτεινόμενα μίγματα		
	Συστατικό 1	Συστατικό 2
E1 ^a	Ισοπεντάνιο	Ισοβουτάνιο
E2 ^a	Ισοπεντάνιο	Εξάνιο
E3 ^a	Ισοπεντάνιο	Ισοεξάνιο
E4 ^a	Πεντάνιο	Εξάνιο
E5 ^b	Βουτάνιο	Πεντάνιο
E6 ^b	Ισοβουτάνιο	Πεντάνιο
M1 ^c	1,1,1,3,3,3-Εξαφθορο-προπάνιο	1-Φθορομεθοξυ-2,2,2-Τριφθορο-μεθυλ-αιθάνιο
M2 ^c	Νεοπεντάνιο	1,1,1-Τριφθορο-2-Τριφθορο-μεθυλ-βουτάνιο
M3 ^c	Νεοπεντάνιο	1,1,1-Τριφθοροπεντάνιο
M4 ^c	1,1,1- Τριφθορο -2-Τριφθορομέθυλπροπάνιο	2,2-Διφθορο-εξάνιο

^aChys et al., 2012; ^bLiu et al., 2014; ^cPapadopoulos et al., 2013

3.2. ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΕΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Για την ηλιακή ακτινοβολία, την ταχύτητα του ανέμου καθώς και την θερμοκρασία του περιβάλλοντος χρησιμοποιήθηκαν πραγματικά ωριαία δεδομένα τα οποία αντιπροσωπεύουν ένα τυπικό έτος στην Βόρεια Ελλάδα. Το πεδίο ηλιακών συλλεκτών αποτελείται από 6 συστοιχίες 11 συνδεδεμένων σε σειρά συλλεκτών, επιφάνειας $A_c = 2m^2$ ο καθένας. Ο συντελεστής εκπομπής της απορροφητικής πλάκας ε_p είναι ίσος με 84% και της υάλωσης ε_g με 4%. Η γωνία τοποθέτησης του συλλέκτη θεωρήθηκε ίση με 45°. Η χωρητικότητα του δοχείου αποθήκευσης θερμότητας είναι ίση με 3,960 m³. Το ρευστό στο κύκλωμα του ηλιακού συλλέκτη καθώς και σε αυτό του δοχείου αποθήκευσης θερμότητας είναι νερό. Ο ORC απενεργοποιείται όταν η θερμοκρασία του νερού στο δοχείο $T_{s,min}$ γίνει χαμηλότερη

των 80 °C. Η μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία στο δοχείο $T_{s,max}$ θεωρείται ίση με 95 °C για να αποφευχθεί η αλλαγή φάσης. Η θερμοκρασία του εργαζόμενου μέσου στην έξοδο του συμπυκνωτή $T_{out}^{Cd,wf}$ θεωρείται ίση με 30°C ανεξαρτήτως χρησιμοποιούμενου μίγματος. Η μικρότερη επιθυμητή διαφορά θερμοκρασίας στον εξατμιστήρα ΔT_{min} θεωρείται ίση με 10K.

Ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του στροβίλου η^{Tr} θεωρείται ίσος με 70% και του συμπιεστή η^{Pm} 50%. Όλα τα μίγματα μελετώνται για συγκεντρώσεις 0.1 – 0.9 γραμμομοριακό κλάσμα. Ο όρος «συγκέντρωση μίγματος» που χρησιμοποιείται στην ανάλυση των αποτελεσμάτων αναφέρεται στο ποσοστό του πρώτου συστατικού στο μίγμα.

Για την αξιολόγηση της επίδοσης των μιγμάτων η παρούσα εργασία θεωρεί μία αντικειμενική συνάρτηση η οποία λαμβάνει υπ' όψιν σημαντικές λειτουργικές παραμέτρους του ORC. Καθώς η προσομοίωση εκτείνεται στην διάρκεια ενός έτους, ένα από τα επιθυμητά αποτελέσματα είναι η επίτευξη αυξημένης διάρκειας λειτουργίας t_{op} . Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης $\eta_{II,ORC}$ αντιπροσωπεύει την παραγωγή έργου σε σχέση με το μέγιστο δυνατό έργο που μπορεί να παραχθεί από πηγή θερμοκρασίας ίσης με την διαθέσιμη ενώ ο θερμικός βαθμός απόδοσης $\eta_{th,ORC}$ αντιπροσωπεύει την μετατροπή της θερμότητας σε έργο. Προφανώς, και οι δύο δείκτες αυτοί είναι επιθυμητό να μεγιστοποιηθούν. Υψηλές τιμές παροχής μάζας του εργαζόμενου μέσου στον ORC \dot{m}_f^{wf} καθώς και υψηλές πιέσεις P_{max} συνήθως συσχετίζονται με αυξημένες τιμές εξοπλισμού με αποτέλεσμα να είναι επιθυμητή η ελαχιστοποίησή τους. Όλοι αυτοί οι παράγοντες συμπεριλαμβάνονται κανονικοποιημένοι στην παρακάτω αντικειμενική συνάρτηση, για την οποία αναζητείται η μέγιστη τιμή:

$$\max J = \frac{t_{op} \cdot \eta_{II,ORC} \cdot \eta_{th,ORC}}{\dot{m}_f^{wf} \cdot P_{max}} \quad (13)$$

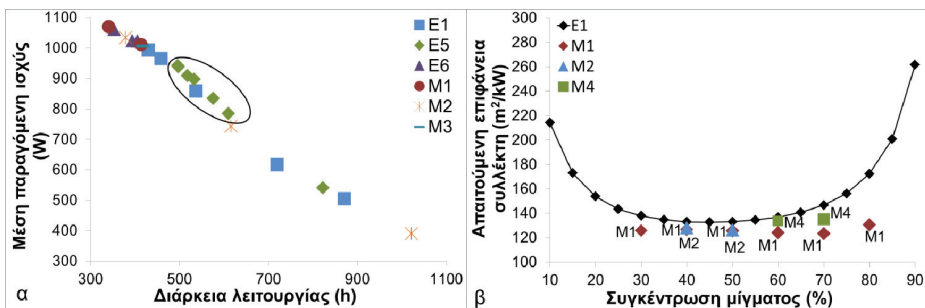
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται οι σημαντικότερες λειτουργικές παράμετροι του ORC για τα μίγματα με την βέλτιστη επίδοση όπως αυτά προέκυψαν χρησιμοποιώντας την εξίσωση (13). Για την παρούσα αντικειμενική συνάρτηση τα μίγματα του Πίνακα 2 αποδίδουν καλύτερα σε σχέση με αυτά της βιβλιογραφίας. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς τα μίγματα M1 - M4 έχουν σχεδιαστεί για εφαρμογές χαμηλής θερμοκρασίας όπως η παραγωγή ισχύος από γεωθερμικά πεδία (Paradopoulos et al., 2010b). Το βέλτιστο μίγμα που προκύπτει είναι το M1 σε σύσταση 60% νεοπεντάνιο. Παρατηρείται ότι πολλά μίγματα παρόμοιας σύστασης (αποτελούμενα δηλαδή από τα ίδια μόρια) επαναλαμβάνονται στο σετ των βέλτιστων μιγμάτων σε διαφορετικές συγκεντρώσεις. Αυτό προκύπτει εξ' αιτίας της αντικειμενικής συνάρτησης η οποία αποτυπώνει με βέλτιστο τρόπο ανταγωνιστικές σχέσεις μεταξύ των τιμών των λειτουργικών παραμέτρων του ORC. Τα παρακάτω βέλτιστα μίγματα παρουσιάζουν διάρκεια λειτουργίας μεταξύ 300 - 400 ωρών ανά έτος με την μέση παραγόμενη ισχύ να είναι της τάξης του 1 kW. Οι τιμές της μέγιστης P_{max} και ελάχιστης P_{min} μέσης πίεσης είναι χαμηλές αλλά υψηλότερες από 1 bar.

Στην Εικόνα 2α παρουσιάζεται ένα βέλτιστο κατά Pareto σετ μιγμάτων. Τα μίγματα αυτά παρουσιάζουν την βέλτιστη συσχέτιση μεταξύ διάρκειας λειτουργίας του κύκλου και μέσης παραγόμενης ισχύος. Αυτά είναι σχεδιασμένα μίγματα (π.χ. M1, M2 και M3) καθώς και συμβατικά (π.χ. E1, E5, E6). Μίγματα με μεγάλη διάρκεια λειτουργίας παράγουν χαμηλότερη ισχύ και αντιστρόφως. Μίγματα που παράγουν αυξημένη μέση ισχύ μπορούν να ικανοποιούν υψηλότερα φορτία λόγω του υψηλού εξεργειακού βαθμού απόδοσης τους. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε συντομότερη απενεργοποίηση του ORC εξ' αιτίας της ταχύτερης πτώσης θερμοκρασίας στο δοχείο αποθήκευσης θερμότητας. Μερικά μίγματα εμφανίζονται και στα

δύο άκρα του διαγράμματος. Για παράδειγμα, το E5 παρουσιάζει μεγάλη λειτουργική διάρκεια (823 h) και σχετικά χαμηλή παραγωγή ισχύος (0.54 kW) σε 90% συγκέντρωση ενώ σε 30% λειτουργεί για 576 h παράγοντας 0.835 kW. Αυτό αποδεικνύει ότι η παρουσία βουτανίου σε υψηλές συγκεντρώσεις οδηγεί σε αυξημένη διάρκεια λειτουργίας και χαμηλότερη παραγωγή ισχύος εν αντιθέσει με την υψηλή συγκέντρωση πεντανίου στο μίγμα E5. Αυτή η τάση παρατηρείται και στην Εικόνα 2α. Μίγματα εντός του κύκλου παράγουν τα υψηλότερα ποσά ισχύος στην διάρκεια του έτους (δηλαδή περισσότερες kWh). Αυτά είναι το E5 σε συγκεντρώσεις 30-80% και E1 σε 20%. Λίγα από τα μίγματα της Εικόνας 2α παρουσιάζονται στον Πίνακα 2 καθώς αυτός αναπτύχθηκε χρησιμοποιώντας διαφορετικά κριτήρια αξιολόγησης. Για παράδειγμα, οι μέσες μέγιστες πιέσεις στον ORC για τα μίγματα E1, E5 και E6 είναι υψηλότερες από αυτές των μιγμάτων του Πίνακα 2 ενώ ο μέσος εξεργειακός βαθμός απόδοσης είναι χαμηλότερος με αποτέλεσμα τα μίγματα αυτά να μην συμπεριλαμβάνονται στον Πίνακα 2. Χρησιμοποιώντας την αντικειμενική συνάρτηση ως κριτήριο επίδοσης τα αποτελέσματα προκύπτουν από μια ολοκληρωμένη αποτίμηση διαφόρων λειτουργικών παραμέτρων ενώ η Εικόνα 2 παρουσιάζει ένα συγκεκριμένο λειτουργικό κριτήριο.

Πίνακας 2: Βέλτιστα μίγματα για ηλιακού ORC								
Μίγμα	t_{op} (h)	$ \dot{W}^{Tr} - \dot{W}^{Pm}$ (kW)	\dot{m}_f^{wf} (kg/s)	P_{max} (bar)	P_{min} (bar)	$\eta_{th,ORC}$ (%)	$\eta_{II,ORC}$ (%)	J
60% M1	309	1.064	0.115	3.60	1.77	4.21	17.28	1.585
50% M1	299	1.051	0.112	3.10	1.55	4.03	17.12	1.568
70% M1	341	1.070	0.110	4.31	1.98	4.66	17.20	1.363
60% M4	327	0.990	0.105	2.29	1.06	4.11	15.99	1.310
40% M1	310	1.043	0.104	2.72	1.33	4.10	17.00	1.299
40% M2	325	1.031	0.104	2.17	1.02	4.23	16.68	1.128
80% M1	414	1.011	0.095	5.36	2.18	5.39	15.95	0.942
70% M4	384	0.977	0.097	2.77	1.17	4.72	15.57	0.881
50% M2	334	1.045	0.095	2.48	1.14	4.47	16.82	0.868
30% M1	334	1.050	0.09	2.46	1.11	4.49	16.89	0.756

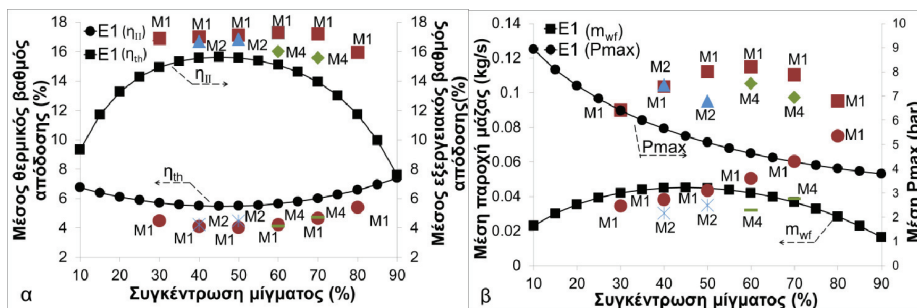


Εικόνα 2: α) Συσχέτιση μεταξύ μέσης παραγόμενης ισχύος και διάρκεια λειτουργίας, β) Επίδραση του ποσοστού μίγματος στην απαιτούμενη επιφάνεια συλλέκτη

Στην Εικόνα 2β παρουσιάζεται η μεταβολή της απαιτούμενη επιφάνεια συλλέκτη για την παραγωγή 1 kW ισχύος ως προς την συγκέντρωση του μίγματος. Η επίδοση των βέλτιστων μιγμάτων του Πίνακα 2 συγκρίνεται θεωρώντας το E1 ως μίγμα αναφοράς. Παρατηρείται ότι όσο αυξάνει η ποσότητα ενός δευτέρου συστατικού σε ένα ήδη υπάρχον μειώνεται η απαιτούμενη θερμική ενέργεια για την παραγωγή 1 kW ισχύος από τον ORC, με αποτέλεσμα να απαιτείται μικρότερη επιφάνεια ηλιακών συλλεκτών.

Στην Εικόνα 3α συγκρίνεται ο μέσος εξεργειακός και μέσος θερμικός βαθμός απόδοσης των μιγμάτων του Πίνακα 2 με το μίγμα αναφοράς E1. Κάθε ζεύγος δεικτών ανταποκρίνεται στην ίδια συγκέντρωση (κάθετα) ενός από τα μίγματα M1, M2 και M4 σε διαφορετικές συγκεντρώσεις. Για το M1, M2 και M4 οι δείκτες τετράγωνο, τρίγωνο και ρόμβος αντιπροσωπεύουν τιμές εξεργειακού βαθμού απόδοσης ενώ οι δείκτες κύκλος, αστέρι και πάλια αντιπροσωπεύουν τιμές θερμικού βαθμού απόδοσης. Όλα τα βέλτιστα μίγματα παρουσιάζουν υψηλότερο μέσο εξεργειακό βαθμό και χαμηλότερο μέσο θερμικό βαθμό απόδοσης σε σχέση με το E1.

Στην Εικόνα 3β παρουσιάζεται η μέση παροχή μάζας και η μέση μέγιστη πίεση των βέλτιστων μιγμάτων ως προς την συγκέντρωση χρησιμοποιώντας το E1 ως μίγμα αναφοράς. Για το E1, όσο αυξάνει στο μίγμα η ποσότητα του πιο πτητικού ισοβουτανίου η μέγιστη πίεση αυξάνεται. Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται για όλα μίγματα. Κάθε ζεύγος δεικτών (κάθετα) αντιπροσωπεύει την ίδια συγκέντρωση για τα βέλτιστα μίγματα. Για το M1, M2 και M4 οι δείκτες τετράγωνο, τρίγωνο και ρόμβος αντιπροσωπεύουν τις τιμές παροχής μάζας ενώ οι δείκτες κύκλος, αστέρι και πάλια αντιπροσωπεύουν τιμές μέγιστης πίεσης. Η μέση παροχή μάζας είναι χαμηλότερη για συγκεντρώσεις κοντά στα καθαρά συστατικά. Συνολικά η μέση παροχή μάζας των μιγμάτων του Πίνακα 2 είναι σημαντικά υψηλότερη σε σχέση με το E1. Προκύπτει λοιπόν ότι η αντικειμενική συνάρτηση που χρησιμοποιήθηκε αποτυπώνει τις ανταγωνιστικές σχέσεις που παρατηρήθηκαν μεταξύ του επιθυμητού υψηλού εξεργειακού βαθμού απόδοσης και της μη επιθυμητής υψηλής μέγιστης πίεσης.



Εικόνα 3: Επίδραση του ποσοστού μίγματος α) Στον μέσο εξεργειακό και μέσο θερμικό βαθμό απόδοσης, β) Στην μέση μέγιστη πίεση και μέση παροχή μάζας

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία αξιολογεί την επίδοση ενός ηλιακού συστήματος ORC χαμηλής θερμοκρασίας στην διάρκεια ενός έτους αξιοποιώντας διάφορα εργαζόμενα μέσα δύο συστατικών σε διάφορες συγκεντρώσεις. Για την προσομοίωση του συστήματος αναπτύχθηκε ένα λεπτομερές μοντέλο αποτελούμενο από έναν επίπεδο ηλιακό συλλέκτη, ένα δοχείο αποθήκευσης θερμότητας και έναν ORC λαμβάνοντας υπ' όψιν ροές θερμότητας και μάζας καθώς και τεχνικά χαρακτηριστικά. Η επίδοση του συστήματος υπό διαφορετικά εργαζόμενα μέσα αξιολογήθηκε χρησιμοποιώντας μια αντικειμενική συνάρτηση η οποία βελτιστοποιεί διάφορα σημαντικά λειτουργικά χαρακτηριστικά του κύκλου. Ανάμεσα στα

μίγματα που μελετήθηκαν το μίγμα νεοπεντανίου – 1,1,1-τριφθοροπεντανίου προκύπτει ως βέλτιστο σε διάφορες συγκεντρώσεις. Μεταξύ αυτών το μίγμα με 60% νεοπεντάνιο είναι το πιο αποδοτικό για την παρούσα ανάλυση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Chys M., van den Broek M., Vanslambrouck B., De Paepe M., 2012, "Potential of zeotropic mixtures as working fluids in organic Rankine cycles", *Energy*, 44, 623-632.
- [2] Duffie J.A., Beckman W.A., 1991, "Solar engineering of thermal processes", 2nd ed., Wiley, New York, USA.
- [3] Gang P., Jing L., Jie J., 2011, "Design and analysis of a novel low-temperature solar thermal electric system with two-stage collectors and heat storage units", *Renew. Energy*, 36, 2324-2333.
- [4] Li C., Kosmadakis G., Manolakos D., Stefanakos E., Papadakis G., Goswami, D.Y., 2013, "Performance investigation of concentrating solar collectors coupled with a transcritical organic Rankine cycle for power and seawater desalination co-generation", *Desalination*, 318, 107-117.
- [5] Liu Q., Duan Y., Yang Z., 2014, "Effect of condensation temperature glide on the performance of organic Rankine cycles with zeotropic mixture working fluids", *Appl. Energy*, 115, 394-404.
- [6] Papadopoulos A.I., Stijepovic M., Linke P., 2010a, "On the systematic design and selection of optimal working fluids for Organic Rankine Cycles", *Appl. Therm. Eng.*, 30, 760-769
- [7] Papadopoulos A.I., Stijepovic M., Linke P., Seferlis P., Voutetakis S., 2010b "Power generation from low enthalpy geothermal fields by design and selection of efficient working fluids for Organic Rankine Cycles", *Chem. Eng. Trans.*, 21, 61-66
- [8] Papadopoulos A.I., Stijepovic M., Linke P., Seferlis P., Voutetakis S., 2013, "Toward optimum working fluid mixtures for organic Rankine cycles using molecular design and sensitivity analysis", *Ind. Eng. Chem. Res.*, 52 (34), 12116-12133.
- [9] Stijepovic M., Linke P., Papadopoulos A.I., Grujic A., 2012, "On the role of working fluid properties in Organic Rankine Cycle performance", *Appl. Therm. Eng.*, 36, 406-413.
- [10] Quoilin Q., Orosz M., Hemond H., Lemort V., 2011, "Performance and design optimization of a low-cost organic Rankine cycle for remote power generation", *Sol. Energy*, 85, 955-966.
- [11] Wang M., Wang J., Zhao Y., Zhao P., Dai Y., 2013, "Thermodynamic analysis and optimization of a solar-driven regenerative organic Rankine cycle (ORC) based on flat-plate solar collectors", *Appl. Therm. Eng.*, 50, 816-825.
- [12] Wang J.L., Zhao L., Wand X.D., 2010, "A comparative study of pure and zeotropic mixtures in low temperature solar Rankine cycle", *Appl. Energy*, 87, 3366-3373.

ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΙΔΑΝΙΚΩΝ ΚΥΚΛΩΝ ΠΟΥ ΠΡΟΣΦΕΡΟΝΤΑΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΗΛΙΟΘΕΡΜΙΚΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

Δ. Π. Γεωργίου¹, Κ. Φ. Μηλιδόνης²

^{1,2}Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών

Πανεπιστήμιο Πατρών

26 504 Ρίον - Πάτρα

e-mail: dpgeorg@mech.upatras.gr, milidon@mech.upatras.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σε σταθμούς ισχύος στους οποίους η απαιτούμενη ενέργεια δίνεται μέσω συγκεντρωτικών ηλιακών κατόπτρων (Concentrated Solar Plants, CSP), η διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται για την προσθήκη της θερμότητας στον θερμοδυναμικό κύκλο πάνω στον οποίο λειτουργεί ο σταθμός. Οι θερμοδυναμικές διεργασίες, στις οποίες βασίζεται ο σχεδιασμός των επιμέρους εξαρτημάτων, διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην βελτιστοποίηση της απόδοσης του σταθμού ισχύος. Στην εργασία αυτή γίνεται μελέτη και παραμετρική ανάλυση συμβατικών ιδανικών θερμοδυναμικών κύκλων οι οποίοι προσφέρονται για λειτουργία ηλιοθερμικών σταθμών ισχύος. Αν και η ανάλυση γίνεται με βάση τους απλούς ιδανικούς κύκλους, εντούτοις, μέσω της παραμετρικής ανάλυσης, παρέχεται μια βάση για γρήγορες εκτιμήσεις των επιδράσεων που έχουν οι ελεύθερες μεταβλητές στην απόδοση και το παραγόμενο έργο του κύκλου. Επιπλέον, τέτοιου είδους εκτιμήσεις παρέχουν μια πρωταρχική εικόνα για το μέγεθος και το κόστος του σταθμού ισχύος για συγκεκριμένη εισροή θερμότητας στον κύκλο.

Λέξεις Κλειδιά: Ηλιοθερμικοί Σταθμοί Ισχύος, Θερμοδυναμική ανάλυση ηλιοθερμικών κύκλων

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Λόγω των στρατηγικών ελαχιστοποίησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και των ενεργειακών απαιτήσεων, οι ηλιοθερμικοί σταθμοί ισχύος προσελκύουν μεγάλο ενδιαφέρον, με αποτέλεσμα να διεξάγεται εκτενής έρευνα σε θέματα που αφορούν την σύζευξη θερμοδυναμικών κύκλων με ηλιακούς συλλέκτες. Συγκεκριμένα, κύκλοι ατμού, αερίου αλλά και συνδυασμένοι κύκλοι, αποτελούν ρεαλιστικά παραδείγματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας όταν η πηγή θερμότητας (heat source) είναι η ηλιακή ενέργεια. Η θερμοδυναμική απόδοση (efficiency) και η ισχύς εξόδου (power output) αποτελούν βασικές παραμέτρους που επηρεάζουν τον σχεδιασμό και τα λειτουργικά κόστη ενός σταθμού ισχύος. Κατά την διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας έχουν γίνει σημαντικές προσπάθειες ως προς την βελτίωση των αεριοστροβίλων (gas turbines) με σκοπό, μεταξύ άλλων, την βελτίωση της απόδοσης του κύκλου και την αύξηση της ισχύος εξόδου. Πλέον, η τεχνολογία των υλικών επιτρέπει την κατασκευή πτερυγώσεων (turbine blades) του στροβίλου που λειτουργούν στο εύρος των 1500°C επιτυγχάνοντας αποδόσεις μέχρι και 40% [1].

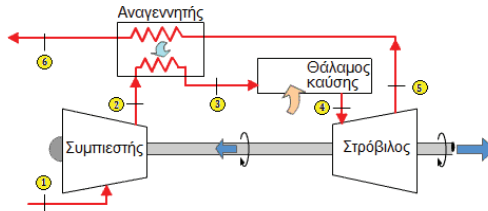
Από θεωρητικής σκοπιάς, έχουν προταθεί και εφαρμοστεί αρκετοί τρόποι τροποποίησης των απλών θερμοδυναμικών κύκλων με στόχο την αύξηση της απόδοσης τους. Μερικές από τις τροποποιήσεις αυτές, συζητούνται από τους Durmayaz et al. [2] και συμπεριλαμβάνουν διαδικασίες αναγέννησης (regeneration) (π.χ. [3]), ισόθερμης προσθήκης θερμότητας (π.χ. [4]), συμπίεσης με ενδιάμεση ψύξη (intercooled compression) (π.χ. [5]), εκτόνωση με αναθέρμανση (reheat expansion) ή και συνδυασμό των προηγούμενων (π.χ. [6]).

Οι προαναφερθείσες τροποποιήσεις θερμοδυναμικών κύκλων έχουν μελετηθεί και στη βάση ηλιοθερμικών σταθμών ισχύος, όπως για παράδειγμα ηλιακοί κύκλοι Carnot με εξωτερικές [7] και εσωτερικές αναντιστρεπτότητες (irreversibilities) [8], κύκλοι Stirling και Ericsson [9], κύκλοι Brayton [10], όπως επίσης και κύκλοι Rankine [11]. Οι κύκλοι αυτοί διερευνήθηκαν χρησιμοποιώντας διαφορετικά κριτήρια βελτιστοποίησης και διάφορες πηγές αναντιστρεπτοτήτων, οι οποίες είναι πάντα παρούσες σε κάθε πραγματική εφαρμογή, όπως για παράδειγμα απώλειες πίεσης κατά την διεργασία προσθήκης και απόρριψης θερμότητας, αναντιστρεπτότητας στον στρόβιλο και τον συμπιεστή, απώλειες στους ηλιακούς συλλέκτες, αναντιστρεπτότητας στους λέβητες και συμπυκνωτές κ.λ.π. Ο προσφάτως ανεπτυγμένος κύκλος Braysson [12] είναι ένας ακόμη κύκλος ο οποίος ενδείκνυται επίσης για χρησιμοποίηση σε ηλιοθερμικούς σταθμούς ισχύος. Σαν υβριδικός, ο κύκλος Braysson βασίζεται στον συμβατικό κύκλο Brayton για την προσθήκη θερμότητας σε υψηλή θερμοκρασία και στον κύκλο του Ericsson για την απόρριψη θερμότητας σε χαμηλή θερμοκρασία. Η απόδοση του ηλιοθερμικού κύκλου Braysson έχει διερευνηθεί παραμετρικά με βάση τα διάφορα χαρακτηριστικά λειτουργίας του (π.χ. [13-15]).

