

**Ηλιακά - Θερμικά**

---



## ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ, ΕΞΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΝΟΣ ΚΛΙΜΑΚΟΕΙΔΟΥΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ (CASCADE) ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ-ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Ευάγγελος Μπέλλος<sup>1\*</sup>, Χρήστος Τζιβανίδης<sup>1</sup>, Γεώργιος Τσιφής<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Τομέας Θερμότητας, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ζωγράφου - Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 15780, Αθήνα  
e-mail: bellose@central.ntua.gr

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι ψυκτικές εγκαταστάσεις καταναλώνουν τεράστια ποσά ενέργειας παγκοσμίως τα οποία επιβαρύνουν το περιβάλλον αλλά και οδηγούν σε υψηλά κόστη λειτουργίας. Ο υβριδισμός των συστημάτων ψύξης με ανανεώσιμες και εναλλακτικές πηγές ενέργειας είναι κάτι που μπορεί να οδηγήσει σε ενεργειακά αλλά και οικονομικά βιώσιμα συστήματα. Σε αυτή την εργασία, ένα υβριδικό κλιμακωτό σύστημα ψύξης (cascade) αναλύεται με ενεργειακά, εξεργειακά και οικονομικά κριτήρια. Αυτό το σύστημα αποτελείται από δύο ψυκτικές βαθμίδες. Η κάτω βαθμίδα είναι μια μονάδα ψύξης (κατάψυξης ή συντήρησης) με μηχανική συμπίεση, ενώ η πάνω βαθμίδα είναι μια ψυκτική μονάδα απορρόφησης η οποία λειτουργεί με LiBr-H<sub>2</sub>O ως εργαζόμενο ζεύγος. Η μονάδα απορρόφησης τροφοδοτείται με θερμική ενέργεια από ηλιακούς συλλέκτες. Συλλέκτες με σωλήνες κενού συνολικής επιφάνειας 300 m<sup>2</sup> επιλέχθηκαν για επίτευξη υψηλής απόδοσης και συζεύχθηκαν με ένα δοχείο αποθήκευσης θερμότητας όγκου 5 m<sup>3</sup>. Η ανάλυση πραγματοποιείται με το λογισμικό EES (Engineering Equation Solver) σε χρονικά μεταβαλλόμενες συνθήκες.

Στο πρώτο κομμάτι των αποτελεσμάτων, το σύστημα βελτιστοποιείται και επιλέγεται η βέλτιστη θερμοκρασία αναγεννητή για κάθε θερμοκρασία απόρριψης θερμότητας προς το περιβάλλον. Στη συνέχεια, οι ημερήσιες επιδόσεις του συστήματος παρουσιάζονται για μια τυπική μέρα με αρκετή ηλιοφάνεια. Για θερμοκρασία απόρριψης θερμότητας προς το περιβάλλον ίση με 40°C, η βέλτιστη θερμοκρασία αναγεννητή βρέθηκε ίση με 93°C. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι το σύστημα αναλύεται παραμετρικά με βάση διαφορετικούς συνδυασμούς θερμοκρασίας παραγωγής ψύξης και θερμοκρασίας απόρριψης θερμότητας προς το περιβάλλον.

Το επόμενο βήμα είναι η ετήσια αξιολόγηση του εξεταζόμενου συστήματος. Για κάθε περίπτωση λειτουργίας, εξετάστηκαν 12 μέρες, μία για κάθε μήνα του έτους. Αποδείχθηκε ότι μεγαλύτερα ποσά ψύξης παράγονται για μεγαλύτερες θερμοκρασίες ψύξης και μικρότερες θερμοκρασίες απόρριψης θερμότητας προς το περιβάλλον. Η εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας κυμαίνεται από 30% έως 80% και είναι μεγαλύτερη για υψηλότερες θερμοκρασίες παραγωγής ψύξης και απόρριψης θερμότητας προς το περιβάλλον. Για παράδειγμα, όταν το σύστημα παράγει ψύξη στους -20°C και αποβάλλει θερμότητα στους 40°C, η ετήσια παραγόμενη ψυκτική ενέργεια είναι 155 MWh, η εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας είναι 54%, ο μέσος συντελεστής συμπεριφοράς του όλου συστήματος (θερμότητα και ρεύμα) είναι 0.31 και ο μέσος εξεργειακός βαθμός απόδοσης 5.1%. Στο τελευταίο κομμάτι αυτής της εργασίας, το σύστημα αξιολογείται με βάση οικονομικά κριτήρια. Εν γένει, το σύστημα είναι οικονομικά βιώσιμο στην πλειοψηφία των περιπτώσεων και ιδιαίτερα όταν οι συνθήκες για παραγωγή ψύξης είναι σχετικά δυσκολότερες (χαμηλή θερμοκρασία παραγωγής ψύξης και υψηλή θερμοκρασία απόρριψης θερμότητας). Για παράδειγμα, όταν το σύστημα παράγει ψύξη στους -20°C και αποβάλλει θερμότητα στους 40°C, ο χρόνος αποπληρωμής της επένδυσής είναι κοντά στα 14 έτη και ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης αυτής (IRR) είναι περίπου 6.6%.

**Λέξεις Κλειδιά:** Ηλιακή ενέργεια, ψυκτική απορρόφησης, κλιμακοειδές – cascade σύστημα ψύξης, εξεργειακή ανάλυση, οικονομική ανάλυση

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η χρήση της ηλιακής ενέργειας είναι εξαιρετικής σημασίας και μπορεί να δώσει λύσεις σε αρκετά περιβαλλοντικά και ενεργειακά ζητήματα [1]. Είναι γεγονός, πως η χρήση της ηλιακής ενέργειας μπορεί να οδηγήσει στη μείωση της χρήσης των ορυκτών καυσίμων, καθώς και στη λειτουργία αυτόνομων αλλά και υβριδικών συστημάτων. Συγκρινόμενη με τις άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, η ηλιακή ενέργεια παρουσιάζει μεγάλη αφθονία αλλά επίσης πλεονεκτεί διότι μπορεί να μετατραπεί είτε σε ωφέλιμη θερμότητα είτε σε ηλεκτρισμό με άμεσο τρόπο [2].

Η χρήση της ηλιακής ενέργειας για παραγωγή ψύξης είναι μια ενδιαφέρουσα ιδέα διότι εν γένει τα μεγαλύτερα φορτία ψύξης/κλιματισμού δημιουργούνται σε περιοχές και σε περιόδους με υψηλές θερμοκρασίες και μεγάλη ηλιοφάνεια. Ειδικά ο ηλιακός κλιματισμός παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον διότι η ζήτηση του φορτίου κλιματισμού παρατηρείται τις ώρες της ηλιοφάνειας και υπάρχει ιδανική σύζευξη της πηγής ενέργειας και του φορτίου.

Η χρήση υβριδικών συστημάτων τα οποία συνδυάζουν τους παραδοσιακούς ψύκτες μηχανικής συμπίεσης με τεχνολογίες απορρόφησης/προσρόφησης για παραγωγή ψύξης με χρήση ρεύματος και θερμότητας είναι μια καινοτόμος ιδέα. Πιο συγκεκριμένα, υπάρχει τάση τα τελευταία χρόνια να μελετώνται τεχνολογίες απορρόφησης με εργαζόμενο ζεύγος LiBr-H<sub>2</sub>O συζευγμένες μαζί συμβατικούς ψύκτες σε κλιμακοειδή-cascade συστήματα. Πιο συγκεκριμένα, η βαθμίδα μηχανικής συμπίεσης τοποθετείται χαμηλά στο θερμοδυναμικό χάρτη έτσι ώστε να παράγεται ψύξης σε θερμοκρασίες -30°C με -20°C, ενώ η βαθμίδα απορρόφησης τοποθετείται ψηλά. Οι βαθμίδες συναλλάσσουν θερμότητα σε θερμοκρασίες 5-10°C και τελικά η θερμότητα αποβάλλεται στο περιβάλλον σε θερμοκρασία κοντά στους 40°C. Ο μηχανικός συμπίεστής σε αυτή την εγκατάσταση λειτουργεί με μικρότερο λόγο πίεσης διότι συμπιέζει έως μικρότερη θερμοκρασία. Αυτό το γεγονός οδηγεί σε εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας περίπου 50% [3]. Από την άλλη πλευρά, απαιτείται θερμότητα περίπου 100°C για να λειτουργήσει ο ψύκτης απορρόφησης. Για αποδοτική λειτουργία σε αυτή τη θερμοκρασία, η χρήση συλλεκτών με σωλήνες κενού είναι η καλύτερη επιλογή [4]. Όσο αφορά τώρα τα εργαζόμενα μέσα στους ψυκτικούς κύκλους, η χρήση R134a στο σύστημα μηχανικής συμπίεσης είναι η καλύτερη επιλογή [5], ενώ η χρήση του ζεύγους LiBr-H<sub>2</sub>O είναι η επικρατέστερη επιλογή για το σύστημα απορρόφησης [6].

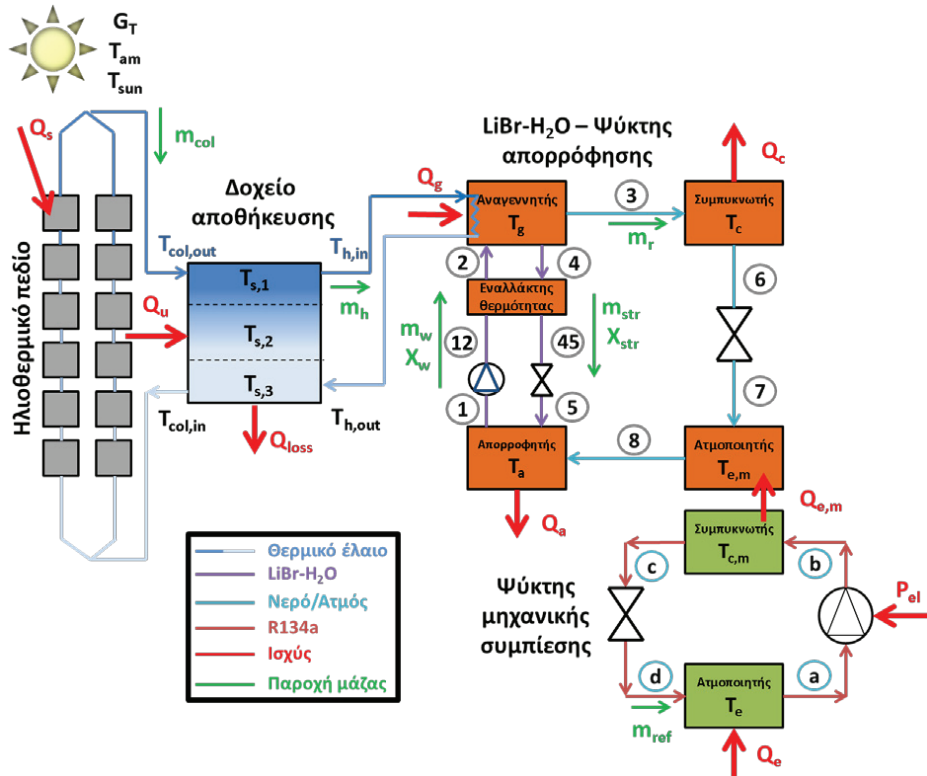
Στη βιβλιογραφία υπάρχουν μελέτες με χρήση της ηλιακής ενέργειας σε αντίστοιχα συστήματα. Οι Khan και Orfi [7] συνέκριναν τη χρήση των R22, R134a και CO<sub>2</sub> σε ένα cascade σύστημα και κατέληξαν πως η χρήση του R134a είναι η καλύτερη επιλογή με 45% εξοικονόμηση ηλεκτρισμού. Οι Li et al. [8] εξέτασαν τη χρήση σύνθετου παραβολικού συλλέκτη για να οδηγήσει ένα τέτοιο σύστημα με LiBr-H<sub>2</sub>O και R410a. Τελικά υπολόγισαν 7% ετήσια μείωση στην ηλεκτρική κατανάλωση και βρήκαν ότι η ειδική συλλεκτική επιφάνεια πρέπει να κυμαίνεται από 4.50 έως 6.75 m<sup>2</sup> ανά ψυκτικό kW. Τέλος, οι Boyaghchi et al. [9] μελέτησαν τη χρήση LiBr-H<sub>2</sub>O και R134a μαζί με επίπεδο συλλέκτη που λειτουργεί με νανορευστό (νερό-χαλκός). Το συνολικό ημερήσιο COP (coefficient of performance – συντελεστής συμπεριφοράς) βρέθηκε 0.09 και η ημερήσια εξεργειακή απόδοση 0.53%. Αυτές οι μικρές επιδόσεις του συστήματος δικαιολογούνται από την παραγωγή ψύξης σε μια σχετικά μεγάλη θερμοκρασία, κοντά στους 4°C.

Σε αυτή τη μελέτη, πραγματοποιείται ενεργειακή, εξεργειακή και οικονομική αξιολόγηση ενός ψύκτη cascade, όπως περιγράφηκε παραπάνω. Ο ψύκτης αυτός λειτουργεί με R134a στη βαθμίδα μηχανικής συμπίεσης και LiBr-H<sub>2</sub>O στη βαθμίδα απορρόφησης. Η απαιτούμενη θερμότητα στον αναγεννητή του ψύκτη απορρόφησης δίνεται από τον ήλιο με χρήση συλλεκτών με σωλήνες κενού. Η ανάλυση πραγματοποιείται με ένα αναπτυχθέν μοντέλο στο λογισμικό EES (Engineering Equation Solver) σε δυναμικές συνθήκες. Το σύστημα μελετάται σε διαφορετικές συνθήκες ηλιοφάνειας καθώς και για διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας. Πιο συγκεκριμένα μελετώνται διαφορετικοί συνδυασμοί θερμοκρασιών παραγωγής ψύξης και απόρριψης θερμότητας προς το περιβάλλον. Σε κάθε περίπτωση χρησιμοποιείται η βέλτιστη θερμοκρασία αναγέννησης, η οποία υπολογίζεται επίσης σε αυτή τη μελέτη. Τα τελικά αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης δίνουν την εξοικονόμηση ηλεκτρισμού από τη χρήση του υβριδικού αυτού συστήματος, σε σχέση με το αντίστοιχο σύστημα μηχανικής συμπίεσης. Επίσης, η οικονομική βιωσιμότητα του συστήματος παρουσιάζεται μέσα από μια σειρά από δείκτες όπως ο χρόνος αποπληρωμής, ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης της επένδυσης και η καθαρή παρούσα αξία.