Η χρήση της διεργασίας αναγέννησης (π.χ. στον κύκλο του Brayton: Εικόνα 1), αποτελεί μια από τις καλύτερες τροποποιήσεις που γίνονται στον κύκλο προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοση και να μειωθεί η κατανάλωση καυσίμου, εάν βέβαια η προσθήκη θερμότητας στον κύκλο γίνεται με καύση ορυκτών καυσίμων. Κατά την αναγέννηση, εισάγεται στον κύκλο ένας εναλλάκτης θερμότητας (αναγεννητής) ο οποίος προθερμαίνει τον αέρα που εξέρχεται από τον συμπιεστή (στην κατάσταση 2) μεταφέροντας θερμότητα από τα θερμά καυσάερια που εξέρχονται από τον στρόβιλο (στην κατάσταση 5). Στην περίπτωση τώρα στην οποία η παροχή θερμότητας (π.χ. μεταξύ των καταστάσεων 3 και 4) στον κύκλο δίνεται μέσω ηλιοθερμικής ενέργειας, το κύριο πλεονέκτημα της χρησιμοποίησης του αναγεννητή είναι η προθέρμανση του λειτουργούντος ρευστού πριν από την είσοδο του στους ηλιακούς συλλέκτες. Αυτό οδηγεί στην μείωση της απαιτούμενης επιφάνειας του συστήματος των ηλιακών συλλεκτών με συνεπακόλουθη μείωση της απαιτούμενης επένδυσης και των κοστίων συντήρησης.

Η παρούσα μελέτη εστιάζεται στην θερμοδυναμική ανάλυση των ιδανικών κύκλων του Brayton, του Otto και του Braysson, με και χωρίς αναγεννητική προθέρμανση, οι οποίοι μπορούν να

αποτελέσουν την βάση για την λειτουργία σταθμών ισχύος οι οποίοι εκμεταλλεύονται την ηλιακή ενέργεια. Η ανάλυση των κύκλων διενεργείται χρησιμοποιώντας αδιάστατους όρους μεταβλητών οι οποίες παρέχουν μια βάση για γρήγορες εκτιμήσεις των μεταβολών των ελεύθερων μεταβλητών σε σχέση με μια δεδομένη κατάσταση αναφοράς. Η ανάλυση αυτή βασίζεται στο γεγονός ότι η ανάλυση των ιδανικών τάσεων δεν αποδίδει σωστά τα επίπεδα απόδοσης των πραγματικών κύκλων, αλλά αποδίδει αρκετά ικανοποιητικά τις τάσεις της επίδρασης που επιφέρουν οι μεταβολές των ελεύθερων μεταβλητών του εκάστοτε κύκλου.



Εικόνα 1: Σχηματική αναπαράσταση του αναγεννητικού κύκλου Brayton

2. Η ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΑΠΛΩΝ ΙΔΑΝΙΚΩΝ ΚΥΚΛΩΝ

Οι ιδανικοί θερμοδυναμικοί κύκλοι του Brayton, Braysson και Otto φαίνονται στην Εικόνα 2α, 2β και 2γ αντίστοιχα σε διαγράμματα Θερμοκρασίας - Εντροπίας. Καθορίζοντας σαν P_i και T_i την πίεση και θερμοκρασία αντιστοίχως για κάθε σημείο του κύκλου i (όπως καθορίζονται στην Εικόνα 2), τότε μπορούν να καθοριστούν οι παρακάτω αδιάστατοι όροι:

$$\theta = \frac{T_3}{T_1} \quad (1)$$

όπου θ είναι ο λόγος μεταξύ του μέγιστου και ελάχιστου ορίου θερμοκρασιών κάτω από τον οποίο λειτουργεί ο κύκλος. Επιπλέον καθορίζοντας σαν r τον λόγο συμπίεσης για τον κύκλο του Otto τότε

$$\theta = r^{\gamma-1} \quad (2)$$

ενώ η αντίστοιχη αδιάστατη ποσότητα θ για τους κύκλους Brayton και Braysson καθορίζεται με βάση τον λόγο πιέσεων Π_c στον συμπίεστή ως:

$$\theta = \Pi_c^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (3)$$

2.1. Ο κύκλος Brayton

Η διεργασία προσθήκης θερμότητας στον κύκλο Q_{in} υπολογίζεται εύκολα ως

$$Q_{in,Br} = \dot{m}_a C_p T_1 (\theta - 1) \quad (4)$$

όπου C_p η ειδική θερμοχωρητικότητα και \dot{m}_a η παροχή του λειτουργούντος ρευστού. Αντίστοιχα η απορριπτόμενη από τον κύκλο θερμότητα Q_{out} υπολογίζεται ως:

$$Q_{out,Br} = \dot{m}_a C_p (T_4 - T_1) = \dot{m}_a C_p T_1 \left(\frac{T_4}{T_1} - 1 \right) \quad (5)$$

όπου

$$T_4 = T_3 \left(\frac{P_4}{P_3} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = T_3 \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \frac{T_3}{\Pi_c^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \quad (6)$$

και

$$\frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_1} \frac{1}{\Pi_c^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} = \frac{\theta}{\theta} \quad (7)$$

Τότε το καθαρό έργο εξόδου W_{net} του κύκλου υπολογίζεται ως εξής:

$$W_{net,Brt} = Q_{in} - Q_{out} = \dot{m}_a C_p T_1 (\theta - \theta) \left\{ 1 - \frac{1}{\theta} \right\} \quad (8)$$

και η ως γνωστόν η απόδοση του κύκλου είναι:

$$n_{ID,Brt.} = 1 - \frac{1}{\frac{\gamma-1}{\gamma} \Pi_c} = 1 - \frac{1}{\theta} \quad (9)$$

2.2. Ο κύκλος Braysson

Εδώ, η διεργασία προσθήκης θερμότητας στον κύκλο $Q_{in,BrS}$ είναι ισοβαρής και ίδια με αυτή του κύκλου Brayton, δηλαδή $Q_{in,BrS} = Q_{in,BrT}$ (Εξίσωση (4)), ενώ δουλεύοντας αντίστοιχα η θερμική απόδοση του κύκλου Braysson προκύπτει ως

$$n_{ID,BrS.} = 1 - \frac{Q_{OUT}}{Q_{IN}} = 1 - \frac{\ln\left(\frac{\theta}{\theta}\right)}{(\theta - \theta)} \quad (10)$$

όπου

$$Q_{in,BrS} = \dot{m}_a C_p T_1 (\theta - \theta) \quad (11)$$

και

$$Q_{out,BrS} = \dot{m}_a R T_1 \ln\left(\frac{P_1}{P_4}\right) = \dot{m}_a R T_1 \ln\left(\frac{\theta}{\theta}\right) \quad (12)$$

ενώ το καθαρό έργο εξόδου υπολογίζεται από:

$$W_{net,BrS} = \dot{m}_a C_p T_1 (\theta - \theta) \left[1 - \frac{\ln\left(\frac{\theta}{\theta}\right)}{\theta - \theta} \right] \quad (13)$$

2.3. Ο κύκλος Otto

Η διεργασία προσθήκης θερμότητας στον κύκλο Otto δίνεται από

$$Q_{in,Otto} = \dot{m}_a C_v (T_3 - T_2) = \dot{m}_a C_v T_1 (\theta - \theta) \quad (14)$$

ενώ η διεργασία αποβολής θερμότητας υπολογίζεται ως

$$Q_{out} = \dot{m}_a C_v (T_4 - T_1) = \dot{m}_a C_v T_1 \left(\frac{\theta}{\theta} - 1 \right) \quad (15)$$

Επιπλέον, ο λόγος των θερμοκρασιών T_4/T_1 υπολογίζεται

$$\frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_1} \left(\frac{V_3}{V_1} \right)^{\gamma-1} = \frac{\theta}{\theta} \quad (16)$$

Η θερμική απόδοση του κύκλου μπορεί να υπολογιστεί ως ακολούθως:

$$n_{ID,Otto.} = 1 - \frac{Q_{OUT}}{Q_{IN}} = 1 - \frac{\left(\frac{\theta}{\theta} - 1\right)}{(\theta - \theta)} = 1 - \frac{1}{\theta} \quad (17)$$

Το καθαρό έργο του κύκλου μπορεί εύκολα να υπολογιστεί

$$W_{net,Otto} = Q_{in} - Q_{out} = \dot{m}_a C_v T_1 (\theta - \theta) \left\{ 1 - \frac{1}{\theta} \right\} \quad (18)$$

3. Η ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΑΝΑΓΕΝΝΗΤΙΚΩΝ ΙΔΑΝΙΚΩΝ ΚΥΚΛΩΝ

3.1. Ο κύκλος Brayton

Η προσθήκη θερμότητας $Q_{in,BrT}^{reg.}$ στον αναγεννητικό κύκλο του Brayton υπολογίζεται:

$$Q_{in,BrT}^{reg.} = \dot{m}_a C_p (T_3 - T_5) = \dot{m}_a C_p T_1 \theta \left(1 - \frac{1}{\theta} \right) \quad (19)$$

ενώ η αντίστοιχη αποβολή θερμότητας $Q_{out,BrT}^{reg.}$ υπολογίζεται από

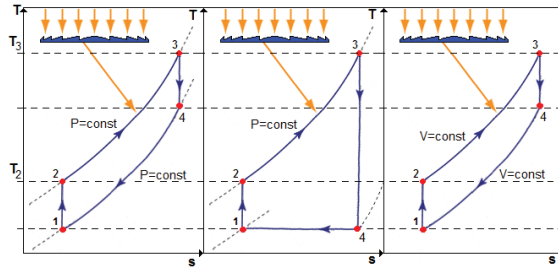
$$Q_{out,Br}^{reg.} = \dot{m}_a C_p (T_6 - T_1) = \dot{m}_a C_p T_1 (\theta - 1) \quad (20)$$

και τελικά η θερμική απόδοση του αναγεννητικού κύκλου $n_{th,Br}^{reg.}$ δίνεται απο

$$n_{th,Br}^{reg.} = 1 - \frac{Q_{OUT}}{Q_{IN}} = 1 - \frac{\theta}{\theta} \quad (21)$$

και το έργο εξόδου

$$W_{net,Br}^{reg.} = Q_{in} - Q_{out} = \dot{m}_a C_p T_1 \left(\frac{\theta}{\theta} - 1 \right) (\theta - 1) \quad (22)$$



α. Ιδανικός Brayton β. Ιδανικός Braysson γ. Ιδανικός Otto

Εικόνα 2: Οι ιδανικοί κύκλοι του Brayton, Braysson και Otto.

3.2. Ο κύκλος Braysson

Θεωρώντας ότι $T_4 = T_5$, $T_6 = T_2$, $T_7 = T_1$ και $\lambda = T_4/T_2$ τότε

$$T_4 = \lambda \theta T_1 \quad (23)$$

Ενώ η θερμοκρασία T_4 περιορίζεται μεταξύ των ορίων $T_3 > T_4 > T_2 \Rightarrow \theta > \lambda \theta > \theta \Rightarrow \theta/\theta > \lambda > 1$ και ο λόγος των πιέσεων P_4/P_3 μπορεί εύκολα να υπολογιστεί ως

$$\frac{P_4}{P_3} = \Pi_c P_1 \left(\frac{\lambda \theta T_1}{\theta T_1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (24)$$

και αντίστοιχα ο λόγος πιέσεων P_4/P_1 γράφεται

$$\frac{P_4}{P_1} = \left(\frac{\lambda \theta^2}{\theta} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (25)$$

Τότε η προσθήκη θερμότητας $Q_{in,Br}^{reg.}$ γράφεται ως

$$Q_{in,Br}^{reg.} = \dot{m}_a C_p (T_3 - T_5) = \dot{m}_a C_p T_1 (\theta - \lambda \theta) \quad (26)$$

ενώ η αντίστοιχη αποβολή θερμότητας $Q_{out,Br}^{reg.}$ υπολογίζεται απο

$$Q_{out,Br}^{reg.} = \dot{m}_a C_p (T_6 - T_7) + \dot{m}_a R T_1 \ln \left(\frac{P_1}{P_7} \right) = \dot{m}_a C_p T_1 \left\{ (\theta - 1) + \ln \left(\frac{\theta}{\lambda \theta^2} \right) \right\} \quad (27)$$

και τελικά η θερμική απόδοση του αναγεννητικού κύκλου $n_{th,Br}^{reg.}$ δίνεται απο

$$n_{th,Br}^{reg.} = 1 - \frac{Q_{OUT}}{Q_{IN}} = 1 - \frac{(\theta - 1) + \ln \left(\frac{\theta}{\lambda \theta^2} \right)}{\theta - \lambda \theta} \quad (28)$$

και το έργο εξόδου

$$W_{net,Br}^{reg.} = Q_{in} - Q_{out} = \dot{m}_a C_p T_1 \left\{ (\theta - \lambda \theta) - (\theta - 1) - \ln \left(\frac{\theta}{\lambda \theta^2} \right) \right\} \quad (29)$$

3.3. Ο κύκλος Otto

Θεωρώντας ότι $T_4 = T_5$, $T_6 = T_2$ και $T_2 = r^{\gamma-1}T_1 = \theta T_1$ τότε ο λόγος των θερμοκρασιών T_4/T_1 υπολογίζεται

$$\frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_1} \left(\frac{V_3}{V_4} \right)^{\gamma-1} = \frac{\theta}{\theta} \quad (30)$$

και τότε η προσθήκη θερμότητας $Q_{in, Otto}^{reg.}$ γράφεται ως

$$Q_{in, Otto}^{reg.} = \dot{m}_a C_p (T_3 - T_5) = \dot{m}_a C_p T_1 \theta \left(1 - \frac{1}{\theta} \right) \quad (31)$$

ενώ η αντίστοιχη αποβολή θερμότητας $Q_{out, Otto}^{reg.}$ υπολογίζεται απο

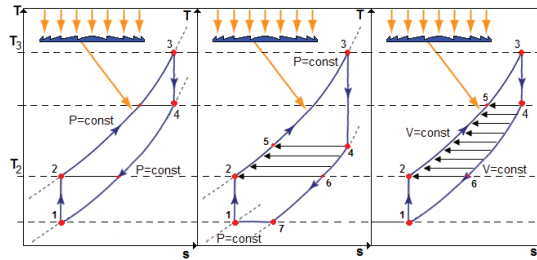
$$Q_{out, Otto}^{reg.} = \dot{m}_a C_v (T_6 - T_1) = \dot{m}_a C_v T_1 \left(\frac{T_2}{T_1} - 1 \right) = \dot{m}_a C_v T_1 (\theta - 1) \quad (32)$$

και τελικά η θερμική απόδοση του αναγεννητικού κύκλου $n_{th, Otto}^{reg.}$ δίνεται απο

$$n_{th, Otto}^{reg.} = 1 - \frac{Q_{OUT}}{Q_{IN}} = 1 - \frac{(\theta - 1)}{\theta \left(\frac{\theta - 1}{\theta} \right)} = 1 - \frac{\theta}{\theta} \quad (33)$$

και το έργο εξόδου

$$W_{net, Otto}^{reg.} = Q_{in} - Q_{out} = \dot{m}_a C_v T_1 \left\{ (\theta - 1) \left(\frac{\theta}{\theta} - 1 \right) \right\} \quad (34)$$



α. Ιδανικός Brayton με αναγέννηση β. Ιδανικός Braysson με αναγέννηση γ. Ιδανικός Otto με αναγέννηση

Εικόνα 3: Οι ιδανικοί αναγεννητικοί κύκλοι του Brayton, Braysson και Otto.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Όλες οι αποδόσεις των παραπάνω κύκλων έχουν υπολογιστεί σαν συνάρτηση της αδιάστατης θερμοκρασίας θ και της αδιάστατης παραμέτρου θ . Οι δύο αυτές παράμετροι αποτελούν τις πραγματικές "ελεύθερες" μεταβλητές των κύκλων. Το καθαρό έργο εξόδου W_{net} για τον κάθε κύκλο μπορεί επίσης να υπολογιστεί σαν συνάρτηση μόνο των όρων θ και θ διαιρώντας τις αντίστοιχες σχέσεις με το γινόμενο $\dot{m}_a C_v T_1$. Τότε για τον κάθε ιδανικό κύκλο προκύπτει:

$$W_{net, Brt}^* = (\theta - \theta) \left\{ 1 - \frac{1}{\theta} \right\} \quad (35)$$

$$W_{net, Brs}^* = (\theta - \theta) \left[1 - \frac{\ln \left(\frac{\theta}{\theta} \right)}{\theta - \theta} \right] \quad (36)$$

$$W_{net,Otto}^* = (\theta - 1) \left\{ 1 - \frac{1}{\theta} \right\} \tag{37}$$

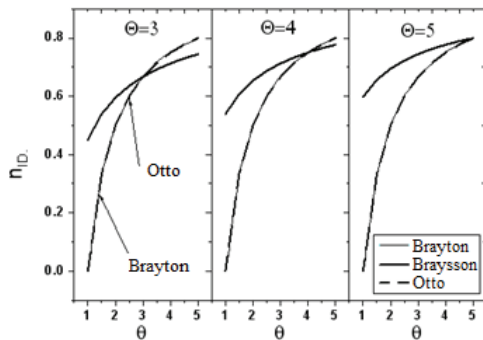
ενώ αντίστοιχα για τους ιδανικούς αναγεννητικούς κύκλους προκύπτει

$$W_{net,Brt}^{reg,*} = \left(\frac{\theta}{\lambda} - 1 \right) (\theta - 1) \tag{38}$$

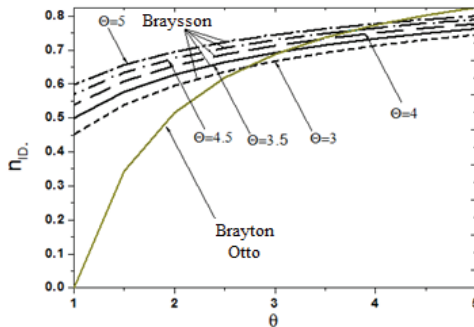
$$W_{net,Brs}^{reg,*} = (\theta - \lambda\theta) - (\theta - 1) \ln \left(\frac{\theta}{\lambda\theta^2} \right) \tag{39}$$

$$W_{net,Otto}^{reg,*} = \frac{1}{\gamma} (\theta - 1) \left(\frac{\theta}{\lambda} - 1 \right) \tag{40}$$

Για την σύγκριση τόσο των θερμικών αποδόσεων των κύκλων όσο και των αντίστοιχων έργων εξόδου, η τιμή του μέγιστου λόγου θερμοκρασιών θ που εμφανίζονται στον κύκλο περιορίζεται μεταξύ ορίων της θερμοκρασίας (π.χ. T_3) την οποία μπορούν να υποστούν παρατεταμένα (π.χ. στους ηλιακούς συλλέκτες) οι συμβατικοί χάλυβες (π.χ. $\theta \cong 3$) και των ορίων θερμοκρασίας την οποίο μπορούν να αντεπεξέλθουν χρωμιοκελλιούχοι χάλυβες (Nickel-Chrome alloys), που φτάνουν τα επίπεδα του $\theta \cong 5.0$. Ο αδιάστατος όρος θ μεταβάλλεται αντίστοιχα μεταξύ των τιμών $1 > \theta > 5$, ενώ ο όρος λ στην περίπτωση του αναγεννητικού κύκλου Braysson περιορίζεται εντός των ορίων $\theta/\theta > \lambda > 1$.

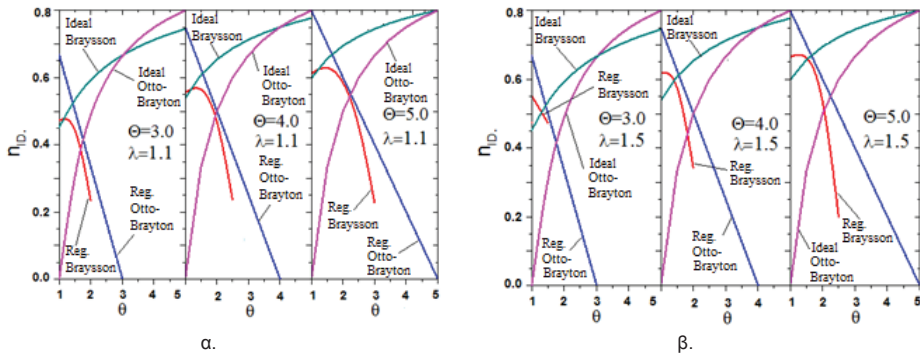


Εικόνα 4: Η θερμική απόδοση των ιδανικών κύκλων χωρίς αναγέννηση



Εικόνα 5: Η θερμική απόδοση του ιδανικού κύκλου Braysson σε σχέση με τον αδιάστατο όρο θερμοκρασίας θ και την αντίστοιχη απόδοση των Brayton - Otto

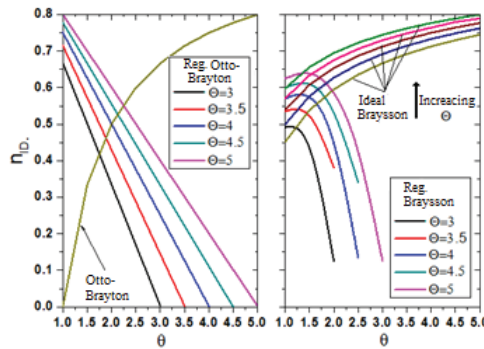
Στην Εικόνα 4 διαγράφεται η θερμική απόδοση των ιδανικών κύκλων χωρίς αναγέννηση συναρτήσει της παραμέτρου θ , για διάφορες τιμές του αδιάστατου όρου θερμοκρασίας θ . Αυτό που παρατηρείται είναι ότι η εξέλιξη της θερμικής απόδοσης των κύκλων Otto και Brayton κατά την μεταβολή του θ είναι ταυτόσημη, όπως εξάλλου μπορεί να παρατηρηθεί και από τις αντίστοιχες εξισώσεις (9) και (17). Επίσης είναι προφανές το γεγονός ότι η απόδοση των κύκλων Otto και Brayton είναι ανεξάρτητη του αδιάστατου όρου θ και μεταβάλλεται μόνο με μεταβολή του λόγου συμπίεσης για τον κύκλο Otto (Εξίσωση 2) ή του λόγου πιέσεων (Εξίσωση 3) για τον κύκλο Brayton (π.χ. μεταβολή του θ). Αντιθέτως, η απόδοση του ιδανικού κύκλου Braysson αυξάνεται τόσο με αύξηση του θ , όσο και με αύξηση του αδιάστατου όρου θερμοκρασίας θ . Η θερμική απόδοση του ιδανικού κύκλου Braysson σε σχέση με τον αδιάστατο όρο θερμοκρασίας θ καθώς μεταβάλλεται η παράμετρος θ απεικονίζεται στην Εικόνα 5, μαζί με την αντίστοιχη ιδανική απόδοση των κύκλων Brayton και Otto. Παρατηρείται ότι η απόδοση του Braysson είναι εν γένει υψηλότερη αυτής των απλών κύκλων Brayton και Otto για μικρούς λόγους αρχικής συμπίεσης, δηλαδή της παραμέτρου θ , και τείνει προς τα ίδια περίπου επίπεδα καθώς η τιμή του θ τείνει στην τιμή του θ . Οι Εικόνες 6 και 7 απεικονίζουν τις επιδράσεις των παραμέτρων θ και θ στην περίπτωση που στους απλούς ιδανικούς κύκλους εισάγεται η διεργασία της αναγεννητικής προθέρμανσης. Στις χαμηλές τιμές της παραμέτρου θ (δηλαδή όταν το θ τείνει στην μονάδα) παρατηρείται ότι η απόδοση των αναγεννητικών κύκλων αυξάνεται δραματικά. Επιπλέον, κατά την αύξηση της παραμέτρου θ η απόδοση των αναγεννητικών κύκλων επίσης αυξάνεται για σταθερή τιμή του θ . Διευκρινίζεται ότι και για τους αναγεννητικούς κύκλους η αποδόσεις των κύκλων Otto και Brayton είναι ταυτόσημες για σταθερή τιμή του θ . Αύξηση στην μεταβολή της τιμής της παραμέτρου αναγέννησης λ για τον κύκλο του Braysson έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της απόδοσης του για δεδομένες τιμές του θ και θ όπως φαίνεται στις Εικόνες 6α και 6β.



Εικόνα 6: Η θερμική απόδοση των ιδανικών κύκλων και οι αντίστοιχες αποδόσεις αναγεννητικών κύκλων, για διάφορες τιμές λ του αναγεννητικού Braysson

Όπως παρατηρείται στην Εικόνα 7α, η απόδοση των αναγεννητικών κύκλων Otto και Brayton είναι σημαντικά αυξημένη για τις χαμηλές τιμές του θ ενώ καθώς η παράμετρος αυτή πλησιάζει την τιμή του θ τότε η απόδοση μειώνεται σημαντικά. Γενικότερα παρατηρείται ότι οι κύκλοι με αναγεννητική προθέρμανση δίνουν μέγιστες θερμικές αποδόσεις οι οποίες πλησιάζουν την απόδοση του κύκλου Carnot για τον ίδιο λόγο θ και κατάλληλη επιλογή του θ και λ εάν πρόκειται για τον κύκλο Braysson. Όπως φαίνεται στις Εικόνες 8 και 9, σε όλο τους κύκλους, ιδανικός (Εικόνα 8) και αναγεννητικός (Εικόνα 9), η αδιάστατη παράμετρος του καθαρού έργου επηρεάζεται άμεσα από τον λόγο θ . Όσο πιο υψηλή η τιμή του θ , τόσο πιο μεγάλο το έργο εξόδου W_{net}^* . Εν γένει, ο κύκλος του Braysson δίνει την μεγαλύτερη τιμή σε καθαρό έργο, το οποίο είναι σχεδόν διπλάσιο από την

αντίστοιχη τιμή των κύκλων του Otto και Brayton. Προφανώς αυτό, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι πιθανή πραγματική εφαρμογή του κύκλου Braysson θα έχει και το μικρότερο μέγεθος (και ως εκ τούτου και μικρότερο κόστος) για συγκεκριμένη εισροή θερμότητας στον κύκλο.