## 2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

### 2.1 Εξεταζόμενο σύστημα

Το εξεταζόμενο σύστημα απεικονίζεται στην εικόνα 1. Διακρίνεται στο ηλιοθερμικό πεδίο από συλλέκτες κενού, από το δοχείο αποθήκευσης, το ψύκτη απορρόφησης και το ψύκτη μηχανικής συμπίεσης. Στο ηλιοθερμικό πεδίο καθώς και στο δοχείο υπάρχει θερμικό έλαιο (Therminol VP1) έτσι ώστε να μπορούν να επιτευχθούν θερμοκρασίες πάνω από τους 100°C χωρίς κίνδυνο ατμοποίησης. Το ηλιοθερμικό πεδίο αποτελείται από συλλέκτες συνολικής επιφάνειας 300 m<sup>2</sup> και διαρρέεται από ανηγμένη παροχή 0.02 kg/(s·m<sup>2</sup>). Το εξεταζόμενο δοχείο έχει όγκο 5 m<sup>3</sup> και συντελεστή θερμικών απωλειών προς το περιβάλλον 0.5 W/m<sup>2</sup>·K. Ο ολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας στον αναγεννητή (UA)<sub>g</sub> επιλέχθηκε να είναι 15 kW/K και η παροχή θερμού ελαίου στον εναλλάκτη του αναγεννητή είναι ίση με τη παροχή στο ηλιοθερμικό πεδίο, για λόγους θερμικής ευστάθειας του δοχείου.



Εικόνα 1: Η εξεταζόμενη εγκατάσταση

Στη συγκεκριμένη εγκατάσταση, η ηλιακή ενέργεια οδηγεί το ψύκτη απορρόφησης, ενώ ο ψύκτης μηχανικής συμπίεσης καταναλώνει ηλεκτρική ενέργεια. Το παραγόμενο ψυκτικό φορτίο παράγεται στον ατμοποιητή του ψύκτη μηχανικής συμπίεσης σε θερμοκρασίες από -40°C έως 0°C. Η θερμότητα απορρίπτεται στο περιβάλλον από τον απορροφητή και από τον συμπυκνωτή του ψύκτη απορρόφησης, με θερμοκρασίες απόρριψης που κυμαίνονται από 30°C έως 50°C. Η σύζευξη των 2 ψυκτών πραγματοποιείται μεταξύ του συμπυκνωτή του συστήματος μηχανικής συμπίεσης και του ατμοποιητή του συστήματος απορρόφησης. Για να είναι δυνατή η μεταφορά θερμότητας από το κάτω σύστημα στο πάνω, η θερμοκρασία ( $T_{c,m}$ ) επιλέχθηκε 8 K μεγαλύτερη από την ( $T_{e,m}$ ), δηλαδή:  $T_{c,m} = T_{e,m} + 8$  [5]. Ο βασικός στόχος της παρούσας εγκατάστασης είναι να ελαχιστοποιήσει τη κατανάλωση ηλεκτρισμού και αυτό πραγματοποιείται όταν η τιμή της θερμοκρασίας ατμοποίησης του πάνω ατμοποιητή στο κύκλωμα απορρόφησης είναι μικρή. Γι αυτό η τιμή επιλέχθηκε στους 5°C, που

είναι μια ελάχιστη αποδεκτή τιμή. Ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης στο συμπιεστή επιλέχθηκε στο 90% και αντίστοιχος μηχανικός στο 75%. Ο βαθμός εκμεταλευσιμότητας στον εναλλάκτη διαλύματος του ψύκτη απορρόφησης επιλέχθηκε στο 60%, μια λογική τιμή.

## 2.2 Μαθηματική μοντελοποίηση

Οι βασικές εξισώσεις που περιγράφουν τη προσομοίωση του ψύκτη απορρόφησης μπορούν να βρεθούν στη βιβλιογραφία στις πηγές [10-11] με αρκετές λεπτομέρειες. Η προσομοίωση του ψύκτη μηχανικής συμπίεσης πραγματοποιείται με τις βασικές σχέσεις αντίστοιχων κυκλωμάτων και η πηγή [12] τις περιγράφει λεπτομερώς.

Η θερμική απόδοση των ηλιακών συλλεκτών ορίζεται ως ο λόγος τη ωφέλιμη θερμικής ισχύος προς την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, σύμφωνα με τη σχέση 1:

$$\eta_{th} = \frac{Q_u}{Q_s} = \frac{m_c \cdot c_p \cdot (T_{col,out} - T_{col,in})}{A_c \cdot G_T} \quad (1)$$

Για τον υπολογισμό της θερμικής απόδοσης, χρησιμοποιείτε η σχέση 2 από τη πηγή [13]:

$$\eta_{th} = 0.6869 - 1.4709 \cdot \left( \frac{T_{col,in} - T_{am}}{G_T} \right) \quad (2)$$

Η μοντελοποίηση του δοχείου στηρίχθηκε στην εξίσωση του ισολογισμού ενέργειας. Η αποθηκευόμενη ισχύς ( $Q_{st}$ ) ισούται με τη παραγόμενη ωφέλιμη θερμική ισχύ ( $Q_u$ ) μείον τις θερμικές απώλειες του δοχείου προς το περιβάλλον. Περισσότερες λεπτομέρειες για την τρι-ζωνική μοντελοποίηση με ζώνες ομογενούς ανάμιξης βρίσκονται στη πηγή [11].

$$Q_{st} = Q_u - Q_{loss} \quad (3)$$

Η εξίσωση 4 περιγράφει τη μοντελοποίηση της μετάδοσης της θερμότητας προς τον αναγεννητή από το θερμικό έλαιο:

$$Q_g = \dot{m}_h \cdot c_p \cdot (T_{h,in} - T_{h,out}) = (UA)_g \cdot \frac{T_{h,in} - T_{h,out}}{\ln \left( \frac{T_{h,in} - T_g}{T_{h,out} - T_g} \right)} \quad (4)$$

Παρακάτω δίνονται διάφοροι ορισμοί μεγεθών για την ενεργειακή αξιολόγηση του συστήματος. Ο συντελεστής συμπεριφοράς του ψύκτη μηχανικής συμπίεσης είναι ο λόγος της παραγόμενης ψυκτικής ισχύος ( $Q_e$ ) προς την κατανάλωση ηλεκτρισμού στο συμπιεστή ( $P_{el}$ ).

$$COP_{mc} = \frac{Q_e}{P_{el}} \quad (5)$$

Ο συντελεστής συμπεριφοράς του ψύκτη απορρόφησης είναι ο λόγος της παραγόμενης ψυκτικής ισχύος ( $Q_{e,m}$ ) προς την πρόσδοση θερμότητας στον αναγεννητή ( $Q_g$ ).

$$COP_{abs} = \frac{Q_{e,m}}{Q_g} \quad (6)$$

Ο συντελεστής συμπεριφοράς του συστήματος είναι ο λόγος της παραγόμενης ψυκτικής ισχύος ( $Q_e$ ) προς την πρόσδοση θερμότητας στον αναγεννητή ( $Q_g$ ) και την κατανάλωση ηλεκτρισμού στο συμπιεστή ( $P_{el}$ ).

$$COP_{sys} = \frac{Q_e}{Q_s + P_{el}} \quad (7)$$

Η εξεργειακή αξιολόγηση του συστήματος γίνεται με τη σχέση 8. Η σχέση αυτή μοιάζει με την αντίστοιχη ενεργειακή σχέση (7) άλλα κάθε ποσότητα είναι πολλαπλασιασμένη με ένα συντελεστή έτσι ώστε η ενέργεια να γίνει εξέργεια. Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως η ηλεκτρική κατανάλωση είναι πρακτικά εξέργεια και δεν πολλαπλασιάζεται με συντελεστή. Η ηλιακή ενέργεια πολλαπλασιάζεται με

το συντελεστή εξέργειας που έχει προταθεί από το Petela [14]. Η θερμοκρασία του ήλιου ( $T_{sun}$ ) είναι ίση με 5770 K.

$$\eta_{ex,sys} = \left\{ -Q_e \cdot \left[ 1 - \frac{T_{am}}{T_e} \right] \right\} \cdot \left\{ P_{el} + Q_s \cdot \left[ 1 - \frac{4}{3} \cdot \left( \frac{T_{am}}{T_{sun}} \right) + \frac{1}{3} \cdot \left( \frac{T_{am}}{T_{sun}} \right)^4 \right] \right\}^{-1} \quad (8)$$