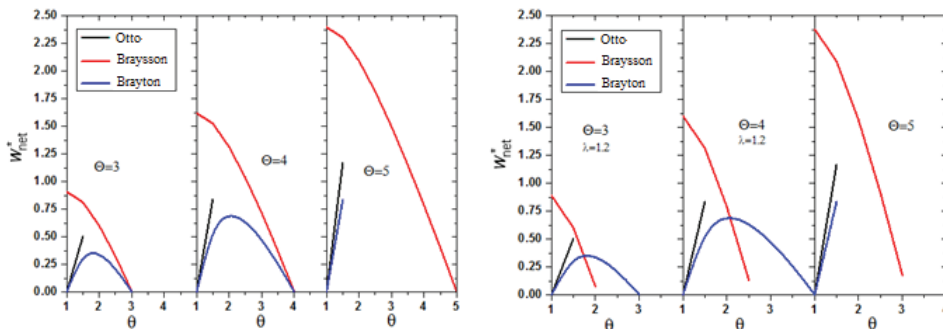
α. Otto - Brayton

β. Braysson, λ = 1.2

Εικόνα 7: Η θερμική απόδοση των αναγεννητικών κύκλων και οι αντίστοιχες απόδοσεις των ιδανικών κύκλων για διάφορες τιμές θ.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή συγκρίνεται η θερμική απόδοση και το αδιάστατο παραγόμενο καθαρό έργο από μια σειρά ιδανικών θερμοδυναμικών κύκλων που θα μπορούσαν να στηρίξουν την λειτουργία σταθμών ισχύος που εκμεταλλεύονται την ηλιακή ενέργεια. Από την ανάλυση αυτή προκύπτει ότι όλοι οι κύκλοι θα πρέπει να λειτουργούν με μικρή, σχετικά αρχική συμπίεση για την επίτευξη υψηλής θερμικής απόδοσης. Επιπλέον, με κατάλληλη επιλογή θερμοκρασιακών παραμέτρων, όλοι οι κύκλοι μπορούν να πλησιάσουν την απόδοση του κύκλου Carnot. Τέλος, ο κύκλος του Braysson δίνει την μεγαλύτερη τιμή για το καθαρό έργο ανά κύκλο, κάτι που συνήθως συνεπάγεται μικρότερο μέγεθος και κόστος για την εγκατάσταση ισχύος.



α.

β.

Εικόνα 8: Το καθαρό έργο εξόδου W_{net}^* συναρτήσει της αδιάστατης παραμέτρου θ : α. των ιδανικών κύκλων , β. των αναγεννητικών κύκλων

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Horlock JH. Advanced gas turbine cycles. Pergamon; 2003.
- [2] Durmayaz A, Sogut OS, Sahin B, Yamuz H. Optimization of thermal systems based on finite-time thermodynamics and thermoeconomics. *Prog Energy Combust Sci* 2004;30:175–217.
- [3] Cheng CY, Chen CK. Power optimization of an endoreversible regenerative Brayton cycle. *Energy* 1996;21:241–7.
- [4] Erbay L, Götken S, Yavuz H. Optimal design of the regenerative gas turbine engine with isothermal heat addition. *Appl Energy* 2001;6:249–64.
- [5] Wang W, Chen L, Sun F, Wu C. Performance analysis of an irreversible variable temperature heat reservoir closed intercooled regenerated Brayton cycle. *Energy Convers Manage* 2003;44:2713–32.
- [6] Sogut OS, Ust Y, Sahin B. The effects of intercooling and regeneration on the thermoeconomic performance analysis of an irreversible-closed Brayton heatengine with variable temperature thermal reservoirs. *J Phys D: Appl Phys* 2006;39:4713–21.
- [7] Sahin A. Optimum operating conditions of solar-driven heat engines. *Energy Convers Manage* 2000;41:1335–43.
- [8] Yilmaz T, Ust Y, Erdil A. Optimum operating conditions of irreversible solar driven heat engines. *Renew Energy* 2006;31:1333–42.
- [9] Badescu V. Optimization of Stirling and Ericsson cycles using solar radiation. *Space Power* 1992;11:99–106.
- [10] Zhang Y, Lin B, Chen J. Optimum performance characteristics of an irreversible solar-driven Brayton heat engine at the maximum overall efficiency. *Renewable Energy* 2007;32:856–67.
- [11] Sogut OS, Durmayaz A. Performance optimization of a solar-driven heat engine with finite-rate heat transfer. *Renew Energy* 2005;30:1329–44.
- [12] Frost T.H., Anderson A., Agnew B., A hybrid gas turbine cycle (Brayton/Ericsson): an alternative to conventional combined gas and steam turbine power plant, *Proc. Instn. Mech. Engrs.* 211 (A2) (1997) 121–131.
- [13] Zheng S, Chen J, Lin G. Performance of an irreversible solar driven Braysson heat engine at maximum efficiency, *Renewable Energy* 2005;30:601-10.
- [14] Lanmei Wu, Guoxing Lin, Investigation on the optimal performance and design parameters of an irreversible solar-driven Braysson heat engine, *International Journal of Sustainable Energy*, Vol. 28, pp. 157-170, 2009
- [15] Lanmei Wu, Guoxing Lin, Jincan Chen, Parametric optimization of a solar-driven Braysson heat engine with variable heat capacity of the working fluid and radiation–convection heat losses, *Renewable Energy*, Vol. 35, pp. 95-100, 2010.

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΩΝ ΗΛΙΟΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΚΑΙ ΨΥΞΗ ΤΩΝ ΧΩΡΩΝ ΚΑΘΩΣ ΚΑΙ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΖΕΣΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΧΡΗΣΗΣ ΣΤΑ ΚΤΙΡΙΑ

Ε. Κυριάκη*, Ε. Γιαμά, Α.Μ. Παπαδόπουλος

Εργαστήριο Κατασκευής Συσκευών Διεργασιών, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πολυτεχνική Σχολή Α.Π.Θ, Κτίριο Δ, 8ος όροφος, υπεύθυνος επικοινωνίας, ηλεκτρονική
διεύθυνση: kelli@auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας στα κτίρια αλλά και των επιπτώσεων που έχει η λειτουργία τους στο περιβάλλον, κυρίως των εκπομπών CO₂, αποτελούν βασικό στόχο των ενεργειακών πολιτικών στην Ευρώπη. Στο πλαίσιο αυτό αναπτύχθηκαν διάφορες τεχνολογίες εκμετάλλευσης Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (κυρίως ηλιακής ενέργειας) για την θέρμανση και την ψύξη των χώρων και την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης.

Ο στόχος της παρούσας εργασίας είναι να παρουσιαστούν τα χαρακτηριστικά των ηλιοθερμικών συστημάτων συνδυασμένης λειτουργίας για την θέρμανση και ψύξη των χώρων καθώς και την παραγωγή του ζεστού νερού χρήσης (Solar Combi και Solar Combi +) σε σχέση με τις υφιστάμενες τεχνολογίες και να αποτυπωθούν οι εφαρμογές αυτών σε Ελλάδα και Ευρώπη. Στο πλαίσιο αυτό, θα γίνει αρχικά, μια αναλυτική περιγραφή των συστημάτων και των επιμέρους στοιχείων τους καθώς και των διαφορετικών ειδών που συναντώνται στην αγορά. Στο πλαίσιο της μελέτης, θα εντοπιστούν και θα σχολιαστούν οι εφαρμογές που έχουν ήδη γίνει στην Ευρώπη και στην συνέχεια θα διερευνηθούν οι αντίστοιχες εφαρμογές ή δυνατότητες εφαρμογών στην Ελλάδα.

Ο βασικός σκοπός της εργασίας είναι να συγκριθεί η τεχνολογία των Solar Combi και Solar Combi+ συστημάτων με άλλες συμβατικές υφιστάμενες τεχνολογίες που εφαρμόζονται στα κτίρια. Η σύγκριση θα πραγματοποιηθεί με βάση την δομή και τα τεχνικά χαρακτηριστικά των συστημάτων, την εξοικονόμηση ενέργειας που επιτυγχάνεται με την εφαρμογή τους καθώς και την οικονομική και περιβαλλοντική τους απόδοση.

Λέξεις Κλειδιά: Ηλιακή Ενέργεια, Solar Combi Systems, Solar Combi+ Systems

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια η Ευρώπη, σε ένα γενικότερο παγκόσμιο πλαίσιο, αντιμετωπίζει προκλήσεις στο ενεργειακό και οικονομικό τομέα. Το ευμετάβλητο οικονομικό κλίμα αποτελεί έντονη πηγή διαταραχών και τροχοπέδη στην συνεχόμενη ανάπτυξη των Ευρωπαϊκών χωρών. Οι ολοένα αυξανόμενες απαιτήσεις σε ενέργεια, που παρατηρήθηκαν τα τελευταία χρόνια οδήγησαν στην σταδιακή εξάντληση των ορυκτών καυσίμων. Παράλληλα, η σημαντική αύξηση των αέριων ρύπων (CO₂ και NO_x) με σημαντικές επιπτώσεις στο κλίμα και στην ποιότητα του αερίου περιβάλλοντος (π.χ. φαινόμενο του θερμοκηπίου). Η ανάγκη για χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε συνδυασμό με την απαίτηση για υψηλότερη ποιότητα διαβίωσης και τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων αναδεικνύουν σε μείζονα σκοπό την ανάπτυξη και ενσωμάτωση τεχνολογιών που προωθούν την εφαρμογή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και υιοθετούν βέλτιστες πρακτικές ορθολογικής χρήσης ενέργειας [1], [2]. Στην προσπάθεια αυτή, η Ευρωπαϊκή ένωση παίζει κυρίαρχο ρόλο μέσα από μία σειρά δράσεων και πρωτοβουλιών (Target 20-20-20) προκειμένου να βασιστεί αλλά και να διασφαλιστεί η ανάπτυξη σε γερές οικονομικές, κοινωνικές και περιβαλλοντικές βάσεις. Πιο συγκεκριμένα, η Ευρώπη έχει θέσει ως στόχο, το 20% της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης να προέρχεται από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας [3].

Στην κατεύθυνση λοιπόν της προώθησης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχουν αναπτυχθεί ποικίλα συστήματα εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας κυρίως για την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης στα κτίρια καθώς και την θέρμανση των αντίστοιχων χώρων. Παράλληλα, έχουν αναπτυχθεί αντίστοιχα συστήματα για την κάλυψη των ψυκτικών φορτίων, τα οποία παρόλα αυτά δεν είναι ακόμη τόσο διαδεδομένα στην Ευρώπη.

2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΗΛΙΟΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Η ανάλυση και περιγραφή των συστημάτων αυτών θα γίνει με βάση το πεδίο εφαρμογής τους. Αρχικά, θα παρουσιαστούν τα ηλιοθερμικά συστήματα συνδυασμένης λειτουργίας που χρησιμοποιούνται για την θέρμανση των χώρων και την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης (Solar Combi Systems). Στην συνέχεια, θα περιγραφούν αντίστοιχα συστήματα συνδυασμένης λειτουργίας τα οποία εκτός από την θέρμανση και την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης καλύπτουν και τις απαιτήσεις ψύξης (Solar Combi+ Systems).

Στα συστήματα αυτά η απορρόφηση της ηλιακής ενέργειας γίνεται μέσω ηλιακών συλλεκτών που τοποθετούνται στην οροφή ή το δώμα του κτιρίου. Η ηλιακή ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα η οποία μεταφέρεται στο ρευστό που ρέει στους σωλήνες (συνήθως νερό), ενώ ένα ποσό χάνεται στο περιβάλλον. Μέσω ενός συστήματος σωληνώσεων, μια ποσότητα του ρευστού μεταφέρεται απευθείας στο σύστημα θέρμανσης ή ψύξης ενώ το υπόλοιπο διοχετεύεται στο δοχείο αποθήκευσης για μελλοντική χρήση.

Solar Combi

Σε αυτά τα συστήματα, η επιφάνεια των ηλιακών συλλεκτών που εγκαθίστανται είναι μεγαλύτερη από αυτήν που υπάρχει όταν οι ηλιακοί συλλέκτες χρησιμοποιούνται μόνο για την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης, καθώς πρέπει να καλυφθεί ένα μέρος των απαιτήσεων θέρμανσης. Συνήθως υπάρχει εκτός του ηλιακού συστήματος και μια βοηθητική πηγή θερμότητας (συνήθως πετρέλαιο, φυσικό αέριο ή ηλεκτρική ενέργεια) που χρησιμοποιείται είτε σε περίπτωση που δεν επαρκεί ο ήλιος, είτε επειδή δεν είναι οικονομικότερα σκόπιμο να καλυφθεί το 100% του φορτίου ηλιακά. Λόγω των διαφορετικών θερμοκρασιών που απαιτούνται για το ζεστό νερό χρήσης και το νερό που τροφοδοτεί το σύστημα θέρμανσης, υπάρχουν δύο διαφορετικών θερμοκρασιών δοχεία αποθήκευσης τα οποία τροφοδοτούν το αντίστοιχο σύστημα, μέσω συστήματος ελέγχου. Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα να τοποθετηθεί ένα δοχείο και για τις δύο λειτουργίες όπου όμως απαιτείται προσεκτικός σχεδιασμός ώστε να μην αναπτυχθούν φαινόμενα μίξης. Στην συνέχεια θα περιγραφούν συνοπτικά τα υποσυστήματα.

Όπως αναφέρθηκε σε πρότερο σημείο της ανάλυσης αυτής, η τεχνολογία Solar Combi έχει την δυνατότητα κάλυψης των θερμικών αναγκών αλλά και της παροχής ζεστού νερού χρήσης. Τα απαραίτητα υποσυστήματα για τις λειτουργίες αυτές είναι το σύστημα απορρόφησης και αποθήκευσης θερμότητας και το σύστημα διανομής της. Πιο αναλυτικά το σύστημα απορρόφησης και αποθήκευσης θερμότητας αποτελείται από:

- **Ηλιακός Συλλέκτης:** Στο στοιχείο αυτό γίνεται η εκμετάλλευση της ενέργειας προερχόμενης από τον ήλιο μέσω ειδικά σχεδιασμένων διατάξεων. Η ενέργεια συλλέγεται μέσω του απορροφητή ενώ η βασική αρχή λειτουργίας του είναι η μετάδοση της ενέργειας αυτής σε ρευστό μέσο (νερό ή μίγμα νερού-γλυκερίνης) μέσω δικτύου σωληνώσεων. Η γεωμετρία των συλλεκτών ποικίλει λαμβάνοντας πάντα υπόψη την αποδοτικότητα, το διαθέσιμο χώρο αλλά και τους σκοπούς της εκάστοτε εφαρμογής (π.χ. επίπεδοι ή παραβολικοί συλλέκτες). Θα πρέπει να σημειωθεί εδώ η διαστασιολόγηση του συλλέκτη γίνεται πάντα με βάση τις ανάγκες για θέρμανση και παροχής ζεστού νερού χρήσης.
- **Δοχείο αποθήκευσης θερμότητας:** Το χαρακτηριστικό αυτό επεκτείνει τις δυνατότητες μίας διάταξης Solar Combi για την συνεχόμενη αποδοτική της λειτουργίας σε περιόδους έλλειψης της πηγής ενέργειας (ηλιακή ακτινοβολία). Επιπροσθέτως, διασφαλίζει την βέλτιστη αποδοτική λειτουργία των βοηθητικών συστημάτων κατά την διάρκεια λειτουργίας με μεσαία φορτία, εξασφαλίζοντας την συνολική απρόσκοπτη αλλά και αποδοτική της διάταξης. Τέλος αποτελεί σημαντικό πεδίο έρευνα και εξέλιξης για την επίτευξη συνεχούς ενεργειακής αυτονομίας (High Combi Systems) [4].

Από την φάση του σχεδιασμού και κατασκευής του συστήματος συλλογής και αποθήκευσης θερμότητας έπεται η διανομή αυτής για την κατάλληλη αξιοποίηση της. Αυτό επιτυγχάνεται από το σύστημα διανομής θερμότητας το οποίο και περιγράφεται σύμφωνα με το χρησιμοποιούμενο μέσο ως εξής.

- **Συστήματα διανομής με αέρα:** Όπως γίνεται κατανοητό το χρησιμοποιούμενο μέσο είναι ο αέρας για σκοπούς θέρμανσης, εξαερισμού ή αφύγρανσης. Το σύστημα αυτό επιλέγεται ιδιαίτερα για την κάλυψη αναγκών επαγγελματικών χώρων. Κύρια κατασκευαστικά του στοιχεία είναι ένα δίκτυο σωληνώσεων προσαγωγής του αέρα και ένα απαγωγής αυτού, το οποίο μπορεί να ενσωματώνει και ένα υποσύστημα ανάκτησης θερμότητας που σε διαφορετική περίπτωση θα αποβάλλονταν στο περιβάλλον αυξάνοντας έτσι τις απώλειες.
- **Σύστημα διανομής με νερό:** Αντίστοιχα σε αυτή την περίπτωση το χρησιμοποιούμενο μέσο είναι το νερό το οποίο μεταφέρει την παραγόμενη θερμότητα μέσω ενός κλειστού-κυκλώματος σωληνώσεων. Χρησιμοποιείται για σκοπούς θέρμανσης αλλά δεν μπορεί να καλύψει ανάγκες εξαερισμού ή αφύγρανσης χωρίς την προσθήκη κατάλληλου μηχανικού συστήματος.

Solar Combi +

Οι διατάξεις αυτές αποτελούν εξέλιξη των Solar Combi καθώς ενσωματώνουν ένα σύστημα ψύξης ικανό να ανταποκριθεί στα απαιτούμενα ψυκτικά φορτία του χώρου. Αποτελούν ένα πεδίο ζωηρής μελέτης τα τελευταία χρόνια με 600 περίπου πιλοτικές εφαρμογές το 87% των οποίων έχουν γίνει στην Ευρώπη. Καθώς αποτελούν εξέλιξη των Solar Combi η λογική λειτουργίας τους και η δομή τους μοιάζει με αυτά. Πρόσθετο στοιχείο εδώ είναι ένα υποσύστημα ψύξης. Επίσης, κάποιες κατασκευαστικές αλλαγές μπορεί να προκύψουν από την διαδικασία ενσωμάτωσης του συστήματος αυτού με τα κλασικά συστήματα παραγωγής-αποθήκευσης και διανομής θερμότητας. Για χάρη συνοπτικότητας εδώ θα περιγραφεί μόνο το σύστημα ψύξης καθώς η βασική δομή και λειτουργία των υπολοίπων παραμένει η ίδια.

Σύστημα Ψύξης-Βασική Αρχή Λειτουργίας: Όπως είναι γνωστό για τις διαδικασίες ψύξης απαιτείται αντιστροφή της φυσικής ροής θερμότητας. Αυτό γίνεται με την βοήθεια ενός ψύκτη. Η ενέργεια που απαιτείται για την λειτουργία του προέρχεται από ένα ρευστό υψηλής

θερμοκρασίας (στην περίπτωση των Combi από τον ηλιακό συλλέκτη ή το δοχείο αποθήκευσης) και ονομάζεται κινητήρια θερμότητα. Μέσω του ψύκτη, απάγεται θερμότητα από τον κλιματιζόμενο χώρο, η οποία στην συνέχεια απορρίπτεται συνήθως στο εξωτερικό περιβάλλον.

Όπως και στο σύστημα παραγωγής θερμότητας, συνήθως υπάρχει μια βοηθητική πηγή ενέργειας (συνήθως ηλεκτρική ενέργεια) για να καλύψει τις ανάγκες όταν δεν επαρκεί η ηλιακή ενέργεια.

3. ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ

Το ευρωπαϊκό πρότυπο BREEAM είναι το παλαιότερο σύστημα που διαμορφώθηκε για τον προσδιορισμό της περιβαλλοντικής επίδοσης των κτιρίων. Στο μητρώο του είναι καταγεγραμμένα περισσότερα από 200.000 πιστοποιημένα κτίρια [5], [6]. Στη δομή του στηρίχθηκαν όλα τα μεταγενέστερα συστήματα αξιολόγησης ενώ η αναγνωρισιμότητα του είναι παγκόσμια. Επιπλέον, προσαρμόζει τις προδιαγραφές εφαρμογής των κριτηρίων ανάλογα με τη ισχύουσα νομοθεσία του κράτους στο οποίο ανήκει το υπό μελέτη κτίριο και έχει ενσωματώσει στη δομή του τις αρχές προτύπων ISO όπως το ISO 14001 (Συστήματα Περιβαλλοντικής Διαχείρισης), το ISO 14040-14043 (Ανάλυση Κύκλου Ζωής) ενώ βρίσκεται σε συμβατότητα με τη σειρά των νέων προτύπων ISO (21931-1:2010) για τη «βιωσιμότητα στην κατασκευή κτιρίων» καθώς και με τα ευρωπαϊκά υπό κατασκευή πρότυπα CEN / TC 350. Αντίστοιχα, το πρότυπο Leadership in Energy and Environmental Design [7] από τις Η.Π.Α. είναι και αυτό από τα πιο ώριμα συστήματα που διαμορφώθηκαν για τον προσδιορισμό της περιβαλλοντικής επίδοσης των κτιρίων και η δομή του στηρίχθηκε στο Βρετανικό BREEAM. Η αναγνωρισιμότητα του είναι παγκόσμια και ένα από τα βασικά του πλεονεκτήματα σε σχέση και με τα υπόλοιπα συστήματα αξιολόγησης είναι οι εύχρηστες διαδικτυακές φόρμες επικοινωνίας που διευκολύνουν την εφαρμογή του σε χώρες εκτός Αμερικής.

Τα Συστήματα Περιβαλλοντικής Διαχείρισης Κτιρίων στόχο έχουν τη βιωσιμότητα με παράλληλα οικονομικά και κοινωνικά οφέλη. Αποτελούν ολοκληρωμένα συστήματα αξιολόγησης, τα οποία στηρίζονται σε άλλες μεθοδολογίες και διαχειριστικά εργαλεία ενώ παράλληλα εναρμονίζονται με την ισχύουσα περιβαλλοντική νομοθεσία. Η δομή τους στηρίζεται στη συλλογή μονάδων και έχουν σχεδιαστεί για να αξιολογούν την περιβαλλοντική επίδοση νέων και υφιστάμενων κτιρίων με βάση συγκεκριμένο πρότυπο αξιολόγησης. Ο βιώσιμος σχεδιασμός στοχεύει στην αξιολόγηση των περιβαλλοντικών πτυχών στον κύκλο ζωής των κτιρίων. Η ουσιαστική διαφοροποίηση των συστημάτων έγκειται στους βαθμούς που δίνει το εκάστοτε σύστημα αξιολόγησης ανά κριτήριο και περιβαλλοντική πτυχή. Ο βασικός όμως στόχος της αξιολόγησης της περιβαλλοντικής επίδοσης και της ολιστικής προσέγγισης του περίπλοκου ζητήματος της περιβαλλοντικής αξιολόγησης των κτιρίων παραμένει κοινός για όλα τα συστήματα [8].

Τόσο στο σύστημα αξιολόγησης BREEAM όσο και στο LEED περιλαμβάνεται η περιβαλλοντική πτυχή που σχετίζεται με τη ορθολογική χρήση ενέργειας και προωθούνται βέλτιστες πρακτικές εξοικονόμησης ενέργειας, η χρήση Ανανεώσιμων Πηγών, αυτοματισμών και ενεργειακών συστημάτων χαμηλών εκπομπών CO₂. Πιο συγκεκριμένα στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα βασικά κριτήρια αξιολόγησης για νέες κατασκευές κτιρίων.

Είναι λοιπόν φανερό ότι εξελιγμένα ενεργειακά συστήματα όπως τα COMBI μπορούν να οδηγήσουν ένα κτίριο σε υψηλότερη περιβαλλοντική επίδοση καθώς μοριοδοτούν το υπό αξιολόγηση κτίριο στα παρακάτω κριτήρια:

- μείωση εκπομπών CO₂ / υιοθέτηση τεχνολογιών χαμηλών ή μηδενικών εκπομπών
- υιοθέτηση αποδοτικών ενεργειακών συστημάτων
- εφαρμογή ενεργειακά αποδοτικών ψυκτικών συστημάτων

Τα συστήματα Combi, που καλύπτουν τις απαιτήσεις θέρμανσης των χώρων καθώς και την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης, ευνοούν τα υπό αξιολόγηση κτίρια στη βαθμολόγηση

σύμφωνα με τα κριτήρια που σχετίζονται με τη μείωση εκπομπών CO₂ και την υιοθέτηση αποδοτικών ενεργειακών συστημάτων. Επιπρόσθετα, τα εξελιγμένα συστήματα Combi+, που καλύπτουν και τις απαιτήσεις ψύξης του κτιρίου, δίνουν στο υπό αξιολόγηση κτίριο υψηλότερη περιβαλλοντική επίδοση καθώς προωθούν την εφαρμογή πιο αποδοτικών συστημάτων και στη λειτουργία της ψύξης.

Πίνακας 1: Περιβαλλοντικές πτυχές, κριτήρια αξιολόγησης και διαθέσιμη βαθμολογία για νέες κατασκευές κτιρίων κατά BREEAM		
Κριτήρια ανά περιβαλλοντική πτυχή	Διαθέσιμη βαθμολογία	Παρατηρήσεις
Χρήση ενέργειας	31	
Μείωση εκπομπών CO ₂ / υιοθέτηση τεχνολογιών χαμηλών ή μηδενικών εκπομπών	15	Οι υπολογισμοί αφορούν όλες τις καταναλώσεις ενέργειας, έλεγχο και περιγραφή όλων των ενεργειακών συστημάτων, χρήση ΑΠΕ. Οι υπολογισμοί γίνονται από λογισμικό του φορέα ή στην περίπτωση που γίνουν με άλλο θα πρέπει από πριν να έχει γίνει ενημέρωση με το φορέα ώστε να εξασφαλιστεί η αντιστοιχία των αποτελεσμάτων. Η κατάταξη του κτιρίου γίνεται με βάση το δείκτη Energy Performance Ratio for New Constructions (EPR _{NC}).
Παρακολούθηση καταναλώσεων ενέργειας	1	Καταγραφές, μετρήσεις όλων των υποσυστημάτων ενέργειας και τήρηση σχετικού αρχείου.
Αποδοτικός εξωτερικός και εσωτερικός φωτισμός	2	Ανάλογα με τη χρήση του χώρου αν είναι parking, μονοπάτι, κάποιο μνημείο, είσοδοι θα γίνει ανάλογος σχεδιασμός. Χρησιμοποιούνται λαμπτήρες εξοικονόμησης ενέργειας και συστήματα αυτόματου ελέγχου των συστημάτων φωτισμού.
Αποδοτικά ενεργειακά συστήματα	2	Στο χώρο των κτιρίων επιλέγονται ενεργειακά αποδοτικά συστήματα που αποδεδειγμένα οδηγούν σε εξοικονόμηση ενέργειας και μειωμένες εκπομπές CO ₂ .
Ενεργειακά αποδοτικός εξοπλισμός	2	Ο στόχος είναι ο εξοπλισμός των κτιρίων να εξοικονομεί ενέργεια και να οδηγεί σε μειωμένες εκπομπές CO ₂ .
Τεχνολογίες χαμηλής ή και μηδενικής παραγωγής CO ₂	5	Υιοθέτηση τεχνολογιών ενεργειακής εξοικονόμησης συνοδευόμενες από μελέτη οικονομικής σκοπιμότητας. Οι βαθμοί δίνονται ανάλογα με τη μείωση των εκπομπών CO ₂ .
Ενεργειακά αποδοτικά ψυκτικά συστήματα	2	Ψυκτικά συστήματα νέας τεχνολογίας που θα είναι ενεργειακά αποδοτικά και που αποδεδειγμένα, βάσει του προτύπου BSEN 378-1, μειώνουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου.
Ενεργειακά αποδοτικά συστήματα μεταφοράς	2	Αφορά προδιαγραφές για κυλιόμενες σκάλες και ασανσέρ.

4. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Στη συνέχεια παρουσιάζονται ορισμένες ευρωπαϊκές εφαρμογές των οποίων βασικός στόχος είναι η προώθηση και η διείσδυση στις αγορές αποδοτικών ενεργειακών συστημάτων θέρμανσης και ψύξης [9].

- 1) *Αυξάνοντας την διείσδυση στις αγορές των ηλιακών συστημάτων κλιματισμού για μικρές και μεσαίες εφαρμογές σε δημόσια κτίρια και κτίρια κατοικιών (SOLAIR) [10].*

Διάρκεια: 1/2007-12/2009

Κύριος Στόχος: Προώθηση της σχετικά καινούριας τεχνολογίας μέσω της εξοικείωσης με αυτά.

Συμπεράσματα: α) Μικρή διείσδυση στις αγορές λόγω του αυξημένου κόστους σε σχέση με τις συμβατικές εφαρμογές, β) Η έλλειψη εφαρμογών μειώνει την αξιοπιστία της τεχνολογίας, γ) Συγγραφή οδηγού με τεχνικές πληροφορίες.

- 2) *Προσδιορισμός των πιο κερδοφόρων αγορών για την εισαγωγή και προώθηση μικρής κλίμακας ηλιοθερμικών συστημάτων συνδυασμένης λειτουργίας για την θέρμανση και την ψύξη των χώρων (SOLAR COMBI+) [11].*

Διάρκεια: 9/2007-2/2010

Κύριος Στόχος: Η προετοιμασία και προώθηση της εισαγωγής στην αγορά τέτοιων συστημάτων με σκοπό την επίτευξη των περιβαλλοντικών στόχων της Ευρωπαϊκής Ένωσης, για κτίρια χαμηλών ενεργειακών απαιτήσεων (φορτία μέχρι 20kW).

Συμπεράσματα: α) Ο προσδιορισμός των επιμέρους συστημάτων αποτελεί περίπλοκη διαδικασία λόγω των διαφορετικών και πολλές φορές αντιφατικών εθνικών κανονισμών, β) Υψηλό κόστος για μικρές εφαρμογές, γ) Βελτίωση της τεχνογνωσίας και γνωριμία της τεχνολογίας με το κοινό.

- 3) *Ηλιακό Σύστημα Θέρμανσης και Ψύξης των χώρων μέσω καινοτόμου σχεδιασμού και μεθόδων (HIGH COMBI) [12].*

Διάρκεια: 6/2007-12/2011

Κύριος Στόχος: Ο συνδυασμός ηλιακών συστημάτων θέρμανσης και ψύξης με καινοτόμο σύστημα αποθήκευσης μέσω του οποίου επιτυγχάνεται η πλήρης κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων του κτιρίου. Επίσης, η κατασκευή ενός πειραματικού συστήματος μέσω συνδυασμένων τεχνολογιών και μεθόδων ελέγχου. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν σε τέσσερις χώρες: Ελλάδα, Ισπανία, Ιταλία και Αυστρία.

Συμπεράσματα: α) Επιτυχής ανάπτυξη και κατασκευή ενός ηλιοθερμικού συστήματος συνδυασμένης λειτουργίας για θέρμανση και ψύξη με καινοτόμο σύστημα αποθήκευσης θερμότητας, ώστε να καλύπτονται οι ενεργειακές ανάγκες όλο τον χρόνο, β) η αξιοπιστία ελέγχθηκε και για τις τέσσερις κλιματικές συνθήκες, παρόλα αυτά περαιτέρω πιστοποίηση του συστήματος κρίνεται αναγκαία, γ) η ανάπτυξη της τεχνολογίας συνοδεύτηκε από στρατηγικές διάδοσης και προώθησης της, ώστε να γίνει κατανοητή στο ευρύ κοινό.

- 4) *Ανάπτυξη τρίτης γενιάς συστημάτων συνδυασμένης λειτουργίας για θέρμανση και ψύξη, αξιοποιώντας την εξαγόμενη θερμότητα από τον πύργο προσρόφησης (COOL SUN) [13].*

Διάρκεια: 1/2011- Σήμερα

Κύριος Στόχος: Σχεδιασμός, Ανάπτυξη, Κατασκευή και Πιστοποίηση ενός τέτοιου συστήματος με στόχο την πλήρη ενεργειακή αυτονομία του κτιρίου στα Μεσογειακά κλίματα και 50% αυτονομία στην Κεντρική Ευρώπη. Η εφαρμογή θα γίνει σε χώρους γραφείων και επαγγελματικούς χώρους.

Επιμέρους Στόχοι:

Ανάπτυξη υπολογιστικών μεθόδων μέσω υπολογιστή για την δυναμική προσομοίωση του συστήματος και των συστημάτων ελέγχου

Ανάπτυξη ενός πρωτότυπου συστήματος που αποτελείται από: ηλιακό συλλέκτη, σύστημα αποθήκευσης θερμότητας, πύργος προσροφητή 11kW και σύστημα αυτόματου ελέγχου.

5. ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ

Στον πίνακα 2 παρουσιάζεται μια ποιοτική συγκριτική αξιολόγηση τριών ηλιακών συστημάτων και δύο συμβατικών καυσίμων που χρησιμοποιούνται ευρέως στην Ελλάδα. Η κλίμακα κυμαίνεται από το 1 μέχρι το 4, όπου το 4 δηλώνει έντονη προτίμηση.

Πίνακας 2: Ποιοτική Συγκριτική Αξιολόγηση Διαφόρων Συστημάτων					
ΣΥΣΤΗΜΑ/ΚΑΥΣΙΜΟ	ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ		ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ		ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ
	Θερμό Κλίμα	Ψυχρό Κλίμα	Θερμό Κλίμα	Ψυχρό Κλίμα	
Ηλιακός Συλλέκτης	4	3	3	2	3
Σύστημα Combi	2	3.5	3	4	3.5
Σύστημα Combi+	3	3	3	1	4
Ηλεκτρική Ενέργεια	1	1	2	2	1
Φυσικό Αέριο	1	1	1	1	2

Η ηλεκτρική ενέργεια και το φυσικό αέριο παρατίθεται στον πίνακα για λόγους αναφοράς, μιας και αποτελούν τις πλέον διαδεδομένες πηγές ενέργειας στην Ελλάδα για τη θέρμανση, ψύξη καθώς και την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης. Αποτελούν συμβατικά καύσιμα, οπότε η έννοια της εξοικονόμησης ενέργειας δεν υφίσταται, ενώ από οικονομικής πλευράς έχουν χαμηλό κόστος εγκατάστασης αλλά μικρές έως μηδαμινές δυνατότητες απόσβεσης του κεφαλαίου.

Τα συστήματα Combi και Combi+ έχουν παρόμοια αποτελέσματα στην αξιολόγηση. Όσον αφορά τα θερμά κλίματα, όπου οι απαιτήσεις θέρμανσης είναι μικρές, τα συστήματα Combi+ προσφέρουν μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας λόγω της δυνατότητας ψύξης των χώρων. Παρόλα αυτά, λόγω του μεγάλου κόστους εγκατάστασης, ο χρόνος απόσβεσης της κατασκευής είναι μεγάλος. Στα ψυχρά κλίματα, όπου οι απαιτήσεις για ψύξη είναι ελάχιστες έως αμελητέες, τα συστήματα Combi+ δεν αποτελούν οικονομικά σκόπιμη λύση.

Τέλος, οι ηλιακοί συλλέκτες αποτελούν την πλέον διαδεδομένη και φιλική προς το περιβάλλον εγκατάσταση στην Ελλάδα. Σε σύγκριση με τα συστήματα Combi, σε ψυχρά κλίματα, παρατηρείται ότι τα συστήματα Combi αποτελούν πιο αποδοτική λύση καθώς με μικρή αύξηση στην εγκατεστημένη επιφάνεια των ηλιακών συλλεκτών επιτυγχάνεται και η θέρμανση και η παραγωγή του ζεστού νερού χρήσης και συνεπώς μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας. Η περιβαλλοντική αξιολόγηση έγινε στη βάση της σημαντικότερης εξοικονόμησης ενέργειας που επιτυγχάνεται με τη χρήση των υπό αξιολόγηση ενεργειακών συστημάτων καθώς και στην υψηλότερη περιβαλλοντική επίδοση που λαμβάνει ένα υπό πιστοποίηση κτίριο με εφαρμογή των Συστημάτων τύπου BREEAM και LEED.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα ηλιοθερμικά συστήματα συνδυασμένης λειτουργίας για την θέρμανση και την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης (Solar Combi Systems), καθώς και τα πιο εξελιγμένα ηλιοθερμικά συστήματα συνδυασμένης λειτουργίας που καλύπτουν, εκτός από την θέρμανση και την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης αλλά και τις απαιτήσεις σε ψύξη, αποτελούν μια ιδιαίτερα ελκυστική λύση για την εξοικονόμηση ενέργειας και τη μείωση των εκπομπών CO₂. Συνδυάζοντας τα συστήματα αυτά με συστήματα ελέγχου και αυτοματισμών υπάρχει η δυνατότητα να επιτευχθεί πλήρης ενεργειακή αυτονομία στο κτίριο. Παράλληλα, τα Solar Combi καθώς και τα Solar Combi+ προσφέρουν ιδιαίτερα υψηλή περιβαλλοντική επίδοση στο κτίριο, σύμφωνα με τα με τα κριτήρια που θέτουν δημοφιλή συστήματα αξιολόγησης τύπου LEED και BREEAM. Ωστόσο, η εφαρμογή τους δεν είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη στην Ευρώπη και ιδιαίτερα στην Ελλάδα, λόγω του υψηλού κόστους εγκατάστασης. Προκύπτουν λοιπόν, μεγάλοι χρόνοι απόσβεσης (ιδιαίτερα για τα Solar Combi+), καθιστώντας την εφαρμογή τους μια οικονομικά μη σκόπιμη επένδυση, ειδικά όσον αφορά τον τομέα των κτιρίων κατοικίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] http://ec.europa.eu/energy/energy2020/index_en.htm, Τελευταία Ανάκτηση: 18/9/2014
- [2] Habid, S., Othman, M., Sopian, K., Zaidi, S., 2014, "An overview of photovoltaic thermal combination (PV/T combi) technology", Renewable and Sustainable Energy Reviews 38, pp. 212-222
- [3] <http://ec.europa.eu/europe2020/targets/eu-targets/>, Τελευταία Ανάκτηση: 18/9/2014
- [4] Karytsas, C., 2012, "High Solar Fraction heating and cooling systems with combination of innovative components and methods", Publishable Final Activity Report
- [5] Building Research Establishment, (BRE) (2009b). BRE Environmental Assessment Method (BREEAM), United Kingdom, www.breeam.org
- [6] Building Research Establishment, (BRE) (2011). New Construction. Non – Domestic Buildings Technical Manual SD5073-2.0:2011, United Kingdom. www.breeam.org
- [7] LEED, 2005. LEED-NC Green Building Rating System – new construction and major renovations, Version 2.2, USA
- [8] Giama, E., Papadopoulos, A.M., 2012, "Sustainable Building Management: An overview of Certification Schemes and Standards", Advances in Building Energy Research, DOI: 10.1080/17512549.2012.740905
- [9] EACI, 2009, "Renewable Energy in Buildings, Make your Building smile"
- [10] <http://www.solair-project.eu/>, Ημερομηνία Ανάκτησης: 18/9/2014
- [11] <http://www.solarcombiplus.eu/>, Ημερομηνία Ανάκτησης: 18/9/2014
- [12] Drosou, V., Tsekouras, P., Oikonomou, Th., Kosmopoulos, P., Karytsas, C., 2014, "The HIGH-COMBI project: High solar fraction heating and cooling systems with combination of innovative components and methods", Renewable and Sustainable Energy Reviews 29, pp. 463-472
- [13] http://cordis.europa.eu/result/rcn/141764_en.html, Τελευταία Ανάκτηση: 18/9/2014

ΞΗΡΑΝΣΗ ΘΕΡΜΟΕΥΑΙΣΘΗΤΩΝ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΜΕ ΣΤΕΡΕΑ ΑΦΥΓΡΑΝΤΙΚΑ ΜΕΣΑ. ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Θ. Διαμαντόπουλος¹, Γ. Πανάρας^{2*}, Β. Μπελεσιώτης³, Γ. Κάραλης¹

¹ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Ρευστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

² Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας

50100 Κοζάνη, e-mail: petpan@ipta.demokritos.gr

³ Εργαστήριο Ηλιακών & άλλων Ενεργειακών Συστημάτων, ΕΚΕΦΕ ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι συμβατικές μέθοδοι ξήρανσης δεν ανταποκρίνονται για μια σειρά γεωργικών προϊόντων τα οποία εμφανίζουν μεγάλη ευαισθησία ως προς τις συνθήκες ξήρανσής τους. Αρωματικά και φαρμακευτικά φυτά, σπόροι, δημητριακά κτλ. αποτελούν ένα μεγάλο κομμάτι της παγκόσμιας γεωργικής παραγωγής το οποίο χρήζει ιδιαίτερη μεταχείριση κατά την ξήρανσή του.

Αν και στη σχετική βιβλιογραφία έχει διερευνηθεί με θετικά αποτελέσματα η χρήση των αφυγραντικών μέσων σε εφαρμογές όπως ο κλιματισμός, η χρήση τους στην ξήρανση και ειδικότερα στην ξήρανση θερμοευαίσθητων γεωργικών προϊόντων αποτελεί ένα αντικείμενο τεχνολογικής εφαρμογής το οποίο βρίσκεται σε πρωτόλειο στάδιο έρευνας και ανάπτυξης.

Η χρήση αφυγραντικών μέσων έγκειται στην αφαίρεση υγρασίας από το προσαγόμενο ρεύμα θερμού αέρα, αυξάνοντας, σύμφωνα με το δεύτερο νόμο του Fick, το δυναμικό μεταφοράς υγρασίας από το προς ξήρανση προϊόν προς το ρεύμα του αέρα. Κατά αυτό τον τρόπο είναι δυνατή η ξήρανση σε χαμηλότερες θερμοκρασίες (ή και παροχές), συντείνοντας παράλληλα, λόγω της μείωσης του χρόνου ξήρανσης ανά κύκλο λειτουργίας, στην αύξηση της παραγωγικότητας αλλά και στη δυνατότητα αντικατάστασης της συμβατικής θερμικής πηγής από ηλιακούς συλλέκτες.

Στην εργασία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από το σχεδιασμό ενός ξηραντηρίου με τροχό αφύγρανσης υλικού πυριτικής γέλης (silica gel), καθώς και η διερεύνηση της λειτουργίας του στη βάση κατάλληλου μοντέλου που αναπτύχθηκε. Εξετάζεται η ξήρανση ενός θερμοευαίσθητου γεωργικού προϊόντος, του σπόρου της ελαιοκράμβης. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τα αντίστοιχα από τη λειτουργία συμβατικού ξηραντηρίου.

Το θερμοκρασιακό επίπεδο αναγέννησης του silica gel, επιτρέπει την αξιοποίηση θερμικής ηλιακής ενέργειας για τη διεργασία της ξήρανσης. Στο πλαίσιο αυτό, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τη σύνδεση του ξηραντηρίου με συλλέκτη αέρα, ο οποίος έχει αξιολογηθεί πειραματικά για τη δυνατότητα του να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις της διεργασίας.

Λέξεις κλειδιά: ξήρανση, θερμοευαίσθητα γεωργικά προϊόντα, αφυγραντικά μέσα, ηλιακή ενέργεια, συλλέκτης αέρα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μια μεγάλη κατηγορία γεωργικών προϊόντων όπως τα αρωματικά και φαρμακευτικά φυτά, οι σπόροι κ.α. εμφανίζουν περιορισμούς στην ξήρασή τους σε σχέση με τα συνήθη προς ξήρανση γεωργικά προϊόντα. Οι συμβατικές μέθοδοι υποβαθμίζουν το τελικό προϊόν καθώς η μεταφορά της υγρασίας από το νωπό προϊόν προς το ξηραντικό μέσο, βασίζεται στην εφαρμογή υψηλών θερμοκρασιών και υψηλών ταχυτήτων του αέρα ξήρανσης. Επομένως για την συγκεκριμένη κατηγορία γεωργικών προϊόντων, οι συνήθεις συνθήκες και μέθοδοι ξήρανσης κρίνονται ακατάλληλες. Εντούτοις η έρευνα γύρω από την ξήρανση των προϊόντων αυτών επικεντρώνεται στην επίτευξη όσο το δυνατόν καλύτερων ποιοτικών χαρακτηριστικών υπό τις συνήθεις μεθόδους ξήρανσης και όχι τόσο στην ανάπτυξη νέων μεθόδων με στόχο την βελτίωση της ποιότητας του τελικού αποξηραμένου προϊόντος [1-4].

Οι συνθέστερες μέθοδοι ξήρανσης θερμομειωμένων γεωργικών προϊόντων που συναντώνται στον Ελλαδικό χώρο είναι η ξήρανση με άμεση έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία και η ξήρανση σε σκιερό μέρος στο πλαίσιο μικρών και μεσαίων παραγωγών. Για μεγαλύτερες μονάδες παραγωγής, χρησιμοποιούνται διατάξεις ξηραντηρίων συμβατικού τύπου, δηλαδή θαλάμων ξήρανσης όπου τοποθετείται το νωπό προϊόν, και η ξήρανση πραγματοποιείται μέσω εξαναγκασμένης ροής θερμού αέρα. Αν εξαιρέσει κάποιος τα μειονεκτήματα της ξήρανσης σε άμεση έκθεση στον ήλιο ή σε σκιερό μέρος (έντομα, καιρικές συνθήκες, κλπ.) [5], η ξήρανση σε θαλάμους, παρά τις ελεγχόμενες συνθήκες ξήρανσης, παρουσιάζει τα μειονεκτήματα της έκθεσης του προϊόντος σε υψηλές θερμοκρασίες και ταχύτητες αέρα, έτσι ώστε να είναι αποτελεσματική η μετάδοση θερμότητας και κατ' επέκταση η ξήρασή τους. Εν τούτοις σε περίπτωση μείωσης της θερμοκρασίας ξήρανσης και της ταχύτητας της ροής, συνεπάγεται χαμηλός ρυθμός ξήρανσης με πιθανά επιβλαβή αποτελέσματα λόγω της δράσης ενζύμων, μυκήτων και βακτηρίων κατά την διάρκεια της διεργασίας [6].

Μία πρόσφατη τεχνολογική εφαρμογή στον τομέα της ξήρανσης αποτελεί η χρήση των αφυγραντικών μέσων. Αν και οι σχετικές μελέτες είναι αρκετά περιορισμένες, επιβεβαιώνουν ότι πρόκειται για μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογική εφαρμογή, στην κατεύθυνση παραγωγής τελικού προϊόντος ανώτερης ποιότητας. Ειδικότερα, λόγω της υφιστάμενης υψηλής διαφοράς δυναμικού υγρασίας μεταξύ του νωπού προϊόντος και του αφυγραμένου αέρα ξήρανσης, είναι δυνατή η μείωση της χορηγούμενης θερμότητας, χωρίς να ισοδυναμεί με ταυτόχρονη αύξηση της διάρκειας της διεργασίας [7]. Ενδεικτικά, έχει παρατηρηθεί ότι η χρήση των αφυγραντικών μέσων συντελεί στη διατήρηση του χρώματος του προϊόντος άρα και στη βελτίωση της ποιότητάς του [8].

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται, με τη βοήθεια κατάλληλα ανεπτυγμένου μοντέλου, η ξήρανση του σπόρου της ελαιοκράμβης σε ξηραντήριο με συσκευή αφύγρανσης, το οποίο σχεδιάστηκε ειδικά για τις ανάγκες της εργασίας. Το μοντέλο προσεγγίζει τις επιμέρους διεργασίες, στη βάση αναλυτικών σχέσεων από τη βιβλιογραφία. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με αυτά συμβατικού ξηραντηρίου, ίδιας δυναμικότητας. Το θερμοκρασιακό επίπεδο αναγέννησης του επιλεγόμενου υλικού αφύγρανσης (silica gel), επιτρέπει την αξιοποίηση θερμικής ηλιακής ενέργειας για τη διεργασία της ξήρανσης. Στο πλαίσιο αυτό, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τη σύνδεση του ξηραντηρίου με συλλέκτη αέρα, ο οποίος έχει αξιολογηθεί πειραματικά για τη δυνατότητα του να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις της διεργασίας.

2. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΞΗΡΑΝΣΗ ΤΗΣ ΕΛΑΙΟΚΡΑΜΒΗΣ

2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στη βιβλιογραφία δεν συναντώνται πρακτικές για τον σχεδιασμό ξηραντηρίων. Η έρευνα επικεντρώνεται γύρω από την διερεύνηση των λειτουργικών χαρακτηριστικών πιλοτικών ως επί των πλείστων ξηραντηρίων με στόχο τον προσδιορισμό των βέλτιστων συνθηκών ξήρανσης. Εν ολίγοις μπορεί να διατυπωθεί ότι ο σχεδιασμός ενός ξηραντηρίου δεν εμπίπτει σε γενικούς κανόνες, έχει όμως ως κύριες παραμέτρους την επιθυμητή δυναμικότητα και τον συνολικό χρόνο ξήρανσης, οι οποίες καθορίζουν την παραγωγή του τελικού προϊόντος ανά κύκλο λειτουργίας και επομένως την οικονομικότητα της διεργασίας.

Το ξηραντήριο της παρούσας εργασίας είναι παράλληλης ροής, λύση που προτιμήθηκε από το ξηραντήριο εγκάρσιας ροής καθώς δεν συνοδεύεται από μεγάλη πτώση πίεσης ή πολυπλοκότητα κατασκευής προς αποφυγή διασκορπισμού του προϊόντος, ενώ το τελικό παραγόμενο προϊόν δεν εμφανίζει ανομοιομορφία ως προς την περιεχόμενη υγρασία του, λόγω κορεσμού του αέρα σε υγρασία καθ' ύψος.

Ο θάλαμος του ξηραντηρίου επιλέχθηκε να έχει διαστάσεις 100x60x36cm (μήκος x πλάτος x ύψος). Έξι τελάρα διαστάσεων 100x60x3cm το καθένα, τοποθετούνται κάθετα σε απόσταση 3cm μεταξύ τους. Όσον αφορά τη διάταξη των τελάρων, για δεδομένες διαστάσεις κελύφους και πάχους τελάρων, η απόσταση, άρα και ο αριθμός των τελάρων, είναι τέτοιος που να διασφαλίζεται η απαιτούμενη ταχύτητα του αέρα ανά σειρά προϊόντος. Με δεδομένο ότι η φαινόμενη πυκνότητα του σπόρου της ελαιοκράμβης δίνεται 669 kg/m³ [9], σε συνδυασμό με τις διαστάσεις του θαλάμου ξήρανσης, προκύπτει ότι η δυναμικότητα του ξηραντηρίου ανέρχεται σε 12 kg σπόρου ελαιοκράμβης ανά κύκλο λειτουργίας.

2.2. ΚΙΝΗΤΙΚΗ ΤΗΣ ΞΗΡΑΝΣΗΣ

Ο προσδιορισμός της συμπεριφοράς του σπόρου της ελαιοκράμβης κατά την ξήρανσή του για δεδομένες συνθήκες του αέρα ξήρανσης (θερμοκρασία, υγρασία, ταχύτητα ροής), δηλαδή η μεταβολή της περιεχόμενης υγρασίας του σπόρου συναρτήσει της διάρκειας της διεργασίας ονομάζεται κινητική της ξήρανσης. Οι συνθήκες ξήρανσης του σπόρου επηρεάζουν την χημική σύστασή του επομένως και την τελική ποιότητα και ποσότητα του εξαγόμενου ελαίου το οποίο χρησιμοποιείται κατά κόρον ως βιοκαύσιμο [10]. Στη βιβλιογραφία σε αντίθεση με τα λοιπά θερμοευαίσθητα γεωργικά προϊόντα, η κινητική της ξήρανσης του σπόρου της ελαιοκράμβης έχει προσδιοριστεί για χαμηλές τιμές απόλυτης υγρασίας του αέρα ξήρανσης [11-13], γεγονός που επιτρέπει την χρησιμοποίηση των εξισώσεων αυτών στην εφαρμογή του ξηραντηρίου με τον τροχό αφύγρανσης.

Η ξήρανση της ελαιοκράμβης πραγματοποιείται σε λεπτά στρώματα (thin layer drying). Τα χρησιμοποιούμενα μοντέλα είναι αυτά του δεύτερου νόμου του Fick για σφαιρική γεωμετρία [11-12],[14] όπου προσδιορίζεται ο συντελεστής διάχυσης και ημ εμπειρικές εξισώσεις όπου υπολογίζονται οι διάφοροι συντελεστές μετά από παρεμβολή στα πειραματικά δεδομένα για τις διάφορες συνθήκες ξήρανσης [13].