Για την ημερήσια αξιολόγηση του συστήματος χρησιμοποιούνται αντίστοιχες σχέσεις, απλά αντί για την ισχύ χρησιμοποιείται η ημερήσια ενέργεια. Η εξίσωση 9 δίνει για παράδειγμα πως υπολογίζεται η ημερήσια ενέργεια ψύξης.

$$E_e = \int_{day} Q_e \cdot dt_h \quad (9)$$

### 2.3 Λοιπά στοιχεία μεθοδολογίας

Για τη προσομοίωση του συστήματος αναπτύχθηκε ένα πρόγραμμα με το λογισμικό EES (Engineering Equation Solver) [15]. Στο πρώτο στάδιο της ανάλυσης χρησιμοποιήθηκε μια τυπική θερινή μέρα με συνολική ηλιοφάνεια 6 kWh/m<sup>2</sup>, 12 ώρες διάρκεια της μέρας, 25°C μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος και 8 K διακύμανση. Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν μετεωρολογικά δεδομένα για την Αθηνά χρησιμοποιήθηκαν βάση των πηγών [16-17]. Πρακτικά, οι προηγούμενες εξισώσεις λύνονται σε ένα ψευδο-δυναμικό μοντέλο το οποίο βασίζεται στην επίλυση των διαφορικών εξισώσεων στο δοχείο αποθήκευσης. Στην αρχή της μέρας, η θερμοκρασία στο δοχείο είναι ίση με εκείνης του περιβάλλοντος σε κάθε περίπτωση. Μετά το πέρας της ημέρας, η αποθηκευμένη θερμότητα στο δοχείο, καθώς και η ηλεκτρική ισχύς που έχει παραχθεί αξιολογούνται. Για την οικονομική αξιολόγηση του συστήματος χρησιμοποιούνται οικονομικά δεδομένα από τη βιβλιογραφία, τα οποία συνοψίζονται στο πίνακα 1.

Πίνακας 1. Οικονομικά στοιχεία ανάλυσης

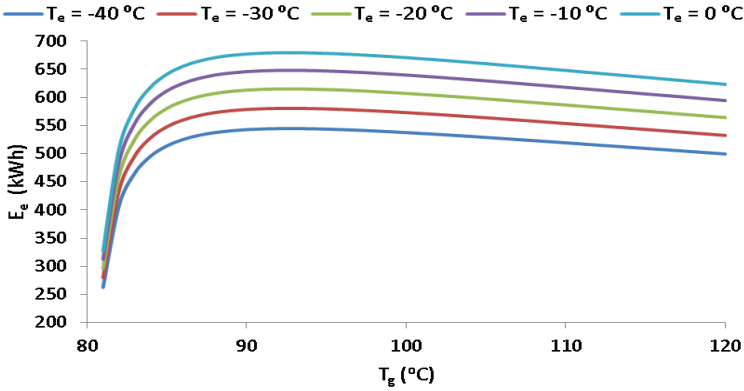
Παράμετροι	Τιμές
Ειδικό κόστος ψύκτη απορρόφησης	600 €/kW <sub>ψυκτικό</sub>
Ειδικό κόστος ψύκτη μηχανικής συμπίεσης	300 €/kW <sub>ψυκτικό</sub>
Ειδικό κόστος συλλεκτών	300 €/m <sup>2</sup>
Ειδικό κόστος δοχείου	1000 €/m <sup>3</sup>
Κόστος ρεύματος	0.20 €/kWh
Κόστος χρήματος	3 %
Χρόνος ζωής επένδυσης	25 έτη
Συντήρηση και λειτουργία	1% της επένδυσης

## 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

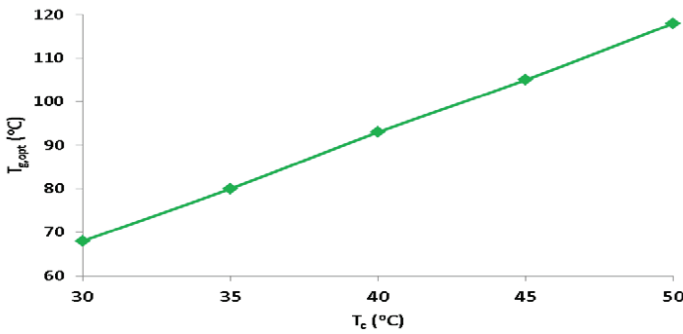
### 3.1 Διαστασιολόγηση κατά την τυπική θερινή ημέρα

Στη παράγραφο 3.1 δίνονται τα αποτελέσματα για λειτουργία της εγκατάστασης για μια τυπική θερινή ημέρα όπως έχει περιγραφεί στις μεθόδους της παρούσας εργασίας. Η εικόνα 2 παρουσιάζει αποτελέσματα για την ημερήσια παραγωγή ψυκτικού φορτίου για διαφορετικές θερμοκρασίες αναγέννησης και διαφορετικές θερμοκρασίες παραγωγής ψύξης, ενώ η θερμοκρασία απόρριψης θερμότητας προς το περιβάλλον έχει την τυπική τιμή των 40°C. Είναι φανερό ότι η ημερήσια παραγόμενη ενέργεια ψύξης μεγιστοποιείται για όλες τις θερμοκρασίες ψύξης όταν η θερμοκρασία αναγέννησης είναι ίση με 93°C. Αποδείχτηκε λοιπόν πως η βέλτιστη θερμοκρασία αναγέννησης δεν εξαρτάται από τη θερμοκρασία παραγωγής ψύξης. Αντίθετα, εξαρτάται άμεσα από τη θερμοκρασία απόρριψης θερμότητας προς το περιβάλλον, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 3. Η εικόνα 4 δείχνει την ημερήσια κατανομή προσπίπτουσας ακτινοβολίας, θερμοκρασίας περιβάλλοντος και δοχείου για την τυπική περίπτωση παραγωγής ψύξης στους -20 °C και θερμοκρασίας απόρριψης προς το περιβάλλον 40 °C. Είναι φανερό πως η θερμοκρασία εντός του δοχείου παρουσιάζει μικρή διακύμανση γύρω από τους 100 °C. Η εικόνα 5 παρουσιάζει την ημερήσια κατανομή ηλιακής ακτινοβολίας, κατανάλωσης ηλεκτρισμού και παραγόμενης ψυκτικής ισχύος για την προηγούμενη τυπική περίπτωση λειτουργίας με βέλτιστη θερμοκρασία αναγέννησης. Ενδιαφέρων παρουσιάζει η μικρή καθυστέρηση στην μεγιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος, σε σχέση με το ηλιακό μεσημέρι, λόγω της ύπαρξης του δοχείου αποθήκευσης στην εγκατάσταση. Τέλος, η εικόνα 6 δείχνει τη παραγόμενη ψυκτική ισχύ για διαφορετικούς συνδυασμούς θερμοκρασιών παραγωγής ψύξης και απόρριψης θερμότητας προς το

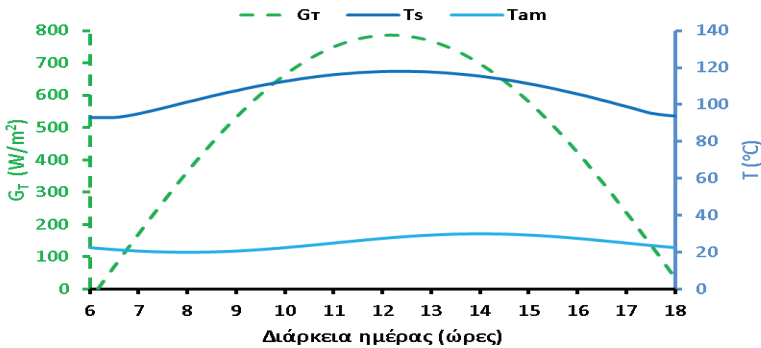
περιβάλλον. Παρατηρείται πως η παραγωγή ψύξης μειώνεται για μικρότερες θερμοκρασίες ψύξης και για μεγαλύτερες θερμοκρασίες απόρριψης της θερμότητας προς το περιβάλλον.



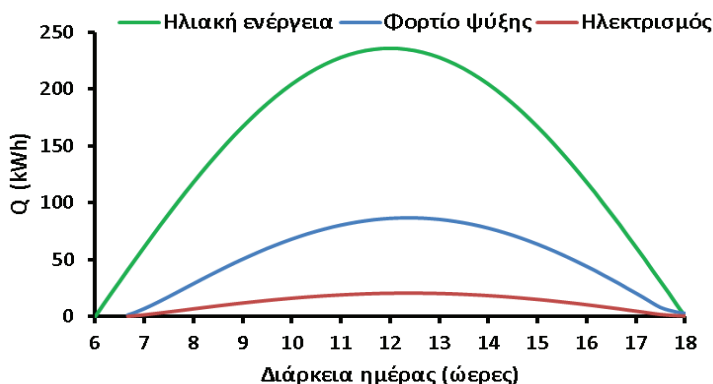
Εικόνα 2: Ημερήσια παραγωγή ψυκτικής ενέργειας για διαφορετικές θερμοκρασία αναγεννητή και διαφορετικές θερμοκρασίας παραγωγής ψύξης με τη θερμοκρασία απόρριψης θερμότητας προς το περιβάλλον ίση με 40°C



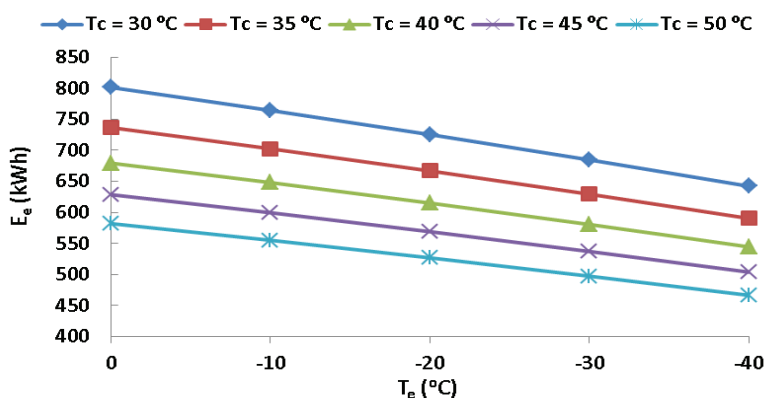
Εικόνα 3: Βέλτιστη θερμοκρασία αναγεννητή για διαφορετικές θερμοκρασίες απόρριψης θερμότητας προς το περιβάλλον



Εικόνα 4: Ηλιακή ακτινοβολία, θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά τη τυπική ημέρα, καθώς και θερμοκρασία εντός του δοχείου για τη βέλτιστη περίπτωση με θερμοκρασία απόρριψης θερμότητας προς το περιβάλλον ( $T_c=40^\circ\text{C}$ ) και θερμοκρασία παραγωγής ψύξης ( $T_e=-20^\circ\text{C}$ )



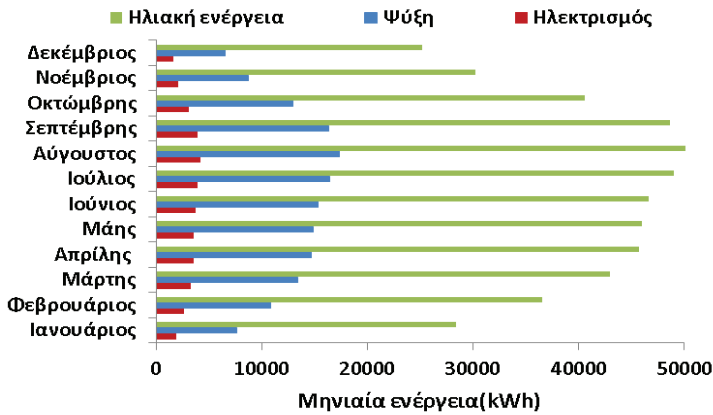
Εικόνα 5: Ημερήσια παραγωγή ψύξης, κατανάλωση ηλεκτρισμού και ηλιοφάνεια για τη βέλτιστη περίπτωση με θερμοκρασία απόρριψης θερμότητας προς το περιβάλλον ίση με ( $T_c=40^{\circ}\text{C}$ ) και θερμοκρασία παραγωγής ψύξης ίση με ( $T_e=-20^{\circ}\text{C}$ )



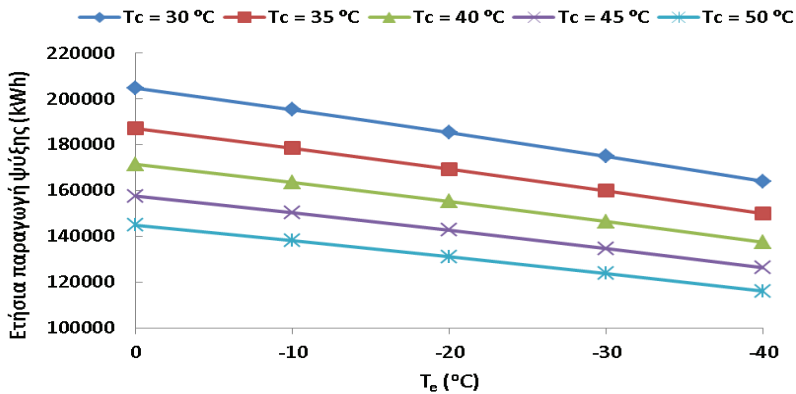
Εικόνα 6: Ημερήσια παραγωγή ψύξης για διαφορετικούς συνδυασμούς θερμοκρασιών παραγωγής ψύξης και απόρριψης θερμότητας προς το περιβάλλον με βέλτιστες θερμοκρασίες αναγέννησης

### 3.2 Ετήσια αξιολόγηση συστήματος

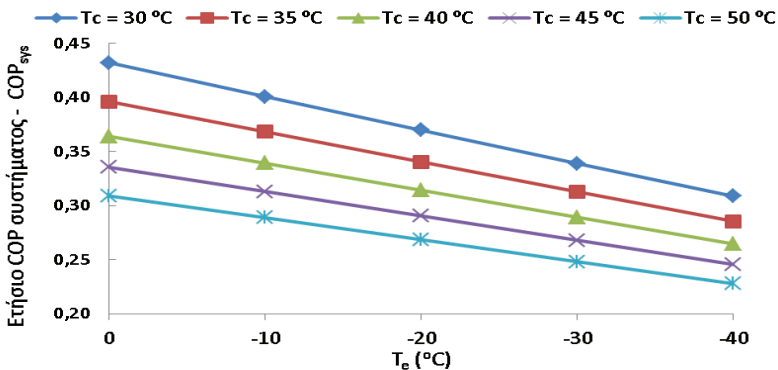
Η παράγραφος 3.2 παρουσιάζει αποτελέσματα για ετήσια λειτουργία του συστήματος. Η εικόνα 7 δίνει τις μηνιαίες επιδόσεις του συστήματος για την τυπική λειτουργία ( $T_e=-20^{\circ}\text{C}$ ,  $T_c=40^{\circ}\text{C}$ ). Ο Αύγουστος είναι ο μήνας με τη μεγαλύτερη παραγωγή ψύξης, ενώ ο Δεκέμβριος με τη μικρότερη. Οι εικόνες 8, 9 και 10 δίνουν την ετήσια παραγωγή ψύξης, τον ετήσιο συντελεστή συμπεριφοράς (COP) του συστήματος και τον ετήσιο εξεργειακό βαθμό απόδοσης του συστήματος. Είναι φανερό πως όλα τα προαναφερθέντα μεγέθη είναι μεγαλύτερα όταν η θερμοκρασία απόρριψης θερμότητας προς το περιβάλλον είναι μικρότερη. Αντίθετα, η επίδραση της θερμοκρασία ψύξης είναι διαφορετική στα αποτελέσματα. Πιο συγκεκριμένα, μεγαλύτερες θερμοκρασίες ψύξης οδηγούν σε μεγαλύτερη παραγωγή ψύξης και σε μεγαλύτερο COP συστήματος, ενώ η εξεργειακή απόδοση μειώνεται. Αυτό εξηγείται διότι μεγαλύτερη θερμοκρασία ψύξης σημαίνει μικρότερη «ποιότητα» στην παραγόμενη ψύξη και συνεπώς μικρότερο εξεργειακό περιεχόμενο στην παραγόμενη ψυκτική ενέργεια.