Ως εξισώσεις για την περιγραφή της κινητικής της ξήρανσης του σπόρου της ελαιοκράμβης επιλέγεται μια τροποποιημένη εξίσωση του Smith για την περιεχόμενη υγρασία ισορροπίας (X_e) σε σχέση με την δραστηριότητα (a_w) όπως προκύπτει από την σχέση που ακολουθεί:

$$X_e = (K_1 + K_2 T) - (K_3 + K_4 T) \ln(1 - a_w) \quad (1)$$

όπου:

- K_1, K_2, K_3, K_4 : σταθερές που εξαρτώνται από την θερμοκρασία και την δραστηριότητα

Ενώ η εκθετική εξίσωση για την καμπύλη ξήρανσης, η οποία συσχετίζει την περιεχόμενη υγρασία του σπόρου (X) με ανεξάρτητη μεταβλητή την διάρκεια της διεργασίας (t), με τους αντίστοιχους συντελεστές της εξίσωσης να είναι εκφρασμένοι συναρτήσει της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας του αέρα ξήρανσης [13], δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

Για τον αδιάστατο λόγο υγρασίας (MR) χρησιμοποιήθηκε η εκθετική εξίσωση δύο όρων:

$$MR = a \exp(-k_1 t) + b \exp(-k_2 t) \quad (2)$$

όπου:

- k_1, k_2, a, b : σταθερές που εξαρτώνται από τις συνθήκες ξήρανσης

Από τον ορισμό του λόγου υγρασίας σε συνδυασμό με την εξίσωση 2 προκύπτει η έκφραση για την περιεκτικότητα σε υγρασία:

$$MR = \frac{X - X_e}{X_o - X_e} \Rightarrow X = MR(X_o - X_e) + X_e \quad (3)$$

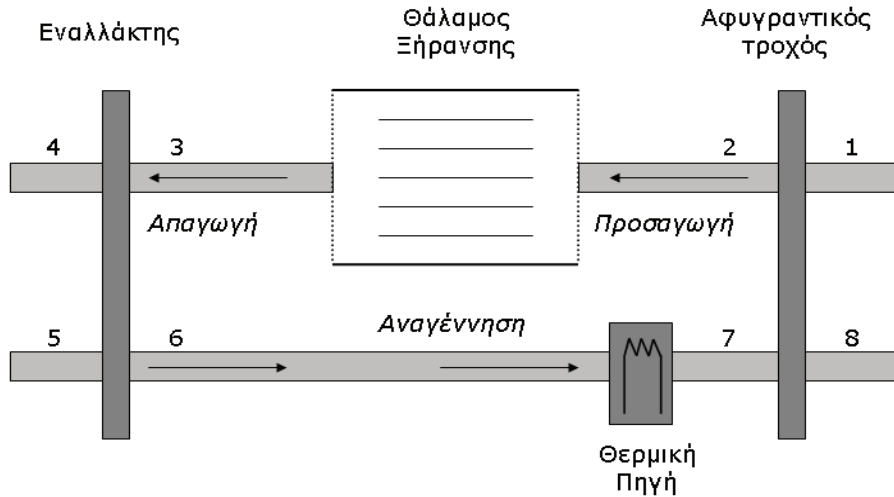
όπου:

- X_o : αρχική περιεκτικότητα σε υγρασία
- X_e : υγρασία ισορροπίας

2.3. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΞΗΡΑΝΤΗΡΙΟΥ ΜΕ ΣΥΣΚΕΥΗ ΑΦΥΓΡΑΝΣΗΣ

Ως συσκευή αφύγρανσης υιοθετήθηκε τροχός silica-gel, ο τροχός αφύγρανσης επιλέχθηκε έναντι άλλων διατάξεων αφύγρανσης που εξετάζονται στη βιβλιογραφία για εφαρμογή στην ξήρανση [15], [16], [17] (στρωματοποιημένες συσκευές-racked beds), καθώς προσφέρει συνεχή λειτουργία, μεγάλη επιφάνεια επαφής και χαμηλή πτώση πίεσης [18]. Όσον αφορά το αφυγραντικό υλικό, επιλέχθηκε η πυριτική γέλη, καθώς επιφέρει σημαντικά αποτελέσματα στην συνολική διάρκεια της διεργασίας και στην τελική ποιότητα του τελικού προϊόντος. Επιπλέον η θερμοκρασία αναγέννησης της πυριτικής γέλης που αναφέρεται στη βιβλιογραφία έχει ως κατώτατη τιμή τους 60 °C και σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να φτάσει και τους 150 °C [18], γεγονός που επιτρέπει την διερεύνηση της λειτουργιάς συστοιχίας ηλιακών συλλεκτών με σκοπό την αναγέννηση του τροχού.

Η διάταξη του ξηραντηρίου με τροχό αφύγρανσης (σχήμα 1) αποτελείται από τέσσερα κύρια μέρη. Το θάλαμο ξήρανσης, τη θερμική πηγή για την πρόσδοση θερμότητας στον αέρα περιβάλλοντος για την αναγέννηση του τροχού, έναν εναλλάκτη αέρα-αέρα μεταξύ των ρευμάτων απαγωγής και αναγέννησης προ της εισόδου του αέρα στη θερμική πηγή και έναν αφυγραντικό τροχό για την αφύγρανση του αέρα πριν από την είσοδο του στον θάλαμο ξήρανσης.



Σχήμα 1: Διάταξη ξηραντηρίου με τροχό αφύγρανσης

Για τη μοντελοποίηση του ξηραντηρίου απαιτείται η γνώση των μοντέλων που περιγράφουν τη λειτουργία των κυρίων υποσυστημάτων. Στη συνέχεια τα μοντέλα ενσωματώνονται στο συνολικό μοντέλο ανάλογα με τη θέση των αντίστοιχων υποσυστημάτων στη συνολική διάταξη. Για λόγους οικονομίας του κειμένου, παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των υιοθετούμενων προσεγγίσεων. Για περισσότερες λεπτομέρειες, κάποιος μπορεί να ανατρέξει στην εργασία [19].

Από το ενεργειακό ισοζύγιο στο θάλαμο του ξηραντηρίου θεωρώντας ότι δεν εναλλάσσεται

θερμότητα με το περιβάλλον (αδιαβατική μεταβολή) και συνυπολογίζοντας την ενθαλπία εξατμίσεως του νερού το οποίο αφαιρείται από το προϊόν [20], μπορεί να υπολογιστεί η θερμοκρασιακή πτώση (ΔT) του αέρα. Για το λόγο αυτό, απαιτείται η γνώση της θερμοκρασίας εισόδου του αέρα στο ξηραντήριο, η οποία και προκύπτει μέσω της μοντελοποίησης της διεργασίας αφύγρανσης.

Τα φαινόμενα που διέπουν τον τροχό αφύγρανσης κατά την λειτουργία του είναι αυτά της μεταφοράς μάζας και θερμότητας μεταξύ των δύο ρευμάτων προσαγωγής και αναγέννησης. Για τη μοντελοποίηση της λειτουργίας του τροχού στη σχετική βιβλιογραφία θεωρείται αρκετά διαδεδομένη η προσέγγισή της σε αναλογία με αυτή ενός απλού (περιστρεφόμενου) εναλλάκτη θερμότητας (θεωρία αναλογίας) [21]. Η αναλογία εκφράζεται μέσω της χρήσης των μεταβλητών συνδυασμένου δυναμικού F_1 , F_2 (characteristic or combined potential variables) [21],[22],[23] οι οποίοι για την προκείμενη περίπτωση προσδιορίζονται για χρήση silica – gel ως αφυγραντικού μέσου και αέρα υδρατμού ως εργαζόμενου μέσου [24]. Οι μεταβλητές αυτές εμπεριέχουν τόσο τη θερμοκρασία όσο και την απόλυτη υγρασία των εμπλεκόμενων ρευμάτων.

Η επίλυση του προβλήματος του τροχού αφύγρανσης σύμφωνα με τη θεωρία αναλογίας, βασίζεται στον ορισμό των συντελεστών απόδοσης του τροχού η_{F1} , η_{F2} ως προς τις μεταβλητές F_1 , F_2 , σε αναλογία με το συντελεστή απόδοσης εναλλάκτη μεταφοράς θερμότητας περιστρεφόμενου τύπου (η_{mx}). Οι συντελεστές απόδοσης ανάλογα με τις τιμές που παίρνουν χαρακτηρίζουν την ποιτική λειτουργία του τροχού και παραμένουν εν γένει σταθεροί κατά την λειτουργία του [25]. Στην παρούσα εφαρμογή οι τιμές των συντελεστών επιλέχθηκαν $\eta_{F1}=0.09$ και $\eta_{F2}=0.76$, οι οποίες χαρακτηρίζουν την απόδοση ενός συγκεκριμένου εμπορικά διαθέσιμου τροχού αφύγρανσης [26].

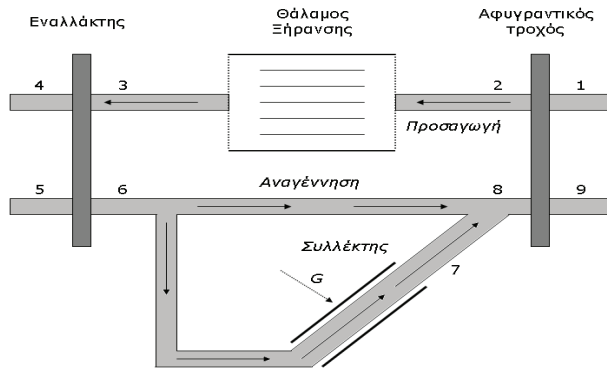
Για τον εναλλάκτη ανάκτησης θερμότητας του συστήματος έγινε η υπόθεση ίσων τιμών θερμοχωρητικότητας παροχών στα δύο ρεύματα ενώ ο βαθμός απόδοσης θεωρήθηκε σταθερός. Ο βαθμός απόδοσης του εναλλάκτη [27], θεωρήθηκε ίσος με 0.85, τιμή που αντιστοιχεί στην απόδοση συγκριμένου εμπορικού προϊόντος [26].

Η επίλυση του συστήματος των εξισώσεων που συγκροτούν το συνολικό μοντέλο γίνεται αλγεβρικά. Για την επίλυση επιλέχθηκε χρονικό βήμα $\Delta t=600$ sec.

Η ενεργειακή κατανάλωση αποτελεί μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους για την αξιολόγηση της λειτουργικότητας του ξηραντηρίου και συγκριτικό μέγεθος μεταξύ προτεινόμενων διατάξεων. Έχοντας λοιπόν γνωστές τις θερμοκρασίες σε κάθε θέση των ρευμάτων προσαγωγής και απαγωγής, είναι δυνατό (για δεδομένες τιμές παροχής του αέριου ρεύματος) να υπολογιστεί η καταναλισκόμενη ενέργεια για την ξήρανση του σπόρου της ελαιοκράμβης υπό την επιθυμητή θερμοκρασία ξήρανσης. Σε αντίθεση με την περίπτωση του συμβατικού ξηραντηρίου, όπου η καταναλισκόμενη ενέργεια χρησιμοποιείται για τη θέρμανση του αέρα ξήρανσης, στην περίπτωση του τροχού αφύγρανσης η ενέργεια που δαπανάται για την πραγματοποίηση της ξήρανσης είναι η ενέργεια που χρησιμοποιείται για την αναγέννηση του τροχού αφύγρανσης. Δηλαδή η ενέργεια που απαιτείται να προσδώσει η θερμική πηγή έτσι ώστε η θερμοκρασία του ρεύματος αναγέννησης να αυξηθεί κατά $\Delta T=T_7-T_6$ (η θερμική πηγή θεωρείται ότι εξασφαλίζει σταθερή επιθυμητή θερμοκρασία αναγέννησης, $T_7=ct.$).

2.4. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΗΛΙΑΚΟΥ ΞΗΡΑΝΤΗΡΙΟΥ ΜΕ ΣΥΣΚΕΥΗ ΑΦΥΓΡΑΝΣΗΣ

Η προτεινόμενη διάταξη περιλαμβάνει τη διάταξη με τη συσκευή αφύγρανσης που εξετάστηκε, με την απαιτούμενη θερμική ενέργεια να προσάγεται από συστοιχία ηλιακών συλλεκτών αέρα (σχήμα 2). Όσον αφορά το τμήμα της διάταξης που αναφέρεται στη θέρμανση του αέρα αναγέννησης του αφυγραντικού τροχού, ένα ποσοστό της παροχής του ρεύματος αναγέννησης, έπειτα από την θέρμανσή του από τον εναλλάκτη ανάκτησης θερμότητας (θέση 6), οδηγείται στην συστοιχία των ηλιακών συλλεκτών για την περαιτέρω αύξηση της θερμικής του ισχύος (θέση 7). Στη συνέχεια, πραγματοποιείται αδιαβατική ανάμειξη των δύο ρευμάτων (θέση 8) με στόχο την επακόλουθη αναγέννηση του τροχού αφύγρανσης.



Σχήμα 2: Διάταξη ηλιακού ξηραντηρίου με τροχό αφύγρανσης

Το μοντέλο του ηλιακού ξηραντηρίου αναπτύχθηκε στη βάση του μοντέλου του ξηραντηρίου με αφυγραντικά μέσα, με την κατάλληλη εισαγωγή των σχέσεων που περιγράφουν τη λειτουργία του συλλέκτη αέρα. Για τη λειτουργία του συλλέκτη αέρα προτείνεται το απλούστερο μοντέλο για τον βαθμό απόδοσης του συλλέκτη (η_{sol}), το οποίο ισχύει για κάθετη πρόσπτωση. Ο βαθμός απόδοσης προσδιορίζεται από την αφαίρεση του ποσοστού των θερμικών απωλειών του συλλέκτη από την οπτική απόδοσή του (η_o), η οποία εκφράζει και την μέγιστη δυνατή απόδοση για τις συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας του [28],[29]. Τονίζεται ότι στην περίπτωση αλλαγής γωνίας πρόσπτωσης, προστίθεται άλλη μία παράμετρος, αυτή του συντελεστή γωνίας πρόσπτωσης [29].

Ο ηλιακός συλλέκτης που επιλέχθηκε έχει μελετηθεί τόσο αυτόνομα όσο και σε σύνδεση με διάταξη ξήρανσης στο ΕΚΕΦΕ ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ [30] όπου και για τον συγκεκριμένο συλλέκτη, προκύπτει για παροχή $78 \text{ m}^3/\text{h}$, τα ακόλουθα χαρακτηριστικά: $\eta_o=0.61$, $U=2.57 \text{ W/m}^2/\text{K}$ (όπου U ο συντελεστής θερμικών απωλειών).

Σύμφωνα με τη διάταξη που περιγράφεται στο σχήμα 2, ο θερμαινόμενος αέρας από το συλλέκτη αναμιγνύεται με τον υπόλοιπο αέρα του ρεύματος απαγωγής, στην έξοδο του εναλλάκτη ανάκτησης, ώστε να διατηρείται στον τροχό η επιθυμητή παροχή. Η περίπτωση λειτουργίας της διάταξης με όχι ίσες τιμές για τα ρεύματα παροχής και προσαγωγής δεν μελετήθηκε, καθώς οι πειραματικά προσδιοριζόμενοι [26], [25] ή παρεχόμενοι από τους κατασκευαστές (ProFlute, Klingenburg) συντελεστές απόδοσης των συσκευών δεν είναι διαθέσιμοι.

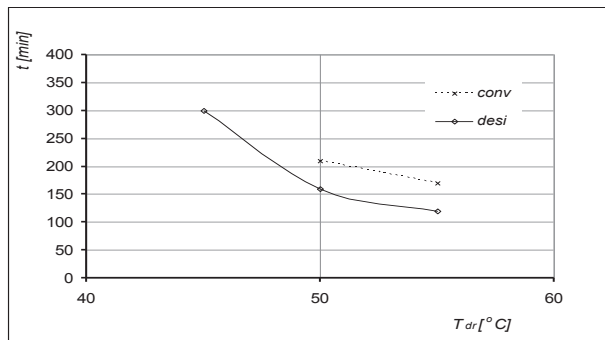
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται συγκριτικά, τα αποτελέσματα της ξήρανσης του σπόρου της ελαιοκράμβης στο συμβατικό και στο ξηραντήριο με τη συσκευή αφύγρανσης, ως προς την συνολικά απαιτούμενη διάρκεια της διεργασίας καθώς και ως προς την απαιτούμενη ενέργεια για την πραγματοποίησή της, συναρτήσει των συνθηκών ξήρανσης. Επιπλέον παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που επιφέρει η προσάρτηση συστοιχίας τριών και τεσσάρων ηλιακών συλλεκτών στο ξηραντήριο με τον αφυγραντικό τροχό, καθώς και οι αντίστοιχες καμπύλες ξήρανσης.

3.2. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΥ ΞΗΡΑΝΤΗΡΙΟΥ ΚΑΙ ΞΗΡΑΝΤΗΡΙΟΥ ΜΕ ΣΥΣΚΕΥΗ ΑΦΥΓΡΑΝΣΗΣ

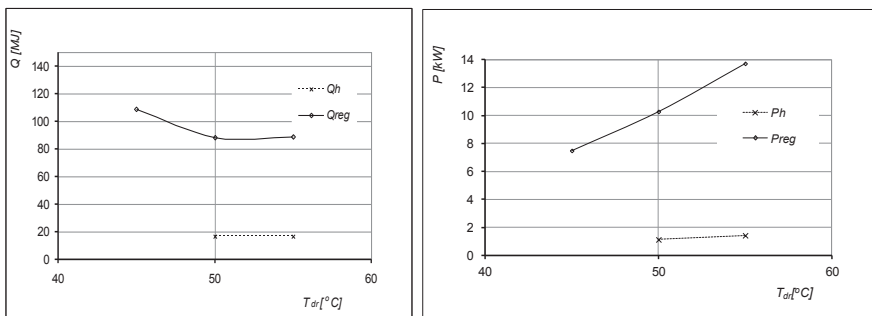
Όπως φαίνεται και στο παρακάτω συγκριτικό διάγραμμα (σχήμα 3), ο απαιτούμενος χρόνος ξήρανσης στην περίπτωση του ξηραντηρίου με τον αφυγραντικό τροχό είναι μικρότερος σε σχέση με την ξήρανση στο συμβατικό ξηραντήριο για τις αντίστοιχες θερμοκρασίες ξήρανσης. Προφανώς αυτό οφείλεται στο γεγονός πως η παρουσία του τροχού συνεισφέρει στην μείωση της υγρασίας του ρεύματος ξήρανσης.



Σχήμα 3: Συνολικός χρόνος ξήρανσης σε σχέση με την θερμοκρασία ξήρανσης στο συμβατικό (conv) και στο ξηραντήριο με τον τροχό αφύγρανσης (desi)

Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν το γεγονός πως η υγρασία του αέρα ξήρανσης αποτελεί μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους της διεργασίας καθώς πέρα από την επιφέρει στην διάρκεια της ξήρανσης, καθιστά εφικτή την ξήρανση σε χαμηλότερη θερμοκρασία. Ενώ στο συμβατικό ξηραντήριο για τις δεδομένες συνθήκες περιβάλλοντος η ξήρανση στους 45 °C δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί, ο, χαμηλής περιεκτικότητας σε υγρασία, αέρας ξήρανσης στην διάταξη του ξηραντηρίου με τον τροχό αφύγρανσης καθιστά εφικτή την ξήρανση σε αυτή την θερμοκρασία.

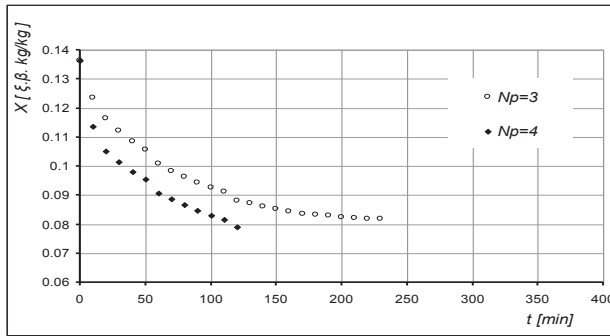
Όπως φαίνεται και από τα παρακάτω διαγράμματα (σχήμα 4) οι ενεργειακές απαιτήσεις του συμβατικού ξηραντηρίου (Q_h) είναι σαφέστατα χαμηλότερες σε σχέση με το ξηραντήριο αφύγρανσης του αέρα ξήρανσης (Q_{reg}). Αν και ο χρόνος ξήρανσης μειώνεται (σχήμα 3) η καταναλισκόμενη ισχύς είναι αρκετά μεγαλύτερη (σχήμα 4), έχοντας ως αποτέλεσμα η συνολικά απαιτούμενη ενέργεια να παραμένει σημαντικά υψηλότερη στην περίπτωση του τροχού αφύγρανσης.



Σχήμα 4: Συνολική απαιτούμενη ενέργεια (Q) και ισχύς (P) σε σχέση με την θερμοκρασία ξήρανσης (T_{ar}) στο συμβατικό (δείκτης h) και στο ξηραντήριο με τον τροχό αφύγρανσης (δείκτης reg)

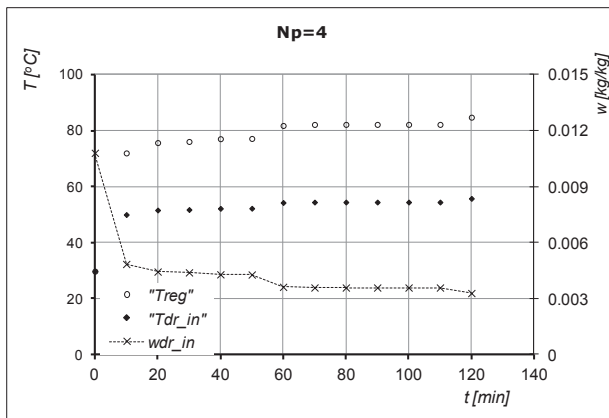
3.3. ΗΛΙΑΚΟ ΞΗΡΑΝΤΗΡΙΟ ΜΕ ΣΥΣΚΕΥΗ ΑΦΥΓΡΑΝΣΗΣ

Τα αποτελέσματα που ακολουθούν προέκυψαν για την ξήρανση του σπόρου της ελαιοκράμβης κατά τη διάρκεια των μεσημεριανών ωρών, ώστε να μεγιστοποιείται η διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια. Στο σχήμα 5 παρατηρούμε την καμπύλη ξήρανσης του σπόρου για συστοίχια τριών και τεσσάρων συλλεκτών σε παράλληλη συνδεσμολογία. Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση των τριών συλλεκτών η ξήρανση επιτυγχάνεται οριακά ($X_e=0.08$ [11]), ενώ με τη χρήση τεσσάρων συλλεκτών προκύπτει μείωση του χρόνου ξήρανσης, με την αύξηση όμως του κόστους της εγκατάστασης.



Σχήμα 5: Καμπύλη ξήρανσης για συστοιχία τριών ($N_r=3$) και τεσσάρων ($N_r=4$) συλλεκτών αέρα σε παράλληλη σύνδεση

Οι επιτευχθείσες συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας του αέρα (σχήμα 6) στην έξοδο του αφυγραντικού τροχού (είσοδος του ξηραντηρίου) διασφαλίζουν την αποτελεσματική ξήρανση του προϊόντος. Επισημαίνεται ότι η θερμοκρασία που επιτυγχάνεται στο συλλέκτη είναι υψηλή. Συνεπώς δεν υπάρχει λόγος για σύνδεση των συλλεκτών σε σειρά, συνδεσμολογία η οποία χρησιμοποιείται για την επίτευξη υψηλότερων θερμοκρασιών σε σχέση με την παράλληλη συνδεσμολογία. Για το λόγο αυτό, η διερεύνηση περιορίστηκε στην παράλληλη συνδεσμολογία.



Σχήμα 6: Επιτευχθείσες συνθήκες θερμοκρασίας (T_{dr_in}) και υγρασίας (w_{dr_in}) στην είσοδο του ξηραντηρίου και θερμοκρασία αναγέννησης αφυγραντικού τροχού (T_{reg}) κατά την ξήρανση ελαιοκράμβης με αξιοποίηση ηλιακής ενέργειας

Σε κάθε περίπτωση τα παραπάνω αποτελέσματα είναι ενδεικτικά για τις δυνατότητες αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας σε αντίστοιχες εγκαταστάσεις, και αναφέρονται στις συγκεκριμένες επιλογές ως προς τις συνθήκες λειτουργίας και τα υποσυστήματα της διάταξης.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία διερευνήθηκε η δυνατότητα ξήρανσης σπόρου ελαιοκράμβης σε ξηραντήριο με τροχό αφύγρανσης. Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων εξετάστηκε και αντίστοιχη συμβατική διάταξη. Από την ανάλυση, προκύπτει ότι το ξηραντήριο αφύγρανσης του αέρα ξήρανσης εμφανίζει συγκριτικά πλεονεκτήματα έναντι της χρήσης της συμβατικής διάταξης.

Ειδικότερα, τα αποτελέσματα επαληθεύουν την θετική επίδραση της χαμηλής υγρασίας του αέρα ξήρανσης στην μείωση της συνολικής διάρκειας της διεργασίας. Επιπλέον η δυνατότητα πραγματοποίησης της ξήρανσης σε χαμηλότερες θερμοκρασίες έναντι του συμβατικού ξηραντηρίου καθιστά την προτεινόμενη διάταξη κατάλληλη για την ξήρανση θερμοευαίσθητων γεωργικών προϊόντων. Εν τούτοις σε ενεργειακό επίπεδο, η παρουσία του τροχού αφύγρανσης αυξάνει σημαντικά τις απαιτήσεις σε θερμική ενέργεια. Στο πλαίσιο αυτό, είναι σημαντικό να σταθμιστεί ποσοτικά η βελτίωση της ποιότητας του τελικού προϊόντος, μέσω της ξήρανσης με αφυγραντικά μέσα, σε σχέση με την αύξηση του ενεργειακού κόστους.

Τέλος, η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας για την επιτυχή ξήρανση θερμοευαίσθητων αγροτικών προϊόντων μέσω της αφύγρανσης του αέρα ξήρανσης αποδεικνύεται εφικτή. Η αντικατάσταση της απαιτούμενης θερμικής ενέργειας στο ξηραντήριο με τον τροχό αφύγρανσης από συστοιχία ηλιακών συλλεκτών αέρα καθιστά εφικτή την ξήρανση του σπόρου της ελαιοκράμβης, αυξάνοντας όμως παράλληλα το συνολικό κόστος της εγκατάστασης.

Σε μια γενικότερη αποτίμηση, θα μπορούσε να διατυπωθεί πως η ξήρανση των αρωματικών και φαρμακευτικών φυτών και γενικότερα των θερμοευαίσθητων γεωργικών προϊόντων με αφυγραντικά μέσα αποτελεί ένα τεχνολογικό αντικείμενο το οποίο δεν έχει ερευνηθεί εκτενώς. Η βελτίωση της ποιότητας του τελικού αποξηραμένου προϊόντος λόγω της ξήρανσης σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, η αύξηση της παραγωγικότητας, λόγω της μείωσης του χρόνου ξήρανσης ανά κύκλου λειτουργίας, η δυνατότητα χρήσης των διατάξεων από μικρούς και μεσαίους παραγωγούς, η δυνατότητα αντικατάστασης της θερμικής πηγής από ηλιακούς συλλέκτες για την μείωση τους λειτουργικού κόστους, αποτελούν τους λόγους για την πραγματοποίηση περαιτέρω έρευνας, σε μία, όπως αποδείχτηκε και από τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας, πολλά υποσχόμενη τεχνολογική εφαρμογή.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Belghit, A., Kouhila, M., and Boutaleb, B.-C., 2000, "Experimental study of drying kinetics by forced convection of aromatic plants," *Energy Conversion and Management*, 41(12), pp. 1303–1321.
- [2] Akpınar, K.-E., 2006, "Mathematical modelling of thin layer drying process under open sun of some aromatic plants," *Journal of Food Engineering*, 77, pp. 864–870.
- [3] Akpınar, K.-E., 2010, "Drying of mint leaves in a solar dryer and under open sun: Modelling, performance analyses," *Energy Conversion and Management*, 51, pp. 2407–2418.
- [4] Argyropoulos, D., and Müller, J., 2011, "Effect of Convective Drying on Quality of Lemon Balm (*Melissa Officinalis* L.)," *Procedia Food Science*, 1, pp. 1932–1939.
- [5] Rocha, R.-P., Melo, E.-C., and Radünz, L.-L., 2011, "Influence of drying process on the quality of medicinal plants: A review," *Journal of Medicinal Plants Research*, 5(33), pp. 7076–7084.
- [6] Sharapin, N., 2000, "Fundamentos de tecnologia de Produtos Fitoterápicos", Santafé de Bogotá, pp. 145-157.
- [7] Seyhan, F.-G., and Evranuz, Ö., 2000, "Low temperature Mushroom (*A. bisporus*) Drying with Desiccant Dehumidifiers," *Drying Technology: An International Journal*, 18(1-2), pp. 433-445.
- [8] Kosuke, N., Ying, L., Zhehong J., Masahiro, F., Yoshinori, A., and Atsutoshi, A., 2005, "Low-temperature desiccant-based food drying system with airflow and temperature control," *Journal of Food Engineering*, 75, pp. 71-77.
- [9] American National Standards Institute, 1998, "Density, Specific Gravity, and Mass-Moisture Relationships of Grain for Storage", ANSI/ASAE D241.4.
- [10] Jakubowska, K.-M., and Szpryngiel, M., 2008, "Influence on drying condition on quality properties of rapeseed," *International Agrophysics*, 22, pp. 327-331.
- [11] Crisp, J., and Woods, J.-L., 1994, "The drying properties of rapeseed," *Journal of Agricultural Engineering Research*, 57, pp. 89-97.
- [12] Duc, L.-A., Han, W.-J., and Keum, D.-H., 2011, "Thin layer drying characteristics of rapeseed (*Brassica napus* L.)," *Journal of Stored Products Research*, 47, pp. 32-38.

- [13] Zare, D., Ranjbaran, M., Niakousari, M., and Javidi, M., 2011-2012, "Thin Layer Drying and Equilibrium Moisture Content Equations for Canola (*Brassica napus* L.)," *Iran Agricultural Research*, 30(1-2), 31(1).
- [14] Crank, J., 1975, "The mathematics of diffusion (2nd ed.)," Oxford: Clarendon Press.
- [15] Madhiyanon, T., Adirekrut, S., Sathitruangsak, P., and Soponronnarit, S., 2007, "Integration of a rotary desiccant wheel into a hot-air drying system: Drying performance and product quality studies," *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 46(4), pp. 282-290.
- [16] De Antonellis, S., Joppolo, C.-M., Molinaroli, L., and Pasini, A., 2012, "Simulation and energy efficiency analysis of desiccant wheel systems for drying processes," *Energy*, 37, pp. 336-345.
- [17] Atuonwu, J.-C., Jin, X., Van Straten, G., Van Deventer Antonius H.-C., and Van Boxtel J.-B., 2011, "Reducing energy consumption in food drying: Opportunities in desiccant adsorption and other dehumidification strategies," *Procedia Food Science*, 1, pp. 1799-1805.
- [18] Πανάρας, Γ., 2010, "Θεωρητική και πειραματική διερεύνηση συστήματος ηλιακού κλιματισμού με στέρεα αφυγραντικά μέσα," Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη.
- [19] Διαμαντόπουλος, Θ., 2013, "Ξήρανση θερμοευαίσθητων γεωργικών προϊόντων με στέρεα αφυγραντικά μέσα," Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα.
- [20] ASHRAE, 1996, "Psychrometrics: Theory and Practice," American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, GA.
- [21] Maclaine-Cross, I.L., and Banks, P.J., 1972, "Coupled heat and mass transfer in regenerators-prediction using an analogy heat transfer," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 15, pp. 1225-1242.
- [22] Maclaine-Cross, I.L., 1974, "A theory of combined heat and mass transfer in regenerators," Ph.D. Thesis, Monash University, Melbourne.
- [23] Banks P.J., 1972. Coupled equilibrium heat and single adsorbate transfer in fluid flow through porous medium – I. Characteristics potentials and specific capacity ratios. *Chemical Engineering Science* 27, 1143-1155
- [24] Jurinak, J.J., 1982, "Open cycle solid desiccant cooling-component models and system simulations," Ph. D. Thesis, Univ. of Wisconsin, Madison.
- [25] Panaras, G., Mathioulakis, E., Belessiotis, V., Kyriakis, N., 2010b, "Experimental validation of a simplified approach for a desiccant wheel model," *Energy and Buildings*, 42(10), pp. 1719-1725.
- [26] Panaras, G., Mathioulakis, E., Belessiotis, V., Kyriakis, N., 2010a, "Theoretical and experimental investigation of a desiccant air-conditioning system," *Renewable Energy*, 35, pp. 1368-1375.
- [27] Kays, W.-M., and London, A.-L., 1984, "Compact Heat Exchangers (3rd ed.)," Mc-Graw Hill, London.
- [28] CEN, 2006, EN12975-2, "Thermal Solar Systems and Components – Solar Collectors – Part 2: Test Methods," Brussels.
- [29] Duffie, J.A., and Beckmann, W.A., 2006, "Solar Engineering of Thermal Processes (3rd edition)," Wiley-Interscience, New York.
- [30] Lamnatou, C., Papanicolaou, E., Belessiotis, V., and Kyriakis, N., 2012, "Experimental investigation and thermodynamic performance analysis of a solar dryer using an evacuated-tube air collector," *Applied Energy*, 94, pp. 232-243.

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΗΛΙΑΚΩΝ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΕΣ ΚΑΙ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Κωνσταντίνος Α. Λυμπερόπουλος¹, Παντελής Ν. Μπότσαρης¹

¹Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Πολυτεχνική Σχολή
Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης, Τ.Κ. 67100, Ξάνθη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο μέλλον, η κύρια εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας θα αφορά την παραγωγή θερμότητας για την άμεση ικανοποίηση θερμικών φορτίων. Η βιομηχανία αποτελεί ένα αρκετά υποσχόμενο τομέα όσον αφορά την εφαρμογή τεχνολογιών ηλιακής θερμικής ενέργειας, καθώς αποτελεί το 25,60% της τελικής κατανάλωσης ενέργειας της Ευρώπης. Στην Ελλάδα, το 17,83% της τελικής κατανάλωσης ενέργειας οφείλεται στην Ελληνική βιομηχανία. Η ζήτηση της θερμικής ενέργειας των διεργασιών της Ελληνικής βιομηχανίας εκτιμάται για το 2011 σε 47,07% της τελικής κατανάλωσης ενέργειας της βιομηχανίας. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας γίνεται εκτίμηση του θεωρητικού και τεχνικού δυναμικού εφαρμογής ηλιακών θερμικών συστημάτων στις Ελληνικές βιομηχανικές διεργασίες και εντοπίζονται οι περισσότερο υποσχόμενες βιομηχανίες και διεργασίες για την Ελλάδα. Ο βιομηχανικός τομέας των τροφίμων, ποτών και καπνού αποτελεί αναμφίβολα το σημαντικότερο τομέα της Ελληνικής βιομηχανίας όσον αφορά την εφαρμογή ηλιακών θερμικών συστημάτων. Το σύνολο των 2,1 εκατ. m² ηλιακών συλλεκτών, το οποίο εκτιμάται πως είναι το τεχνικό δυναμικό εφαρμογής ηλιακών θερμικών συστημάτων παραγωγής θερμότητας διεργασιών, αποτελεί μία ιδιαίτερα σημαντική μελλοντική αγορά για την ανάπτυξη της εφαρμογής ηλιακών θερμικών συστημάτων στην Ελλάδα.

Λέξεις Κλειδιά: Ελληνική Βιομηχανία, Βιομηχανικές διεργασίες, Ηλιακά θερμικά συστήματα, Δυναμικό

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όπως αναφέρει το World Nuclear Association [1], ο κύριος ρόλος της ηλιακής ενέργειας στο μέλλον θα είναι για την απευθείας κάλυψη θερμικών φορτίων. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των ηλιακών θερμικών συστημάτων (Η.Θ.Σ.) στην Ευρώπη (ΕΕ-28) έφτασε τα 30,1 GW_{th} το 2013, παράγοντας 21 TWh ηλιακής θερμικής ενέργειας και εξοικονομώντας 3,8 εκατ. tCO₂ [2]. Αντίστοιχα, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς στην Ελλάδα το 2013 ήταν 2,9 GW_{th} (4,2 εκατ. m²) παρουσιάζοντας αύξηση της τάξης του 1,4% [2], ενώ η συντριπτική πλειοψηφία (>95%) αφορά τον οικιακό τομέα. Στο πλαίσιο της ανάπτυξης των Η.Θ.Σ. είναι σημαντική η διερεύνηση νέων εφαρμογών της ηλιακής θερμικής τεχνολογίας, πέρα από την ώριμη, εδώ και αρκετά χρόνια, οικιακή χρήση, όπως για παράδειγμα στον βιομηχανικό τομέα. Το 2012 η τελική κατανάλωση ενέργειας από την βιομηχανία αντιστοιχούσε στο 25,60% της τελικής κατανάλωσης ενέργειας στην Ευρώπη (ΕΕ-28), παρουσιάζοντας πτωτική τάση σε σύγκριση με τα προηγούμενα έτη (26,12% το 2011) [3]. Αντίστοιχα, για την Ελλάδα, το 2012, ήταν 17,50% (17,83% το 2011)[4],[5]. Σχεδόν 50% της συνολικής τελικής κατανάλωσης ενέργειας στην Ευρώπη αφορά παραγωγή θερμότητας στον τριτογενή, οικιακό, αγροτικό και βιομηχανικό τομέα [6]. Μέχρι σήμερα, οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Α.Π.Ε.) διαδραματίζουν μικρό ρόλο στον τομέα της παραγωγής θερμότητας σε αντίθεση με τον τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Στη βιομηχανία, το 10% της παγκόσμιας κατανάλωσης θερμότητας (2011) προήλθε από Α.Π.Ε. [7]. Όσον αφορά το μίγμα των Α.Π.Ε., 99% προήλθε από βιο-ενέργεια (βιομάζα-βιοαέριο) και το υπόλοιπο 1% μοιράστηκε στη γεωθερμική και την ηλιακή θερμική ενέργεια [7]. Σήμερα, λειτουργούν παγκοσμίως περίπου 120 Η.Θ.Σ. παραγωγής θερμότητας σε βιομηχανίες με εγκατεστημένη ισχύ 88 MW_{th} (125.000m²) [8], ενώ στην Ελλάδα λειτουργούν 13 βιομηχανίες με ενσωματωμένα Η.Θ.Σ. [9].

Η εξέταση του δυναμικού εφαρμογής Η.Θ.Σ. στις βιομηχανικές διεργασίες παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Μελέτες εκτίμησης του δυναμικού έχουν ήδη εκπονηθεί για διάφορες χώρες ή περιοχές. Αναλυτική μελέτη έχει εκπονηθεί για την εκτίμηση του θεωρητικού και τεχνικού δυναμικού εφαρμογής Η.Θ.Σ. σε 19 βιομηχανικούς τομείς της Γερμανίας [10]. Άλλες μελέτες εκτίμησης του δυναμικού αφορούν χώρες όπως η Ισπανία και Πορτογαλία [11], η Αυστρία [12], η Αυστραλία [13], η Ιταλία [14], και η Κύπρος [15]. Για την Ελλάδα, οι βιομηχανικοί τομείς των τροφίμων και ποτών, του χαρτιού και προϊόντων χαρτιού και της κλωστοϋφαντουργίας αναλύονται σχετικά με το δυναμικό εφαρμογής Η.Θ.Σ. για την κάλυψη της θερμότητας διεργασιών [16]. Επίσης, εκτίμηση της διαθέσιμης αγοράς για την εφαρμογή μεγάλων Η.Θ.Σ. (large solar thermal systems), δίνεται στο [17]. Η παρούσα μελέτη, επιχειρεί την εκτίμηση του θεωρητικού και τεχνικού δυναμικού εφαρμογής Η.Θ.Σ. για την κάλυψη της θερμότητας των βιομηχανικών διεργασιών συγκεκριμένων βιομηχανικών τομέων της Ελλάδας. Ταυτόχρονα, η ζήτηση της θερμότητας για βιομηχανικές διεργασίες κατανέμεται σε θερμοκρασιακά εύρη και τέλος, προσδιορίζονται οι περισσότερο υποσχόμενοι βιομηχανικοί τομείς και αναλύονται οι καταλληλότερες για την εφαρμογή Η.Θ.Σ. βιομηχανικές διεργασίες της Ελληνικής βιομηχανίας.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η μεθοδολογική προσέγγιση για την εκτίμηση του δυναμικού Η.Θ.Σ. σε βιομηχανικές διεργασίες μπορεί να χωριστεί σε δύο γενικές κατηγορίες, την top-down και την bottom-up προσέγγιση. Η πρώτη απαιτεί τη γνώση της τελικής κατανάλωσης ενέργειας για την παραγωγή θερμότητας ανά βιομηχανικό τομέα. Άλλες μεθοδολογίες της πρώτης προσέγγισης κάνουν χρήση της διαθέσιμης επιφάνειας (στέγη) για την εγκατάσταση Η.Θ.Σ., ενώ για την εκτίμηση του δυναμικού μέσω της bottom-up προσέγγισης απαιτείται η εξέταση σημαντικού αριθμού περιπτώσεων εφαρμογής Η.Θ.Σ. σε βιομηχανίες από όλους τους βιομηχανικούς τομείς. Η top-down προσέγγιση εξαρτάται άμεσα από τα διαθέσιμα στοιχεία καταναλώσεων, τα οποία θα πρέπει να επιβεβαιώνονται καθώς συχνά περιλαμβάνουν σημαντικές αποκλίσεις [12]. Από την άλλη, η bottom-up προσέγγιση απαιτεί την εξέταση

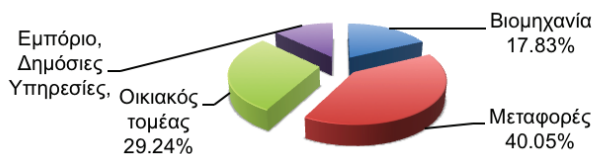
μεγάλου αριθμού περιπτώσεων, το οποίο απαιτεί υψηλούς πόρους[10], [11]. Εντούτοις, η εφαρμογή της bottom-υμεθοδολογίας μπορεί να δώσει ακριβέστερα αποτελέσματα σχετικά με την εκτίμηση του τεχνικού δυναμικού με την προϋπόθεση πως σημαντικός αριθμός περιπτώσεων εξετάζεται αναλυτικά.

Στην παρούσα μελέτη επιλέγεται η top-downπροσέγγιση για την εκτίμηση του δυναμικού εφαρμογής Η.Θ.Σ. σε βιομηχανικές διεργασίες της Ελληνικής βιομηχανίας. Τα διαθέσιμα στατιστικά στοιχεία καταναλώσεων της Ελλάδας, σε αντίθεση με άλλες Ευρωπαϊκές χώρες, δεν περιλαμβάνουν την κατανάλωση θερμικής ενέργειας. Συνεπώς, στα πλαίσια της παρούσας μελέτης θα γίνει χρήση της τελικής κατανάλωσης ενέργειας [4]. Για την περαιτέρω ανάλυση επιλέγεται το έτος 2011. Η μεθοδολογία για την εκτίμηση του δυναμικού Η.Θ.Σ. σε βιομηχανικές διεργασίες περιλαμβάνει την εκτίμηση της ζήτησης θερμικής ενέργειας από τις βιομηχανικές διεργασίες, την κατανομή αυτής σε θερμοκρασιακά εύρη (ενότητα 3) και την εκτίμηση του θεωρητικού δυναμικού εφαρμογής Η.Θ.Σ. στις διεργασίες των Ελληνικών βιομηχανιών. Λαμβάνοντας υπόψη τεχνικούς και άλλους περιορισμούς γίνεται εκτίμηση του τεχνικού δυναμικού και εντοπίζεται το μέγεθος της δυνητικής αγοράς ηλιακών συλλεκτών. Τέλος,προσδιορίζονται οι περισσότερο υποσχόμενοι βιομηχανικοί τομείς και αναλύονται οι καταλληλότερες βιομηχανικές διεργασίες της Ελληνικής βιομηχανίας.

3. ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΗΛΙΑΚΩΝ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΤΙΣ ΕΛΛΗΝΙΚΕΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ

3.1. ΖΗΤΗΣΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ

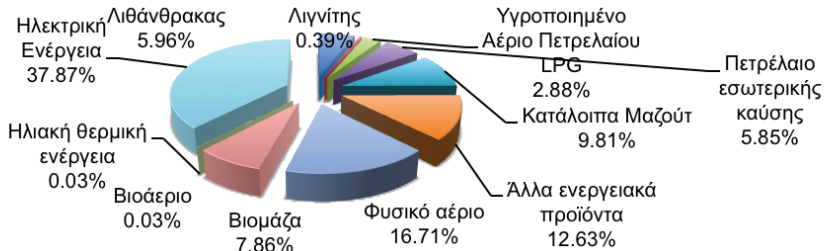
Η τελική κατανάλωση ενέργειας στην Ελλάδα το 2011 ήταν 216.714 GWh, ενώ το 17,83%(38.639 GWh)προέρχεται από την Ελληνική βιομηχανία. Η κατανομή της τελικής κατανάλωσης ενέργειας ανά τομέα φαίνεται στο σχήμα 1. Η κατανομή της τελικής κατανάλωσης ενέργειας ανά καύσιμο στην Ελληνική βιομηχανία δίνεται στο σχήμα 2. Όπως παρατηρείται το 54,21% προέρχεται από ορυκτά καύσιμα, το 7,92% από Α.Π.Ε. (μόλις το 0,39% από Η.Θ.Σ.) και το υπόλοιπο 37,87% από κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Καθώς, η κατανάλωση ενέργειας ανά τελική χρήση δεν είναι διαθέσιμη στα στατιστικά στοιχεία της χώρας, απαιτείται η υιοθέτηση παραδοχών για την εκτίμηση της ζήτησης θερμικής ενέργειας στις βιομηχανικές διεργασίες των Ελληνικών βιομηχανιών. Ταυτόχρονα, η θεώρηση πως το σύνολο της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων στον βιομηχανικό τομέα προορίζεται για την παραγωγή θερμότητας εμπεριέχεται σημαντικό ποσοστό σφάλματος, καθώς αφενώς ποσοστό της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων μπορεί να οφείλεται σε διαφορετική τελική χρήση (πχ. παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας on-site) και αφετέρου μέρος της καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να χρησιμοποιείται για την παραγωγή θερμότητας (πχ. χυτήρια).



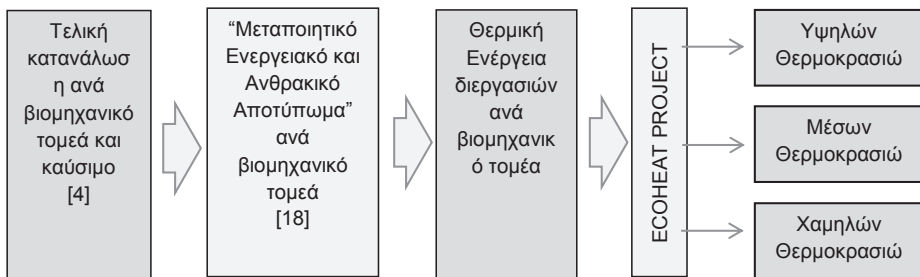
Σχήμα 1: Τελική κατανάλωση ενέργειας στην Ελλάδα, 2011 [4]

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, η εκτίμηση της ζήτησης θερμικής ενέργειας από τις βιομηχανικές διεργασίες βασίζεται στην παραδοχή πως οι «βιομηχανικές διεργασίες μπορούν να θεωρηθούν ως παρόμοιες μεταξύ διαφορετικών χωρών» [10]. Έτσι, για τον υπολογισμό της θερμικής ενέργειας των Ελληνικών βιομηχανικών διεργασιών ανά τομέα βιομηχανίας γίνεται χρήση των «Μεταποιητικών Ενεργειακών και Ανθρακικών Αποτυπωμάτων» [18]. Τα ενεργειακά αποτυπώματα για συγκεκριμένους βιομηχανικούς

τομείς δείχνουν το ποσοστό της ενέργειας από κάθε καύσιμο, το οποίο καταναλώνεται ως θερμότητα στις βιομηχανικές διεργασίες. Στη συνέχεια, για την περιγραφή της ποιότητας της θερμότητας που απαιτείται από τις βιομηχανικές διεργασίες, ακολουθεί η προσέγγιση η οποία περιλαμβάνει τρία θερμοκρασιακά εύρη σε κάθε βιομηχανικό τομέα [19]. Ειδικότερα, η ανάλυση περιλαμβάνει θερμοκρασίες μικρότερες των 100°C (πλύσιμο, έκπλυση, προετοιμασία τροφίμων, κ.α.), θερμοκρασίες από 100 έως 400°C (ξήρανση, εξάτμιση κ.α.) και θερμοκρασίες πάνω από 400°C (ηλεκτρική επαγωγή, πύρωση, κ.α.). Συνολικά, η μεθοδολογία για την εκτίμηση της ζήτησης θερμικής ενέργειας από τις διεργασίες κάθε βιομηχανικού τομέα δίνεται στο σχήμα 3, ενώ τα αποτελέσματα δίνονται στον πίνακα 1.



Σχήμα 2: Τελική κατανάλωση ενέργειας στην Ελληνική βιομηχανία ανά καύσιμο, 2011 [4]



Σχήμα 3: Μεθοδολογία υπολογισμού θερμικής ενέργειας βιομηχανικών διεργασιών στην Ελλάδα, 2011 [4], [18]

Η κατανάλωση ενέργειας στις βιομηχανικές διεργασίες αποτελεί το 47,07% της συνολικής τελικής κατανάλωσης ενέργειας των Ελληνικών βιομηχανιών το 2011. Επισημαίνεται, δεν συμπεριλαμβάνεται η κατανάλωση θερμικής ενέργειας από την θέρμανση χώρων και το ζεστό νερό χρήσης. Όπως παρατηρείται, πάνω από 65% της κατανάλωσης θερμικής ενέργειας προέρχεται από μόνο τρεις βιομηχανικούς τομείς, ήτοι τη βιομηχανία μη μεταλλικών ορυκτών, τη βιομηχανία τροφίμων, ποτών και καπνού και τη βιομηχανία μη σιδηρούχων μετάλλων. Όσον αφορά το θερμοκρασιακό εύρος, ο πίνακας 1 παρουσιάζει πως 62,45% των βιομηχανικών διεργασιών απαιτούν θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 400°C. Τέτοιες βιομηχανίες διεργασίες βρίσκονται κυρίως στις βαριές βιομηχανίες, όπως των μη μεταλλικών ορυκτών, των μη σιδηρούχων μετάλλων και του σιδήρου και χάλυβα. Το ποσοστό του 17,99% εντοπίζεται σε βιομηχανικές διεργασίες που απαιτούν θερμοκρασίες από 100°C έως 400°C, ενώ 19,56% απαιτούν θερμοκρασίες έως 100°C. Οι βιομηχανίες τροφίμων, ποτών και καπνού έχουν το μεγαλύτερο ποσοστό σε θερμοκρασίες μέχρι 400°C και ακολουθούν οι βιομηχανίες χημικών και πετροχημικών, κλωστοϋφαντουργίας και χαρτιού, προϊόντων χαρτιού και εκτυπώσεων.

Πίνακας 1: Κατανάλωση θερμικής ενέργειας διεργασιών / βιομηχανικό τομέα Ελλάδα, 2011

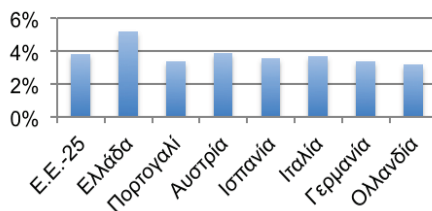
Βιομηχανικός Τομέας (σε GWh θερμικής ενέργειας)	Πάνω από 400°C	Από 100°C έως 400°C	Κάτω από 100°C	Σύνολο
Σιδήρου&Χάλυβα	1.125,65	47,40	11,85	1.184,89
Χημική& πετροχημική	557,32	318,47	261,60	1.137,39
Μησιδηρούχωνμετάλλων	2.655,79	111,82	27,96	2.795,56
Μημεταλλικών ορυκτών	6.475,26	441,49	441,49	7.358,25
Εξοπλισμού μεταφορών	7,22	25,28	46,95	79,46
Μηχανολογικού εξοπλισμού	7,60	26,61	49,41	83,62
Τροφίμων, ποτών& καπνού	0,00	1.062,33	1.298,40	2.360,73
Χαρτοπολτού, χαρτιού&εκτυπώσεων	53,45	163,31	80,17	296,93
Ξύλου και προϊόντωνξύλου	27,19	83,08	40,78	151,05
Κλωστούφαντουργίας & βιομηχανία δέρματος	45,28	113,20	67,92	226,40
Άλλες βιομηχανίες	401,88	879,12	1.230,77	2.511,77
Σύνολο	11.356,64	3.272,11	3.557,31	18.186,05

Το ποσοστό της θερμότητας διεργασιών για θερμοκρασίες κάτω των 100°Cστη Γερμανία το 2009 ήταν 10,56% [11]. Για θερμοκρασίες από 100°Cέως 500°C, το αντίστοιχο ποσοστό ήταν 15,55%, ενώ για θερμοκρασίες πάνω από 500°Cήταν 73,87%, επισημαίνοντας έτσι τις διαφορές του βιομηχανικού τομέα της Γερμανίας και της Ελλάδας. Στην Ευρώπη (ΕΕ-25 πλέον Βουλγαρία, Ρουμανία, Τουρκία, Κροατία, Ισλανδία, Νορβηγία και Ελβετία), τα ποσοστά περιλαμβάνουν 30% για θερμοκρασίες κάτω από 100°C, 27% για θερμοκρασίες 100-400°Cκαι 43% για θερμοκρασίες πάνω από 400°C [19].Το αυξημένο, σε σχέση με την Ευρώπη, ποσοστό της ζήτησης θερμικής ενέργειας σε θερμοκρασίες πάνω από 400°C της Ελλάδαςοφείλεται κυρίως στις βιομηχανίες μη μεταλλικών ορυκτών της χώρας, οι οποίες αποτελούν και τον πρώτο καταναλωτή θερμικής ενέργειας, σε αντίθεση με άλλες Ευρωπαϊκές χώρες όπου βιομηχανίες με ζήτηση θερμότητας σε χαμηλότερες θερμοκρασίες κατέχουν μεγαλύτερο ποσοστό της κατανάλωσης ενέργειας του βιομηχανικού τομέα (π.χ. Αυστρία [12]). Τονίζεται επίσης πως στους υπολογισμούς της παρούσας μελέτης δεν λαμβάνεται υπόψη η ζήτηση θερμικής ενέργειας για θέρμανση χώρων και ζεστό νερό χρήσης από τις βιομηχανίες σε αντίθεση με τις υπόλοιπες μελέτες, το οποίο για παράδειγμα στην Γερμανία προσδιορίζεται σε περίπου σε 12% [10] και αφορά θερμοκρασίες κάτω των 100°C.