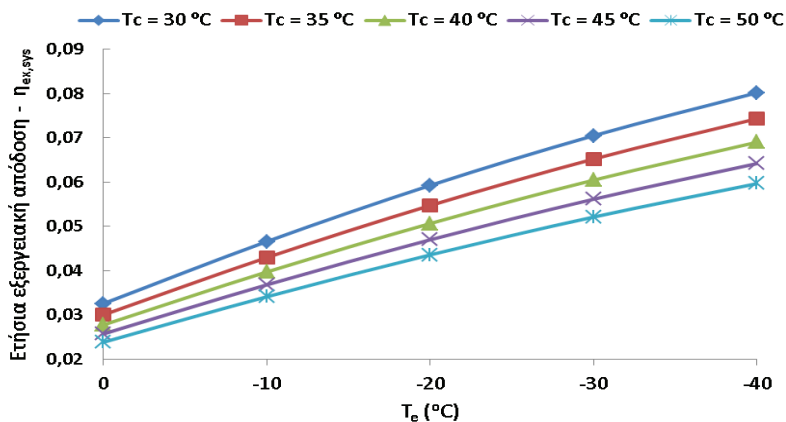
Εικόνα 7: Μηνιαία παραγωγή ψύξης, κατανάλωση ηλεκτρισμού και ηλιοφάνεια για τη βέλτιστη περίπτωση με θερμοκρασία απόρριψης θερμότητας προς το περιβάλλον ίση με ( $T_c=40^{\circ}\text{C}$ ) και θερμοκρασία παραγωγής ψύξης ίση με ( $T_e=-20^{\circ}\text{C}$ )



Εικόνα 8: Ετήσια παραγωγή ψύξης για διαφορετικούς συνδυασμούς θερμοκρασιών παραγωγής ψύξης και απόρριψης θερμότητας προς το περιβάλλον με βέλτιστες θερμοκρασίες αναγέννησης



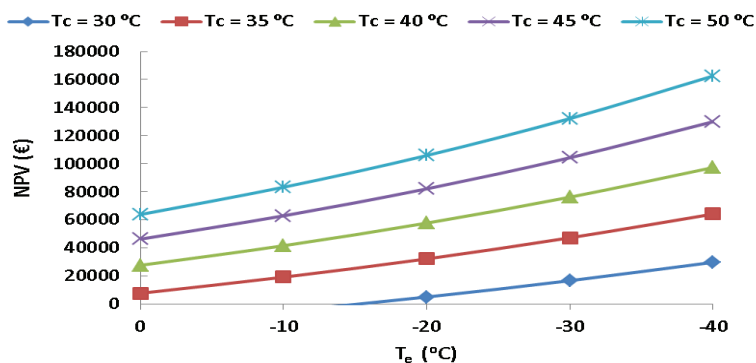
Εικόνα 9: Ετήσιο COP συστήματος για διαφορετικούς συνδυασμούς θερμοκρασιών παραγωγής ψύξης και απόρριψης θερμότητας προς το περιβάλλον με βέλτιστες θερμοκρασίες αναγέννησης



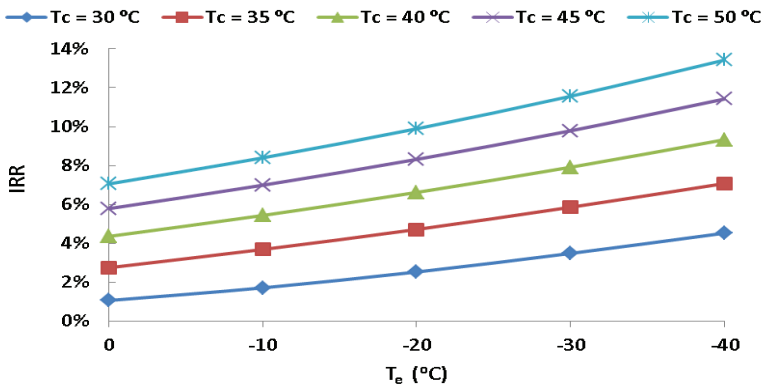
Εικόνα 10: Ετήσιο εξεργειακή απόδοση συστήματος για διαφορετικούς συνδυασμούς θερμοκρασιών παραγωγής ψύξης και απόρριψης θερμότητας προς το περιβάλλον με βέλτιστες θερμοκρασίες αναγέννησης

### 3.3 Οικονομική αξιολόγηση συστήματος

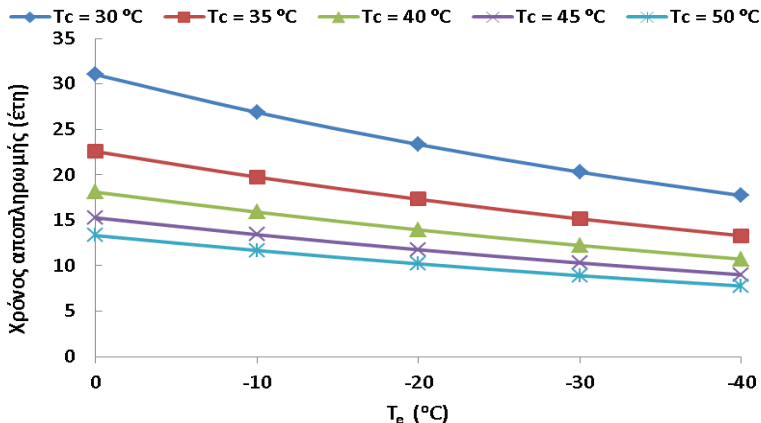
Η παράγραφος 3.3 παρουσιάζει στοιχεία για την οικονομική αξιολόγηση του συστήματος. Πιο συγκριμένα, η εικόνες 11, 12 και 13 δίνουν τη καθαρή παρούσα αξία της επένδυσης (NPV), τον εσωτερικό βαθμό απόδοσης της επένδυσης (IRR) και το χρόνο αποπληρωμής της επένδυσης για τα εξεταζόμενα σενάρια λειτουργίας. Εν γένει, το σύστημα είναι οικονομικά βιώσιμότερη όταν λειτουργεί σε μεγαλύτερη θερμοκρασία απόρριψης θερμότητας και όταν λειτουργεί σε χαμηλότερη θερμοκρασία ψύξης, διότι με αυτές τις συνθήκες υπάρχει μεγάλο περιθώριο για εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι λοιπόν, υπό αυτές τις ευνοϊκές συνθήκες η NPV και το IRR αυξάνουν, ενώ ο χρόνος αποπληρωμής μειώνεται. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι το σύστημα είναι εν γένει βιώσιμο. Μόνο για τις περιπτώσεις με θερμοκρασία απόρριψης θερμότητας ίση με 30°C και θερμοκρασία ψύξης 0°C και -5°C δεν υπάρχει βιωσιμότητα (αρνητικό NPV).