3.2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ

Σε αντίθεση με τη συνήθη χρήση του όρου «θεωρητικό δυναμικό», στα πλαίσια της παρούσας εργασίας το θεωρητικό δυναμικό προσδιορίζεται ως η ζήτηση θερμικής ενέργειας των διεργασιών των Ελληνικών βιομηχανιών για θερμοκρασίες έως 400°C.Επίσης, καθώς οι βιομηχανίες μη μεταλλικών ορυκτών και σιδήρου και χάλυβα περιέχουν υψηλό δυναμικό απορριπτόμενης θερμικής ενέργειας(wasteheat), η οποία θα μπορούσε να επαναχρησιμοποιηθεί ως θερμική ενέργεια σε διεργασίες που απαιτούν χαμηλές ή μέσες θερμοκρασίες, οι συγκεκριμένοι τομείς δεν λαμβάνονται υπόψη στους υπολογισμούς του θεωρητικού δυναμικού. Συνεπώς, το θεωρητικό δυναμικό Η.Θ.Σ. στις βιομηχανικές διεργασίες της Ελλάδας για το 2011 εκτιμάται σε 5.887,18GWh/έτος. Το μεγαλύτερο ποσοστό του θεωρητικού δυναμικού κατέχει ο βιομηχανικός τομέας τροφίμων, ποτών και καπνού της χώρας (40,1%), ενώ ακολουθείτομέας των χημικών και πετροχημικών

(9,85%). Σύμφωνα, με τους υπολογισμούς, εκτιμάται πως 85,54% του θεωρητικού δυναμικού για τις ελληνικές βιομηχανικές διεργασίες απαιτείται σε θερμοκρασίες μικρότερες των 200°C. Επισημαίνεται πως η εν λόγω εκτίμηση περιλαμβάνει αβεβαιότητα, η οποία όμως λόγω της μεγάλου ποσοστού που κατέχει ένας βιομηχανικός τομέας (τροφίμων, ποτών και καπνού) δεν θεωρείται σημαντική. Για να υπολογισθεί το τεχνικό δυναμικό της εφαρμογής Η.Θ.Σ. σε Ελληνικές βιομηχανίες θα πρέπει να ληφθούν υπόψη περαιτέρω περιορισμοί τεχνικής φύσης, ιδιαίτερα για την λειτουργία ηλιακών θερμικών συστημάτων στην Ελλάδα. Οπτεχνικοί περιορισμοί περιλαμβάνουν την απαίτηση παραγωγής θερμότητας από ηλεκτρική ενέργεια για λειτουργικούς λόγους σε κάποιες βιομηχανίες, την απουσία διαθέσιμης επιφάνειας (στέγης ή διπλανού γηπέδου) για την εγκατάσταση Η.Θ.Σ., την μη στατική επάρκεια της στέγης για εγκατάσταση Η.Θ.Σ. και την εφαρμογή μέτρων περαιτέρω αξιοποίησης της απορριπτόμενης θερμότητας (wasteheat). Στο [12] γίνεται η παραδοχή πως 60% του θεωρητικού δυναμικού για χαμηλές και μέσες θερμοκρασίες θερμότητας διεργασιών δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τους παραπάνω τεχνικούς λόγους. Παρόλο που η εν λόγω παραδοχή δεν μπορεί να επιβεβαιωθεί, λαμβάνεται υπόψη στην παρούσα εργασία. Όσον αφορά το μέσο ποσοστό της θερμικής ενέργειας που μπορεί ένα ηλιακό θερμικό σύστημα να παρέχει στο θερμικό φορτίο των βιομηχανικών διεργασιών της Ελλάδας, αυτό λαμβάνεται από την εξέταση διαφόρων περιπτώσεων εφαρμογής Η.Θ.Σ. στις Ελληνικές βιομηχανίες. Καθώς, μεγάλο ποσοστό του θεωρητικού δυναμικού προέρχεται από τις βιομηχανίες τροφίμων, ποτών και καπνού, η εξέταση περιπτώσεων του συγκεκριμένου τομέα είναι ιδιαίτερα σημαντική και καθορίζει το επιλεγόμενο ποσοστό. Στο [20], το «ηλιακό κλάσμα» χαρακτηρίζεται ως ιδιαίτερα σημαντικό. Στο [16] αναφέρεται πως ένα λογικό μέσο «ηλιακό κλάσμα» δεν μπορεί να είναι πάνω από 50% για βιομηχανικές διεργασίες. Με βάση τη διαθέσιμη βιβλιογραφία υιοθετείται στην παρούσα μελέτη ένα μέσο «ηλιακό κλάσμα» της τάξης του 40% και αποτελεί εκτίμηση η οποία περιλαμβάνει όλες τις διαθέσιμες τεχνολογίες ηλιακών συλλεκτών. Εφαρμόζοντας τα ανωτέρω ποσοστά, εκτιμάται πως το τεχνικό δυναμικό εφαρμογής Η.Θ.Σ. σε διεργασίες Ελληνικών βιομηχανιών είναι 942 GWh/έτος ή 5,18% της συνολικής ζήτησης θερμικής ενέργειας της Ελληνικής βιομηχανίας.



Σχήμα 4: Ποσοστό τεχν. δυναμικού εφαρμογής Η.Θ.Σ. σε βιομηχανικές διεργασίες ΕΕ

Θα πρέπει να επισημανθεί, πως το τεχνικό δυναμικό εφαρμογής Η.Θ.Σ. βασίζεται απόλυτα στα εκτιμώμενα ποσοστά που αναφέρονται παραπάνω, τα οποία εμπεριέχουν σημαντικό ποσοστό αβεβαιότητας. Χαρακτηριστικό είναι πως αν ληφθεί υπόψη ποσοστό είτε 50% είτε 70% του θεωρητικού δυναμικού λόγω των τεχνικών περιορισμών που αναφέρονται, τότε το τεχνικό δυναμικό εκτιμάται σε 1.117 GWh/έτος ή 706 GWh/έτος, αντίστοιχα. Αυτή η παρέκκλιση δείχνει πως το τεχνικό δυναμικό αποτελεί περισσότερο εκτίμηση παρά ένα ακριβές νούμερο. Το εκτιμώμενο τεχνικό δυναμικό αποτελεί το 1,3% του τεχνικού δυναμικού της Ευρώπης, όπως αυτό υπολογίζεται στο [14]. Παρόλα αυτά το ποσοστό του 5,18% της συνολικής ζήτησης θερμικής ενέργειας της Ελληνικής βιομηχανίας αποτελεί το μεγαλύτερο ποσοστό που αναφέρεται στις υπάρχουσες μελέτες εκτίμησης δυναμικού εφαρμογής Η.Θ.Σ. [10], [11], [12], [14]. Στο σχήμα 4 δίνεται γραφικά εν λόγω ισχυρισμός. Το εκτιμώμενο τεχνικό δυναμικό της Ελλάδας αντιστοιχεί σε 1,47 GW_{th} ή 2,1 εκ. m²ηλιακών θερμικών συλλεκτών, θεωρώντας μια μέση απόδοση 450kWh/m²έτος και κάνοντας χρήση του μέσου συντελεστή 0,7 kW_{th}/m². Όπως παρατηρείται, η αγορά των ηλιακών θερμικών συλλεκτών στον τομέα των

βιομηχανικών διεργασιών είναι ιδιαίτερα σημαντική και αποτελεί περίπου το 50% της εγκατεστημένης ισχύος ηλιακών θερμικών συλλεκτών στην Ελλάδα.

4. ΥΠΟΣΧΟΜΕΝΕΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΕΣ ΚΑΙ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ

Με βάση την εκτιμώμενη ζήτηση θερμικής ενέργειας στις βιομηχανικές διεργασίες οι οποίες απαιτούν θερμοκρασίες κάτω των 400°C είναι αδιαμφισβήτητο πως ο τομέας των τροφίμων, ποτών και καπνού αποτελεί τον περισσότερο υποσχόμενο βιομηχανικό τομέα της Ελλάδας για την εφαρμογή ηλιακών θερμικών συστημάτων. Για αυτό το λόγο στα πλαίσια της παρούσας μελέτης επιλέγεται η περαιτέρω ανάλυση του εν λόγω τομέα για τον εντοπισμό των κατάλληλων βιομηχανικών διεργασιών που μπορούν να εξυπηρετηθούν από ηλιακά θερμικά συστήματα. Χαρακτηριστικά αναφέρεται πως σε όλες τις μελέτες εκτίμησης δυναμικού που αναφέρονται στην παρούσα εργασία, ο βιομηχανικός τομέας των τροφίμων, ποτών και καπνού επισημαίνεται ως κατάλληλος τομέας για την εφαρμογή ηλιακών θερμικών συστημάτων. Σχεδόν το 55% της θερμότητας που απαιτείται στις διεργασίες του εν λόγω τομέα είναι σε θερμοκρασίες κάτω των 100°C, ενώ το υπόλοιπο 45% απαιτείται σε θερμοκρασίες μέχρι 300°C. Υποκλάδοι του βιομηχανικού τομέα τροφίμων, ποτών και καπνού οι οποίοι παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την εφαρμογή ηλιακών θερμικών συστημάτων στην Ελλάδα είναι η βιομηχανία γαλακτοκομικών προϊόντων, τα οиноποία και οι ζυθοποιίες, τα εργαστήρια επεξεργασίας κρέατος και ελαιολάδου κ.α. Σύμφωνα με το πλήθος του εργατικού δυναμικού [21], ο μεγαλύτερος υποκλάδος της βιομηχανίας τροφίμων και ποτών της Ελλάδας είναι η βιομηχανία παραγωγής ειδών αρτοποιίας και αλευρωδών προϊόντων και ακολουθεί η βιομηχανία παραγωγής άλλων ειδών διατροφής, η βιομηχανία γαλακτοκομικών προϊόντων και η βιομηχανία επεξεργασίας-συντήρησης κρέατος και παραγωγής προϊόντων κρέατος. Η μεγάλη ποικιλία των παραγόμενων προϊόντων του εν λόγω βιομηχανικού τομέα ενσωματώνει πολλές διαφορετικές βιομηχανικές διεργασίες με διαφορετικές απαιτήσεις σε θερμότητα. Χαρακτηριστικά, στο [22] σημειώνονται πενήντα έξι διαφορετικές διεργασίες και δώδεκα διαφορετικοί υποκλάδοι της βιομηχανίας τροφίμων στην Ευρώπη.

Ο υποκλάδος της βιομηχανίας γαλακτοκομικών προϊόντων περιλαμβάνει διεργασίες όπως παστερίωση, αποστείρωση, πλύσιμο, ξήρανση, εξάτμιση και άλλες διεργασίες που σχεδόν στο σύνολό τους θεωρούνται κατάλληλες για την κάλυψη των θερμικών τους φορτίων από ηλιακά θερμικά συστήματα. Στον πίνακα 2 δίνονται μερικές ενδεικτικές τιμές κατανάλωσης θερμικής ενέργειας σε διάφορες διεργασίες οι οποίες περιλαμβάνονται στις γαλακτοκομικές βιομηχανίες της Ελλάδας [23]. Στον υποκλάδο της βιομηχανίας παραγωγής ειδών αρτοποιίας και αλευρωδών προϊόντων περιλαμβάνονται διεργασίες όπως ανάμιξη, διαχωρισμός, ψήσιμο και άλλες διεργασίες που απαιτούν θερμοκρασίες κυρίως μέχρι 160°C και μερικές έως 270°C (ψήσιμο). Παρόλο που η τοποποιία αποτελεί σχετικά μικρό τμήμα του βιομηχανικού τομέα τροφίμων και ποτών στην Ελλάδα σύμφωνα με το απασχολούμενο εργατικό δυναμικό [21], συγκεκριμένες βιομηχανίες, όπως οι ζυθοποιίες, παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς οι σχετικές βιομηχανικές διεργασίες παρέχουν τις κατάλληλες συνθήκες για την εφαρμογή Η.Θ.Σ. [24]. Οι διεργασίες στις ζυθοποιίες περιλαμβάνουν ξήρανση, πλύσιμο μπουκαλιών, παστερίωση, ζυθοποίηση και άλλες διεργασίες που χαρακτηρίζονται ως κατάλληλες για τα ηλιακά θερμικά συστήματα. Σήμερα, λειτουργεί σημαντικός αριθμός βιομηχανιών ζυθοποιίας στην Ευρώπη, οι οποίες έχουν ενσωματώσει Η.Θ.Σ. για την κάλυψη μέρους των θερμικών φορτίων των διεργασιών τους [24]. Η ανάλυση των κατάλληλων τομέων της Ελληνικής βιομηχανίας για την εφαρμογή ηλιακών θερμικών συστημάτων για την παραγωγή θερμότητας υποδεικνύει διάφορες βιομηχανικές διεργασίες οι οποίες μπορούν να υποστηριχθούν ως προς την κάλυψη των θερμικών τους αναγκών από Η.Θ.Σ. Το σχήμα 5 συγκεντρώνει τις βιομηχανικές διεργασίες, όπως αυτές εντοπίζονται από την παρούσα μελέτη και επισημαίνονται από αντίστοιχες μελέτες εκτίμησης δυναμικού. Όπως παρατηρείται διαφορετικές διεργασίες κατάλληλες για Η.Θ.Σ. απαντώνται σε διαφορετικούς βιομηχανικούς τομείς.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία γίνεται εκτίμηση της ζήτησης θερμικής ενέργειας από τις βιομηχανικές διεργασίες των βιομηχανικών τομέων της Ελλάδας. Επίσης, η ζήτηση της θερμικής ενέργειας επιμερίζεται σε τρία θερμοκρασιακά εύρη ώστε να αποτυπωθεί η ποιότητα της θερμότητας που απαιτείται από τις Ελληνικές βιομηχανικές διεργασίες. Η ζήτηση θερμικής ενέργειας για θερμοκρασίες μέχρι 400°C κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική για την εκτίμηση του δυναμικού εφαρμογής Η.Θ.Σ. στις βιομηχανικές διεργασίες. Η ανάλυση των επί μέρους βιομηχανικών τομέων κατέδειξε πως 37,55% της ζήτησης θερμότητας απαιτείται σε θερμοκρασίες μέχρι 400°C, ενώ ιδιαίτερα σημαντικό ποσοστό της ζήτησης έως 400°C απαιτείται σε θερμοκρασίες έως 200°C (85,84%). Συνεπώς, τονίζεται πως η στοχοθέτηση για την περαιτέρω ανάπτυξη των Η.Θ.Σ. στις Ελληνικές βιομηχανίες θα πρέπει να περιλαμβάνει την ανάπτυξη τεχνικά και οικονομικά αποδοτικών ηλιοθερμικών συστημάτων για θερμοκρασίες έως 200°C και την ανάπτυξη της βέλτιστης εφαρμογής τέτοιων συστημάτων στις υφιστάμενες βιομηχανικές διεργασίες.

Σύμφωνα με τους υπολογισμούς της παρούσας μελέτης, το θεωρητικό δυναμικό εφαρμογής Η.Θ.Σ. στις Ελληνικές βιομηχανικές διεργασίες εκτιμάται σε 5.887,18GWh/έτος, ενώ το τεχνικό δυναμικό εκτιμάται σε 942 GWh/έτος ή 5,18% της συνολικής ζήτησης θερμικής ενέργειας της Ελληνικής βιομηχανίας. Από την ανάλυση προκύπτει η ανάγκη εξέτασης σημαντικού αριθμού περιπτώσεων εφαρμογής Η.Θ.Σ. σε διαφορετικούς βιομηχανικούς τομείς, έτσι ώστε να υπολογισθεί με περισσότερη ακρίβεια το ποσοστό τεχνικών περιορισμών καθώς επίσης και το «ηλιακό κλάσμα», τα οποία λαμβάνονται υπόψη στην παρούσα εργασία. Αδιαμφισβήτητα, το εκτιμώμενο τεχνικό δυναμικό υποδεικνύει μια σημαντική αναδυόμενη αγορά Η.Θ.Σ., η οποία μπορεί να μεγαλώσει ακόμα περισσότερο με την ανάπτυξη νέων αποδοτικότερων τεχνολογιών για υψηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας. Ο σημαντικότερος βιομηχανικός τομέας της Ελληνικής βιομηχανίας για την εφαρμογή Η.Θ.Σ. εντοπίζεται στον τομέα των τροφίμων, ποτών και καπνού, ο οποίος όμως περιλαμβάνει σημαντικό αριθμό υποκλάδων και σημαντικό αριθμό διαφορετικών βιομηχανικών διεργασιών. Όπως παρατηρείται, ο εν λόγω τομέας παρουσιάζει το σημαντικότερο βραχυπρόθεσμο δυναμικό εφαρμογής Η.Θ.Σ. καθώς απαιτεί θερμοκρασίες μέχρι 200°C για τις οποίες η ηλιακή θερμική ενέργεια θεωρείται ήδη τεχνολογικά ώριμη. Ηενδεδειγμένη και αναλυτική έρευνα εφαρμογής Η.Θ.Σ. σε άλλους υποκλάδους της βιομηχανίας τροφίμων της Ελλάδας, όπως στην επεξεργασία-συντήρηση κρέατος και παραγωγή προϊόντων κρέατος, θα ενισχύσει την εφαρμογή των ηλιακών θερμικών συστημάτων στην Ελληνική βιομηχανία και τις Ελληνικές βιομηχανικές διεργασίες.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] World Nuclear Association, 2014, In: <http://www.world-nuclear.org/>.
- [2] ESTIF, 2014, European Solar Thermal Industry Federation, "Solar Thermal Markets in Europe, Trends and Market Statistics 2013", Brussels, June 2014.
- [3] Eurostat, 2012, In: <http://epp.eurostat.ec.europa.eu>.
- [4] Ε.Π.Σ.Ε., 2011"Ενεργειακό Ισοζύγιο Ελλάδας 2011", Εθνικό Πληροφοριακό Σύστημα για την Ενέργεια, In: <http://195.251.42.2/cgi-bin/nisehist.sh>.
- [5] Ε.Π.Σ.Ε., 2012"Ενεργειακό Ισοζύγιο Ελλάδας 2012", Εθνικό Πληροφοριακό Σύστημα για την Ενέργεια, In: <http://195.251.42.2/cgi-bin/nisehist.sh>.
- [6] ETP-RHC, 2011, "2020-2030-2050, Common Vision for the Renewable Heating & Cooling sector in Europe", European Technology Platform on Renewable Heating and Cooling, Luxembourg, 2011.
- [7] IEA, 2014, "Heating without Global Warming, Market developments and Policy Considerations for Renewable Heat", International Energy Agency, 2014.

- [8] IEA, 2013, "2013 Highlights", Solar Heating and Cooling Programme, Task 49 – Solar Heat Integration in Industrial Processes, International Energy Agency, 2014.
- [9] SHIP Plants, 2014, In:<http://www.ship-plants.info/>
- [10] Lauterbach C., Schmitt B., Jordan U., Vajen K., 2012, "The potential of solar heat for industrial processes in Germany", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, pp. 5121-5130.
- [11] POSHIP, 2001, "The Potential of Solar Heat for Industrial Processes", final report.
- [12] Begander U., Schnitzer H., Brunner C., Taferner K., 2004, "PROMISE – Production with solar energy. Study on the potential of solar thermal energy systems in industry depending on the production processes", Joanneum Research – Institute of Sustainable Techniques and Systems, Austria.
- [13] Mcleod V., Annas J., Stein W., Hinkley J., 2005, "Application of solar process heat to the commercial & industrial sectors", Sydney, Australia, 2005.
- [14] Vannoni C., Battisti R., Drigo S., 2008, "Potential for Solar Heat in Industrial Processes", Solar Heating and Cooling Programme, Task 33/IV, Rome, Italy, 2008.
- [15] Kalogirou S., 2003, "The potential of solar industrial process heat applications", *Applied Energy*, vol. 76, pp. 337-361.
- [16] Aidonis A., Drosou V., Mueller T., Staudacher L., Fernandez-Liebrez F., Oikonomou A., et al., 2002, "PRCESOL II – Solar thermal plants in industrial processes: Desing and Maintenance Guidelines", Pikermi, Greece, 2002.
- [17] Aidonis A., Karagiorgas M., 2003, "Large Scale Solar Heating Plants Potential in Greece", Centre for Renewable Energy Sources, Greece, 2003.
- [18] DOE, 2010, "Manufacturing Energy and Carbon Footprints", Department of Energy, U.S., In: <http://energy.gov/eere/amo/manufacturing-energy-and-carbon-footprints-2010-mecs>
- [19] Werner S., 2006, "ECOHEATCOOL – Work Package 1. The European Heat Market", final report IEE Altener Project, Brussels, Belgium, 2006.
- [20] Karagiorgas M., Botzios A., Tsoutsos T., 2001, "Industrial solar thermal application in Greece, Economic evaluation, quality requirements and case studies", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 5, pp. 157-173.
- [21] IOBE, 2013, "Βιομηχανία Τροφίμων και Ποτών, facts&figures", Ίδρυμα Οικονομικών & Βιομηχανικών Ερευνών, Μάρτιος 2014.
- [22] European Commission JRC-IPTS IPPC, 2006, "Reference Document on Best Available Techniques in the Food Drink and Milk Industries", ed. Office for official publications of the European Communities, Luxemburg.
- [23] Καραγιώργας Μ., 2000, "Τεχνικο-Οικονομική Μελέτη Εγκατάστασης Ηλιακών Συστημάτων στις Βιομηχανίες Προϊόντων Γάλακτος", Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας.
- [24] Mauthner F., Brunner C., Hubmann M., Fink C., 2014, "Solar Process Heat in Breweries", AEE – Institute for Sustainable Technologies, Austria.

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΦΥΛΛΩΝ ΚΑΛΥΨΗΣ ΜΕ ΥΨΗΛΗ ΔΙΑΧΥΣΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΤΟ ΜΙΚΡΟΚΛΙΜΑ ΚΑΙ ΤΗΝ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΟ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟ

Κ. Κίττας¹, Ο. Μερκούρης¹, Θ. Μπαρτζάνας² Ν. Κατσούλας¹

¹Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, οδός Φυτόκου, 38446, Βόλος, e-mail: ckittas@uth.gr

²Ινστιτούτο Έρευνας & Τεχνολογίας Θεσσαλίας, Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης, Δημητριάδος 95 & Π. Μελά, 38333, Βόλος

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Είναι γεγονός ότι για παραγωγή προϊόντων ποιότητας καθόλη τη διάρκεια του έτους τα θερμοκήπια στην Ελλάδα απαιτούν, στις περισσότερες περιοχές, θέρμανση το χειμώνα και δροσισμό το καλοκαίρι. Παράλληλα, η ένταση της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας πρέπει να βρίσκεται στα βέλτιστα επίπεδα καθόλη τη διάρκεια του έτους προκειμένου να εξασφαλίζεται η μέγιστη παραγωγή. Τα υλικά κάλυψης των θερμοκηπίων επηρεάζουν και τα δύο παραπάνω θέματα καθώς επηρεάζουν τόσο τις ανάγκες θέρμανσης και δροσισμού του θερμοκηπίου όσο και την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία. Ως αποτέλεσμα των ανωτέρω υπάρχει μια συνεχής προσπάθεια για την ανάπτυξη και δοκιμή νέων υλικών κάλυψης των θερμοκηπίων. Στην εργασία αυτή διερευνάται πειραματικά η χρήση διαφορετικών υλικών κάλυψης τόσο στην ποιότητα και ποσότητα της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας όσο και στην κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση των θερμοκηπίων. Για το σκοπό αυτό έγιναν μετρήσεις σε (α) ένα θερμοκήπιο καλυμμένο με φύλλο κάλυψης θερμοκηπίων με μεγάλη διαπερατότητα στην άμεση ηλιακή ακτινοβολία (C-PE) και (β) σε ένα θερμοκήπιο καλυμμένο με φύλλο κάλυψης θερμοκηπίων με μικρή διαπερατότητα στην άμεση ηλιακή ακτινοβολία (D-PE). Οι μετρήσεις αφορούσαν το μικροκλίμα του θερμοκηπίου (θερμοκρασία και σχετική υγρασία αέρα, ηλιακή, καθαρή, άμεση και διάχυτη ακτινοβολία), την κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση και την επίδραση των παραπάνω υλικών στην παραγωγή καλλιέργειας τομάτας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι στο C-PE θερμοκήπιο, μόνο 20% περίπου της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας ήταν άμεση ενώ η αντίστοιχη τιμή για το D-PE ήταν 75%. Καθώς το σύστημα θέρμανσης λειτουργούσε προκειμένου να επιτυγχάνονται παρόμοια επίπεδα θερμοκρασίας αέρα στα τρία θερμοκήπια, βρέθηκε ότι η κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση ήταν 20% μεγαλύτερη στο C-PE από ότι στο D-PE θερμοκήπιο. Όσο αφορά την επίδραση στην παραγωγή, βρέθηκε ότι κατά την περίοδο άνοιξης –καλοκαιριού, η παραγωγή ήταν μειωμένη στο C-PE θερμοκήπιο, λόγω των εγκουμάτων που παρουσιάζονταν στους καρπούς καθώς δεν έγινε σκίαση σε κανένα από τα δύο θερμοκήπια, ενώ κατά την περίοδο φθινοπώρου – χειμώνα η παραγωγή ήταν μεγαλύτερη στο C-PE.