Εικόνα 11: Καθαρή παρούσα αξία (NPV) για διαφορετικούς συνδυασμούς θερμοκρασιών παραγωγής ψύξης και απόρριψης θερμότητας προς το περιβάλλον με βέλτιστες θερμοκρασίες αναγέννησης



Εικόνα 12: Εσωτερικός βαθμός απόδοσης (IRR) για διαφορετικούς συνδυασμούς θερμοκρασιών παραγωγής ψύξης και απόρριψης θερμότητας προς το περιβάλλον με βέλτιστες θερμοκρασίες αναγέννησης



Εικόνα 13: Χρόνος αποπληρωμής για διαφορετικούς συνδυασμούς θερμοκρασιών παραγωγής ψύξης και απόρριψης θερμότητας προς το περιβάλλον με βέλτιστες θερμοκρασίες αναγέννησης

### 3.4 Σύνοψη αποτελεσμάτων

Στην παράγραφο 3.4 γίνεται μια μικρή σύνοψη των αποτελεσμάτων αυτής της μελέτης. Ο πίνακας 2 περιλαμβάνει τα οικονομικά αλλά και τα ενεργειακά αποτελέσματα για τη περίπτωση με θερμοκρασία απόρριψης προς το περιβάλλον ίση με 40 °C. Ο χρόνος αποπληρωμής κυμαίνεται από 10.7 έτη έως 18.1 έτη, το IRR από 4.4% έως 9.3% και το NPV από 28 κ€ έως 97 κ€. Το COP κυμαίνεται από 0.26 έως 0.36, ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης από 2.8% έως 6.9% και η εξοικονόμηση ηλεκτρισμού από 46% έως 72%.

Ο πίνακας 3 παρουσιάζει πως μεταβάλλονται οι οικονομικοί δείκτες αν το σύστημα λειτουργεί σε διαφορετικές πόλεις τις Ελλάδας. Επιλεχτήκαν 4 πόλεις (Αθήνα, Θεσσαλονίκη, Ηράκλειο-Κρήτης και Καστόρια), μία για κάθε κλιματική ζώνη. Τα στοιχεία για την ηλιοφάνεια χρησιμοποιήθηκαν από τη πηγή [20]. Τα αποτελέσματα του πίνακα αφορούν λειτουργία στις τυπικές συνθήκες με θερμοκρασία απόρριψης θερμότητας προς το περιβάλλον ίση με 40 °C και θερμοκρασία παραγωγής ψύξης ίση με -20 °C. Για να μπορέσει να πραγματοποιηθεί μια κατάλληλη οικονομική σύγκριση, η αποδιδόμενη ψυκτική ενέργεια διατηρήθηκε ίδια μεταξύ των πόλεων με αντίστοιχη τροποποίηση της συλλεκτικής επιφάνειας, όπως παρουσιάζεται στο πίνακα 3. Τα τελικά αποτελέσματα αποδεικνύουν πως οι

επιδόσεις του συστήματος είναι αντίστοιχες σε ολόκληρη την Ελλάδα, με τη σειρά καταλληλότητας να είναι η εξής: Ηράκλειο, Αθήνα, Καστόρια και Θεσσαλονίκη.

Πίνακας 2. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα ανάλυσης

$T_e$ (°C)	Συνολική επένδυση			Ετήσια		
	NPV (€)	IRR -	Χρόνος αποπληρωμής (Έτη)	$COP_{sys}$ -	$\eta_{ex,sys}$ -	Εξοικονόμηση ηλεκτρισμού -
-40	97387	9.33%	10.72	0.2645	0.0690	46.18%
-30	76286	7.91%	12.23	0.2892	0.0604	49.32%
-20	57809	6.62%	13.95	0.3141	0.0506	53.98%
-10	41689	5.43%	15.90	0.3391	0.0397	61.01%
0	27713	4.36%	18.10	0.3641	0.0277	72.12%

Πίνακας 3: Οικονομική αξιολόγηση επένδυσης σε διάφορες πόλεις της Ελλάδας για ίση παραγωγή ψυκτικού φορτίου για τη περίπτωση με θερμοκρασία απόρριψης θερμότητας προς το περιβάλλον ίση με ( $T_c=40^\circ\text{C}$ ) και θερμοκρασία παραγωγής ψύξης ίση με ( $T_e=-20^\circ\text{C}$ )

Μέγεθος	Αθήνα	Θεσσαλονίκη	Ηράκλειο	Καστοριά
Χρόνος αποπληρωμής (έτη)	13.95	15.98	13.09	15.67
Καθαρή παρούσα αξία (€)	57809	45618	63188	47411
Εσωτερικός βαθμός απόδοσης	6.62%	5.39%	7.23%	5.56%
Συλλεκτική επιφάνεια ( $\text{m}^2$ )	300	334	285	329

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτή τη μελέτη παρουσιάζεται ενεργειακή εξεργειακή και οικονομική αξιολόγηση ενός cascade συστήματος παραγωγής ψύξης με χρήση διβάθμιου κύκλου απορρόφησης-μηχανικής συμπίεσης για υβριδική λειτουργία με ηλεκτρισμό και χρήση ηλιακής ενέργειας. Ηλιακοί συλλέκτες συνολικής επιφάνειας  $300 \text{ m}^2$  με σωλήνες κενού χρησιμοποιούνται συζευγμένοι με δοχείο αποθήκευσης όγκου  $5 \text{ m}^3$ . Η ανάλυση πραγματοποιείται με ένα αναπτυχθέν θερμοδυναμικό μοντέλο στο EES (Engineering Equation Solver).

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, υπάρχει μια βέλτιστη θερμοκρασία αναγέννησης η οποία καθορίζεται από τη θερμοκρασία απόρριψης θερμότητας προς το περιβάλλον, ενώ δεν εξαρτάται από τη θερμοκρασία παραγωγής ψύξης. Μικρότερη θερμοκρασία απόρριψης θερμότητας προς το περιβάλλον οδηγεί σε μεγαλύτερη ενεργειακή και εξεργειακή απόδοση. Μικρότερη θερμοκρασία παραγωγής ψύξης οδηγεί σε μικρότερη ενεργειακή αλλά σε μεγαλύτερη εξεργειακή απόδοση.

Η οικονομική αξιολόγηση έδειξε πως το σύστημα εν γένει είναι βιώσιμο. Η βιωσιμότητα του συστήματος είναι μεγαλύτερη όταν αυτό λειτουργεί με μικρότερη θερμοκρασία παραγωγής ψύξης και μεγαλύτερη θερμοκρασία απόρριψης θερμότητας προς το περιβάλλον, διότι υπό αυτές τις συνθήκες η εξοικονόμηση ηλεκτρισμού είναι μεγαλύτερη.

Για μια τυπική περίπτωση λειτουργίας με θερμοκρασία απόρριψης θερμότητας προς το περιβάλλον ίση με  $40^\circ\text{C}$  και θερμοκρασία παραγωγής ψύξης ίση με  $-20^\circ\text{C}$ , η παραγόμενη ψυκτική ενέργεια είναι  $155 \text{ MWh}$ , η εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας είναι 54%, ο μέσος συντελεστής συμπεριφοράς του όλου συστήματος (θερμότητα και ρεύμα) είναι 0.31 και ο μέσος εξεργειακός βαθμός απόδοσης 5.1%. Αντίστοιχα, ο χρόνος αποπληρωμής είναι περίπου 14 έτη και το IRR είναι 6.6%.