Λέξεις Κλειδιά: άμεση ακτινοβολία, σκίαση, θέρμανση, παραγωγή

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Είναι γνωστό ότι η διάχυτη ακτινοβολία διεισδύει βαθύτερα στο επίπεδο της καλλιέργειας σε σύγκριση με την άμεση ακτινοβολία, αυξάνοντας έτσι το ρυθμό φωτοσύνθεσης των καλλιεργειών. Υπάρχουν επίσης ενδείξεις ότι τα φυτά έχουν αναπτύξει μηχανισμούς για την αποτελεσματικότερη χρήση της διάχυτης ακτινοβολίας καθώς συνήθως η έντασή της είναι μικρότερη σε σχέση με την άμεση ακτινοβολία [1-2]. Λαχανοκομικές καλλιέργειες όπως η τομάτα και το αγγούρι έχουν υψηλό δείκτη φυλλικής επιφάνειας και έτσι τα ανώτερα στρώματα της καλλιέργειας απορροφούν συνήθως μια μεγάλη ποσότητα της ακτινοβολίας, ενώ τα μεσαία και χαμηλότερα φύλλα λαμβάνουν λιγότερο φως κάτι που έχει ως αποτέλεσμα μικρότερο ρυθμό φωτοσύνθεσης. Καθώς τα φύλλα στα ανώτερα στρώματα, λόγω της μεγάλης έντασης της ακτινοβολίας, μπορεί να βρίσκονται σε φωτοκορεσμό, θα μπορούσε να υποστηριχθεί ότι μια πιο ομοιόμορφη κατανομή του φωτός θα οδηγήσει σε υψηλότερη συνολική φωτοσύνθεση. Έτσι, η καλλιέργεια θα επωφεληθεί αν η ακτινοβολία ήταν πιο ομοιόμορφα κατανομημένη καθ' ύψος στα διάφορα επίπεδα της καλλιέργειας [3-5]. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με αύξηση του ποσοστού της διάχυτης ακτινοβολίας. Η ακτινοβολία μπορεί να γίνει διάχυτη με τη βοήθεια των υλικών κάλυψης των θερμοκηπίων [6]. Τα υλικά αυτά περιέχουν χρωστικές ουσίες, μακρο - ή μικροδομές, οι οποίες είναι σε θέση να μετατρέψουν όλη την εισερχόμενη ακτινοβολία σε διάχυτη. Τα αποτελεσματικότερα υλικά κάλυψης μετατρέπουν την ακτινοβολία από άμεση σε διάχυτη χωρίς ταυτόχρονη μείωση της διαπερατότητάς τους. Ωστόσο, σε αρκετές περιπτώσεις η αύξηση της διάχυτης ακτινοβολίας συνοδεύεται και με μείωση της συνολικής διαπερατότητας του υλικού κάλυψης.

Οι Dueck et al. [7] μελέτησαν την επίδραση γυαλιού με διαφορετικές ιδιότητες διάχυσης (hazefactor 45%, 62% και 71%) και συνολική διαπερατότητα ίση ή μεγαλύτερη εκείνης του τυποποιημένου γυαλιού. Διαπίστωσαν ότι σε σύγκριση με το γυαλί χωρίς διάχυση, η φωτοσύνθεση της καλλιέργειας υπό συνθήκες διάχυσης ήταν μεγαλύτερη στα χαμηλότερα στρώματα της καλλιέργειας, μόνο κατά τη διάρκεια του χειμώνα.

Από την άλλη πλευρά, στην περίπτωση των Μεσογειακών θερμοκηπίων, οι καλλιέργειες κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού σκιάζονται [8], καθώς η υψηλή ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας σε συνδυασμό με το υψηλό έλλειμμα κορεσμού του αέρα σε υδατμούς συμβάλει στην δημιουργία συνθηκών καταπόνησης της καλλιέργειας. Έτσι, στις συνθήκες αυτές η σκίαση συντελεί στην αύξηση του ποσοστού της διάχυτης ακτινοβολίας που εισέρχεται στο θερμοκήπιο μειώνοντας έτσι την ανάγκη για χρήση υλικών κάλυψης υψηλής διάχυσης.

Στην εργασία αυτή μελετάται η επίδραση υλικών κάλυψης θερμοκηπίων με υψηλή και χαμηλή διάχυση ακτινοβολίας, τόσο στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου όσο και στην ανάπτυξη και παραγωγή καλλιέργειας τομάτας σε μεσογειακές καλοκαιρινές συνθήκες στην Κεντρική Ελλάδα.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. Το θερμοκήπιο και η καλλιέργεια

Τα πειράματα έγιναν κατά την διάρκεια της περιόδου Φεβρουάριος - Ιούλιος 2013 και Σεπτέμβριος 2013-Ιανουάριος 2014, στο Αγρόκτημα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στο Βελεστίνο, σε τρία όμοια τροποποιημένα τοξωτά θερμοκήπια έκτασης 160 m² το καθένα. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των θερμοκηπίων ήταν: μήκος 20 m, πλάτος 8 m, ύψος ορθοστάτη 2.4 m, ύψος κορφιά 4.1 m. Το έδαφος των θερμοκηπίων ήταν πλήρως αναμμένο με αδιαφανές, διπλής όψεως ασπρόμαυρο πλαστικό. Ένα θερμοκήπιο χρησιμοποιήθηκε ως μάρτυρας και καλύφθηκε με φύλλο πολυαιθυλενίου με χαμηλή διάχυση (C-PE) ενώ το δεύτερο καλύφθηκε με φύλλο PE υψηλή διάχυση της ακτινοβολίας (D-PE). Το πάχος των φύλλων ήταν 0.18 mm της βιομηχανίας «Πλαστικά Κρήτης ABEE».

Η θέρμανση των θερμοκηπίων γινόταν με αερόθερμα και επιδαπέδιους σωλήνες θέρμανσης, με τη θερμοκρασία του αέρα να διατηρείται στους 15°C κατ'ά τη διάρκεια της νύχτας και τους 20°C κατά τη διάρκεια της ημέρας. Ο αερισμός των θερμοκηπίων γινόταν με τη βοήθεια παραθύρων τοποθετημένων στα πλάγια και την οροφή του θερμοκηπίου τα οποία άνοιγαν αυτόματα όταν η θερμοκρασία του αέρα ξεπερνούσε τους 23°C.

Στο θερμοκήπιο εγκαταστάθηκε τον Φεβρουάριο και τον Σεπτέμβριο του 2013, υδροπονική καλλιέργεια τομάτας σε υπόστρωμα πετροβάμβακα. Η καλλιέργεια είχε εγκατασταθεί σε τέσσερις διπλές σειρές με 6 αποστάσεις φύτευσης 0.33 m επί της γραμμής και 0.75 m μεταξύ των γραμμών της διπλής σειράς, με πυκνότητα 2.1 φυτά/m². Η άρδευση και λίπανση της καλλιέργειας γινόταν αυτόματα με σύστημα ελεγχόμενο από ηλεκτρονικό υπολογιστή. Το κλάδεμα και η διαμόρφωση της καλλιέργειας γινόταν σύμφωνα με την τεχνική που ακολουθείται από τους παραγωγούς.

2.2. Οι μετρήσεις

Σε σύστημα συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων κάθε 10 λεπτά (μέτρηση κάθε 30 δευτερόλεπτα) καταγραφόταν:

- έξω από το θερμοκήπιο: η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία του αέρα και η ολική ηλιακή ακτινοβολία.
- μέσα στα θερμοκήπια: η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία του αέρα, η ολική ηλιακή ακτινοβολία (άμεση και διάχυτη), η θερμοκρασία του καλύμματος του θερμοκηπίου (thermistors), η διαπνοή των φυτών (διάταξη λυσιμέτρου) και η ενέργεια που απέδιδε το σύστημα θέρμανσης.

Παράλληλα, έγιναν μετρήσεις της φασματικής διαπερατότητας των υλικών κάλυψης στο θερμοκήπιο χρησιμοποιώντας το φορητό φασματοφωτόμετρο (LI-COR LI-1800). Οι μετρήσεις γίνονταν κάτω από καθαρό ουρανό κατά το ηλιακό μεσημέρι.

Επιπλέον, έγινε μια σειρά από μη-καταστρεπτική μετρήσεις σε 8 τυχαία επιλεγμένα φυτά ανά θερμοκήπιο, 8 φορές κατά την πειραματική περίοδο όπου καταγραφόταν το ύψος των φυτών και η φυλλική τους επιφάνεια. Επιπλέον, καταγραφόταν ο αριθμός, το βάρος και το μέγεθος των καρπών που συγκομίζονταν από κάθε θερμοκήπιο.

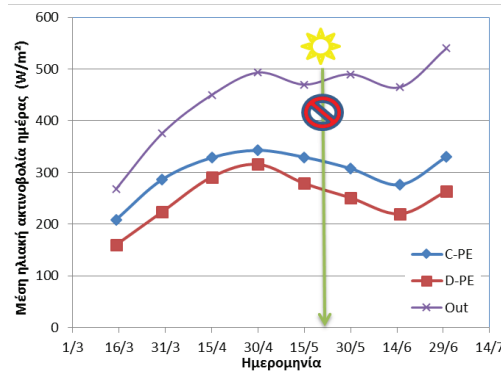
Τέλος, έγιναν μετρήσεις του ρυθμού διαπνοής και φωτοσύνθεσης της καλλιέργειας με τη βοήθεια του συστήματος LCpro+ της ADC σε διάφορα επίπεδα καθ' ύψος μέσα στην καλλιέργεια.

Για τη στατιστική ανάλυση των δεδομένων, χρησιμοποιήθηκε το στατιστικό πακέτο SPSS (SPSS 16.0 για Windows) και τα δεδομένα αναλύθηκαν με τη χρήση του εργαλείου repeatedmeasures της ANOVA ($p \leq 0,05$).

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

3.1. Διαπερατότητα θερμοκηπίων

Ο μέσος όρος της ηλιακής ακτινοβολίας που μετρήθηκε εκτός και εντός των δύο θερμοκηπίων παρουσιάζεται στο Σχ. 1 για κάθε δεκαπενθήμερο. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι μετά την 20^η Μαΐου, έγινε σκίαση των θερμοκηπίων με τη βοήθεια διχτύων που τοποθετήθηκαν στην εξωτερική πλευρά του καλύμματος των θερμοκηπίων. Η μέση τιμή του συντελεστή διαπερατότητας των θερμοκηπίων, η οποία υπολογίστηκε από το λόγο της εισερχόμενης προς την προστίπτουσα ακτινοβολία στο θερμοκήπιο, πριν την εφαρμογή σκίασης βρέθηκε να είναι 73% και 61% για το C-PE και D -PE θερμοκήπια, αντίστοιχα, ενώ ήταν 61% και 49% για το C-PE και D -PE, αντίστοιχα, μετά την εφαρμογή σκίασης.



Σχήμα 1: Εξέλιξη της μέσης ημερήσιας τιμής της διαπερατότητας των θερμοκηπίων κατά τη διάρκεια της εαρινής καλλιεργητικής περιόδου. Η κατακόρυφη γραμμή υποδεικνύει την περίοδο έναρξης εφαρμογής της σκίασης.

Οι μετρήσεις της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας οι οποίες έγιναν με τη βοήθεια του δακτυλίου σκίασης επέτρεψαν να εκτιμηθεί το ποσοστό της άμεσης και διάχυτης εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας σε κάθε θερμοκήπιο. Οι μετρήσεις που έγιναν κατά την περίοδο χωρίς σκίαση στα θερμοκήπια έδειξαν ότι η διάχυτη ακτινοβολία ήταντο 36% και 72% της ολικής ακτινοβολίας για τα θερμοκήπια C-PE και D -PE, αντίστοιχα.

3.2. Ποιότητα εισερχόμενης ακτινοβολίας

Οι υπολογισμένες τιμές των διαφόρων παραμέτρων που υπολογίστηκαν με τη βοήθεια των μετρήσεων που λαμβάνονται χρησιμοποιώντας το φασματοφωτόμετρο LI-1800 παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Η διαπερατότητα στη φωτοσυνθετικά ενεργό ακτινοβολία (PAR) του D -PE ήταν περίπου 25% λιγότερο από αυτή στο C-PE. Παρόμοια μείωση παρατηρήθηκε και στα άλλα τμήματα του φάσματος εκτός από το μπλε όπου η μείωση ήταν 29% στο D -PE, σε σύγκριση με το C-PE θερμοκήπιο.

3.3. Θερμοκρασία και έλλειμμα κορεσμού του αέρα

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 1, το D -PE θερμοκήπιο είχε περίπου 24% μικρότερη διαπερατότητα στην συνολική ηλιακή ακτινοβολία, και επομένως, δεδομένου ότι λιγότερη ενέργεια εισέρχονταν στο θερμοκήπιο, θα πρέπει να αναμένεται μικρότερη θερμοκρασία αέρα στο χώρο του θερμοκηπίου. Πράγματι, η ημερήσια θερμοκρασία αέρα του θερμοκηπίου D -PE ήταν ελαφρώς χαμηλότερη σε σύγκριση με το C-PE θερμοκήπιο (Σχήμα 2α), ειδικά πριν από την εφαρμογή της σκίασης. Μια παρόμοια μείωση παρατηρήθηκε επίσης στο έλλειμμα κορεσμού του αέρα σε υδραμούς κατά τη διάρκεια της περιόδου της ημέρας στο θερμοκήπιο D -PE σε σύγκριση με το θερμοκήπιο C-PE (Σχήμα 2β). Κατά τη διάρκεια της νύχτας δεν βρέθηκαν σημαντικές διαφορές στη θερμοκρασίας του αέρα στα δύο θερμοκήπια.

Η θερμοκρασία των φύλλων της καλλιέργειας την ημέρα βρέθηκε κατά 0.5-1°C χαμηλότερη στο D-PE σε σχέση με το C-PE θερμοκήπιο, κυρίως μετά το τέλος Μαρτίου.

Από τις μετρήσεις κατανάλωσης ενέργειας που έγιναν βρέθηκε ότι το D-PE θερμοκήπιο είχε 11.6% μικρότερη κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με το C-PE θερμοκήπιο.

Πίνακας 1: Υπολογισμένες τιμές συντελεστών διαπερατότητας των θερμοκηπίων στα διάφορα τμήματα του φάσματος της ακτινοβολίας.

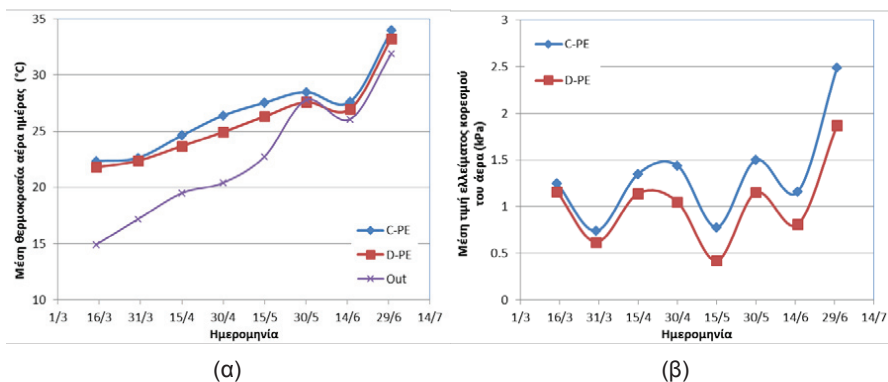
Συντελεστής	C-PE	D-PE
τ PAR	0.72	0.54
τ B	0.69	0.49
τ NIR	0.82	0.62
τ T	0.74	0.56
B:R	0.91	0.84
B:FR	0.86	0.80
PAR:NIR	0.93	0.47

τ: διαπερατότητα σε διάφορα τμήματα του φάσματος της ακτινοβολίας, B= 400 nm- 500 nm, R: 600 nm- 700 nm, FR= 700 nm- 800 nm, PAR= φωτοσυνθετικά ενεργός ακτινοβολία 400 nm- 700 nm, T= ολική ακτινοβολία 400 nm- 1100 nm, NIR= υπέρυθη ακτινοβολία 700 nm- 1100 nm.

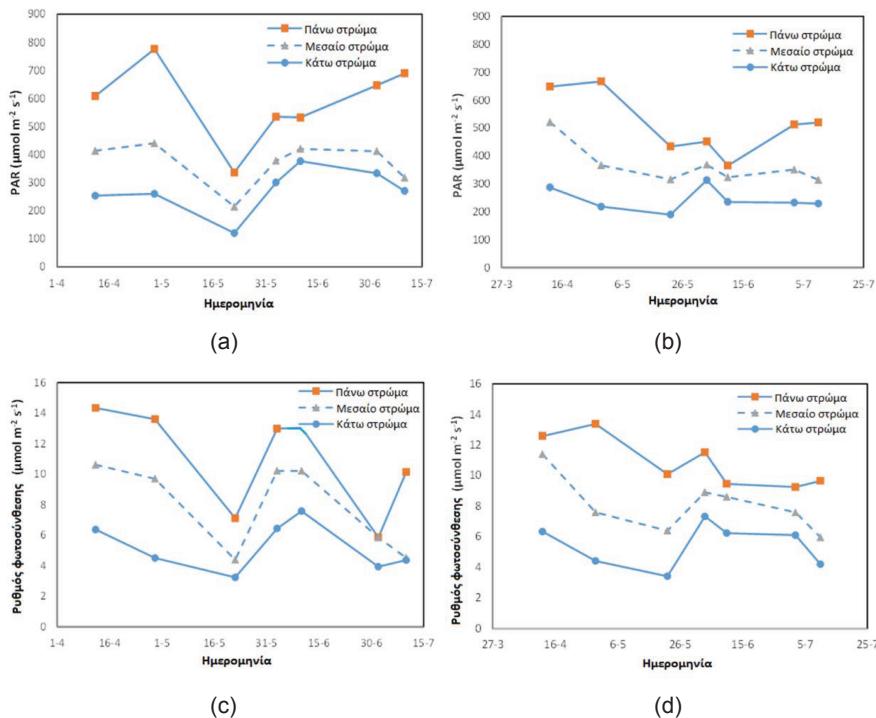
3.4. Επίδραση της διάχυτης ακτινοβολίας στην φωτοσύνθεση και την παραγωγή

Η μέση τιμή της PAR η οποία μετρήθηκε κατά τη διάρκεια των μετρήσεων του ρυθμού φωτοσύνθεσης σε τρία επίπεδα καθ' ύψος της καλλιέργειας, απεικονίζεται στα Σχήματα 3 (α) και (β) για 7 ημέρες, για τα θερμοκήπια C-PE και D -PE, αντίστοιχα. Η μέση τιμή της PAR στα C-PE και D -PE θερμοκήπια ήταν 274 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ και 244 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ για το χαμηλότερο επίπεδο της καλλιέργειας (επίπεδο 3), 371 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ και 366 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ για το μεσαίο στρώμα της καλλιέργειας (επίπεδο 2) και 589 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ και 514 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ για το ανώτερο στρώμα (επίπεδο 1), αντίστοιχα. Φαίνεται ότι οι τιμές της PAR που μετρήθηκαν στο D-PE θερμοκήπιο, στα επίπεδα 1, 2 και 3 ήταν 11%, 1% και 13% χαμηλότερες από πού αυτές που μετρήθηκαν στα αντίστοιχα επίπεδα στο C-PE θερμοκήπιο.

Η μέση τιμή του ρυθμού φωτοσύνθεσης στα τρία επίπεδα της καλλιέργειας, όπως μετρήθηκε κατά τη διάρκεια 7 ημερών της εαρινής περιόδου, απεικονίζονται στο Σχήμα 3 (γ) και (δ), για τα θερμοκήπια C-PE και D -PE, αντίστοιχα. Η μέση τιμή του ρυθμού φωτοσύνθεσης της καλλιέργειας στο C-PE και D -PE θερμοκήπια ήταν 5.2 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ και 5.4 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ για το χαμηλότερο στρώμα της καλλιέργειας (επίπεδο 3), 7.9 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ και 8.1 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ για το μεσαίο στρώμα της καλλιέργειας (επίπεδο 2) και 11 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ και 10.9 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ για την κορυφή της καλλιέργειας (επίπεδο 1), αντίστοιχα. Έτσι, παρά το γεγονός ότι τα επίπεδα της PAR ήταν μικρότερα στο D-PE θερμοκήπιο, ο ρυθμός φωτοσύνθεσης που μετρήθηκε στο θερμοκήπιο αυτό ήταν μεγαλύτερος κατά 3.5% στα επίπεδα 1 και 2 από ότι στο C-PE θερμοκήπιο ενώ δεν βρέθηκαν σημαντικές διαφορές στο χαμηλότερο επίπεδο της καλλιέργειας.



Σχήμα 2: Εξέλιξη των τιμών της μέσης ημερήσιας (α) θερμοκρασίας του αέρα και (β) ελλείμματος κορεσμού του αέρα στα δύο θερμοκήπια κατά τη διάρκεια της εαρινής καλλιερητικής περιόδου.



Σχήμα 3: Φωτοσυνθετικά ενεργός ακτινοβολία (PAR) στο (α) C-PE και (β) D-PE θερμοκήπιο, όπως μετρήθηκε σε 3 επίπεδα της καλλιέργειας καθ' ύψος και ρυθμός φωτοσύνθεσης αντίστοιχα στα (γ) C-PE και (δ) D-PE θερμοκήπια.

Η αποτελεσματικότητα χρήσης ακτινοβολίας (LUE, mol CO₂ που απορροφούνται ανά mole προσπίπτουσας PAR) ήταν χαμηλότερη στο ανώτερο στρώμα της C-PE καλλιέργειας σε

σύγκριση με τα άλλα δύο στρώματα, με μια μέση τιμή 0,02 για τα τρία στρώματα της καλλιέργειας. Η LUE που παρατηρήθηκαν στην καλλιέργεια στο D-PE θερμοκήπιο ήταν ίδια σε όλα τα επίπεδα της καλλιέργειας με μέση τιμή το 0.022.

Η αποτελεσματικότητα χρήσης νερού στα τρία στρώματα της καλλιέργειας (WUE_i = ρυθμός φωτοσύνθεσης προς στοματική αγωγιμότητας, $\mu\text{mol mol}^{-1}$) ήταν 35 και 43 για την καλλιέργεια στο C-PE και D-PE, θερμοκήπιο αντίστοιχα.

Ωστόσο, η απόδοση σε εμπορεύσιμη παραγωγή ήταν σχεδόν διπλάσια στο θερμοκήπιο D-PE από ότι στο θερμοκήπιο C-PE, λόγω εμφάνισης υψηλών ποσοστών καρπών με ξηρή σήψη κορυφής στην περίπτωση του C-PE θερμοκηπίου (Εικ. 1). Αυτό αποδόθηκε στα υψηλά επίπεδα της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που παρατηρήθηκε στο θερμοκήπιο C-PE πριν σκίαση.

Κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου δεν εμφανίστηκαν σημαντικές διαφορές τόσο στο μικροκλίμα των θερμοκηπίων όσο και στην παραγωγή της καλλιέργειας.



Εικόνα 1: Ξηρή σήψη κορυφής σε καρπούς του C-PE θερμοκηπίου.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το υλικό κάλυψης με υψηλή διάχυση στην ηλιακή ακτινοβολία μείωσε την συνολική διαπερατότητα του θερμοκηπίου στην ηλιακή ακτινοβολία κατά 20% περίπου σε σχέση με το μάρτυρα. Ωστόσο, είχε ως αποτέλεσμα μια πιο ομοιογενή κατανομή του φωτός καθ' ύψος της καλλιέργειας. Ο ρυθμός φωτοσύνθεσης που μετρήθηκε σε τρία διαφορετικά ύψη της καλλιέργειας (κάτω μέρος, μεσαίο, κορυφή) βρέθηκε να έχει παρόμοιες τιμές στα τρία επίπεδα για την περίπτωση της καλλιέργειας στο θερμοκήπιο με το φύλλο διάχυσης ενώ κάτω από το μάρτυρα η καλλιέργεια είχε υψηλό ρυθμό φωτοσύνθεσης στην κορυφή και χαμηλότερο στα κάτω φύλλα. Η διαφορετική κατανομή του φωτός στα τρία επίπεδα της καλλιέργειας και η ένταση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας επηρέασε την ποιότητα των καρπών που συγκομίσθηκαν, με τους καρπούς στα υψηλότερα στρώματα της καλλιέργειας στο θερμοκήπιο μάρτυρα να εμφανίζουν ηλιακά εγκαύματα και ξηρή σήψη κορυφής, κάτι που είχε ως αποτέλεσμα την μικρότερη εμπορεύσιμη παραγωγή στο θερμοκήπιο μάρτυρα κατά την εαρινή περίοδο.

Ευχαριστίες

Η ανωτέρω έρευνα χρηματοδοτήθηκε στο πλαίσιο της Δράσης Εθνικής Εμβέλειας «ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑ 2011», Συμπράξεις Παραγωγικών και Ερευνητικών Φορέων σε Εστιασμένους Ερευνητικούς και Τεχνολογικούς Τομείς και του έργου: «GreenFilm – Ανάπτυξη καινοτόμων πλαστικών υλικών κάλυψης θερμοκηπίων ενισχυμένης ανθεκτικότητας και υψηλής εφαρμοσιμότητας» με κωδικό 11ΣΥΝ-3-1426.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] DeLucia, E.H., Nelson, K., Vogelmann, T.C. and Smith, W.K. 1996. Contribution of intercellular reflectance to photosynthesis in shade leaves. *Plant, Cell and Environment* 19: 159-170.
- [2] Vogelmann, T.C., Bornman, J.F. and Yates, D.J. 1996. *Physiologia Plantarum* 98, 43-56.
- [3] Brodersen, C.R., Vogelmann, T.C., Williams, W.E. and Gorton, H.L. 2008. New paradigm in leaf - level photosynthesis: direct and diffuse lights are not equal. *Plant, Cell and Environment* 31:159-164.
- [4] Markvart, J., Rosenqvist, E., Aaslyng, J.M. and Ottosen, C.O. 2010. How is canopy photosynthesis and growth of *Chrysanthemums* affected by diffuse and direct light? *Eur. J. Hort. Sci.* 75:253-258.
- [5] Elings, A., Dueck, T., Meinen, E., and Kempkes, F., 2012. Analysis of the effects of diffuse light on photosynthesis and crop production. *Acta Hort.* 957:45-52.
- [6] Hemming, S., van der Braak, N., Dueck, T., Elings, A. and Marissen, N. 2005. Filtering natural light by the greenhouse covering – More production and better plant quality by diffuse light? *Acta Hort.* 711: 105-110.
- [7] Dueck, T., Janse, J., Tao Li, Kempkes, F. and Eveleens, B. 2012. Influence of diffuse glass on the growth and production of tomato. *Acta Hort.* 956:75-82.
- [8] Baille, A., Kittas, C., Katsoulas, N., 2001. Influence of whitening on greenhouse microclimate and crop energy partitioning. *Agricultural and Forest Meteorology*, 107(4): 293-306.