Τέλος, μια απλή ανάλυση για την εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας σε διαφορετικές τοποθεσίες στην Ελλάδα έδειξε μικρή διακύμανση στους οικονομικούς δείκτες για τη προαναφερθείσα τυπική περίπτωση λειτουργίας. Τα τελικά αποτελέσματα αποδεικνύουν πως οι επιδόσεις του συστήματος είναι αντίστοιχες σε ολόκληρη την Ελλάδα, με τη σειρά καταλληλότητας να είναι η εξής: Ηράκλειο, Αθήνα, Καστόρια και Θεσσαλονίκη.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Patel, B, Desai, NB, Kachhwaha, SS, Jain, V, Hadia, N, 2017, "Thermo-economic analysis of a novel organic Rankine cycle integrated cascaded vapor compression-absorption system", *Journal of Cleaner Production*, 154, pp. 26-40
- [2] Bellos, E, Tzivanidis, C, Moschos, K, Antonopoulos, KA, 2016, "Energetic and financial evaluation of solar assisted heat pump space heating systems", *Energy Conversion and Management*, 120, pp. 306-319
- [3] Jain, V, Sachdeva, G, Kachhwaha, SS, 2015, "Energy, exergy, economic and environmental (4E) analyses based comparative performance study and optimization of vapor compression-absorption integrated refrigeration system", *Energy*, 91, pp. 816-832
- [4] Sharan, P, Bandyopadhyay, S, 2017, "Solar assisted multiple-effect evaporator", *Journal of Cleaner Production*, 142(4), pp. 2340-2351
- [5] Cimsit, C, Ozturk, IT, 2012, "Analysis of compression-absorption cascade refrigeration cycles", *Applied Thermal Engineering*, 40, pp.311-317
- [6] Cimsit, C, Ozturk, IT, Hozol, M, 2014, "Second law based thermodynamic analysis of compression-absorption cascade refrigeration cycles, Analysis of compression-absorption cascade refrigeration cycles", *Journal of Thermal Science and Technology*, 34(2), pp. 9-18
- [7] Munfath Khan, MS, Orfi, J, 2014, "Cooling performance and energy saving analysis of cascade refrigeration system powered by solar energy for Riyadh region (Saudi Arabia)", *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, 5(1), pp. 44-52
- [8] Li, Z, Jing, Y, Liu, J, 2016, "Thermodynamic study of a novel solar LiBr/H<sub>2</sub>O absorption chiller", *Energy and Buildings*, 133, pp. 565-576
- [9] Boyaghchi, FA, Mahmoodnezhad, M, Sabeti, V, 2016, "Exergoeconomic analysis and optimization of a solar driven dual-evaporator vapor compression-absorption cascade refrigeration system using water/CuO nanofluid", *Journal of Cleaner Production*, 139, pp. 970-985
- [10] Bellos, E, Tzivanidis, C, Antonopoulos, KA, 2016, "Exergetic and energetic comparison of LiCl-H<sub>2</sub>O and LiBr-H<sub>2</sub>O working pairs in a solar absorption cooling system", *Energy Conversion and Management*, 123, pp. 453-461
- [11] Bellos, E, Tzivanidis, C, Antonopoulos, KA, 2016, "Exergetic, energetic and financial evaluation of a solar driven absorption cooling system with various collector types", *Applied Thermal Engineering*, 102, pp. 749-759
- [12] Bellos, E, Vrachopoulos, MGr, Tzivanidis, C, 2017, "Energetic and exergetic investigation of a novel solar assisted mechanical compression refrigeration system", *Energy Conversion and Management*, 147, pp. 1-18
- [13] Zambolin, E, Del Col, D, 2012, "An improved procedure for the experimental characterization of optical efficiency in evacuated tube solar collectors", *Renewable Energy*, 43, pp. 37-46
- [14] Petela, R, 2003, "Exergy of undiluted thermal radiation", *Solar Energy*, 74(6), pp. 469-488
- [15] F-Chart Software, Engineering Equation Solver (EES); 2015. Available at: <http://www.fchart.com/ees>.
- [16] Kouremenos, DA Antonopoulos, KA, Domazakis, ES, 1985, "Solar radiation correlations for the Athens, Greece, area", *Solar Energy*, 35, pp. 259-269
- [17] Kouremenos, DA, Antonopoulos, KA, Doulgerakis, S, 1987, "Direct and diffuse solar radiation correlations for tilted surfaces in Athens", *Greece, Solar Energy* 1987, 38(3), pp. 203-217
- [18] Shirazi, A, Taylor, RA, Morrison, GL, White, DS, 2017, "A comprehensive, multi-objective optimization of solar-powered absorption chiller systems for air-conditioning applications", *Energy Conversion and Management*, 132, pp. 281-306
- [19] Yang, S, Liang, J, Yang, S, Qian, Y, 2016, "A novel cascade refrigeration process using waste heat and its application to coal-to-SNG", *Energy*, 115(1), pp. 486-497
- [20] Τεχνική οδηγία, Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-3/2010

## ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΩΝ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΤΟΝ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟ ΚΤΙΡΙΩΝ

**Β. Δρόσου<sup>1,2\*</sup>, Α. Δημούδη<sup>2</sup>, Ε.Κυριάκη<sup>3</sup>, Α.Μ. Παπαδόπουλος<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Τμήμα Θερμικών Ηλιακών Συστημάτων, Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και Εξοικονόμησης (ΚΑΠΕ), 19<sup>ο</sup> χλμ Λεωφ. Μαραθώνος, Πικέρμι, Αττική  
e-mail: [drosou@cres.gr](mailto:drosou@cres.gr)

<sup>2</sup> Εργαστήριο Περιβαλλοντικού και Ενεργειακού Σχεδιασμού Κτιρίων και Οικισμών, Τμήμα Μηχ. Περιβάλλοντος, ΔΠΘ

<sup>3</sup> Εργαστήριο Κατασκευής Συσκευών Διεργασιών, Τμήμα Μηχ. Μηχανικών, ΑΠΘ

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η τεχνολογία των Συγκεντρωτικών Θερμικών Ηλιακών (ΣΘΗ) συστημάτων, είναι γνωστή από τις εφαρμογές για ηλεκτροπαραγωγή, κατά κανόνα με μεγάλα ηλιακά πεδία και αντίστοιχη εγκατεστημένη ισχύ της τάξης των δεκάδων ή και εκατοντάδων MW<sub>el</sub>, όπου και θεωρείται καταξιωμένη.

Ωστόσο, καθώς η τεχνολογία εξελίσσεται, υπάρχουν δυνατότητες να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο και σε μικρότερης κλίμακας θερμικές εφαρμογές, στο θερμοκρασιακό εύρος απαιτήσεων μεταξύ των 100<sup>ο</sup>C και 250<sup>ο</sup>C. Τέτοιες εφαρμογές παρουσιάζουν ενδιαφέρον στον κτιριακό τομέα, καθώς συνδυαζόμενες με ψύκτες απορρόφησης διπλής βαθμίδας σε ολοκληρωμένα συστήματα ηλιακού κλιματισμού, μπορούν να διασφαλίσουν την επίτευξη υψηλού βαθμού απόδοσης από τους ψύκτες, κάτι που οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες δεν μπορούν να πετύχουν.

Στο πλαίσιο αυτό έγινε διερεύνηση των δυνατοτήτων εφαρμογής ΣΘΗ στον κτιριακό τομέα, όπου με εξειδικευμένα προσομοιωτικά εργαλεία εξετάστηκε μία σειρά από εφαρμογές, καλύπτοντας γεωγραφικά/κλιματικά το εύρος των συνθηκών που συναντώνται στη χώρα και τυπολογικά τα πλέον διαδομένα είδη μεγάλης κλίμακας κτιρίων.

Συγκεκριμένα, εξετάστηκε η δυνατότητα χρήσης των ΣΘΗ σε εφαρμογή ηλιακού κλιματισμού, τεχνολογίας διβάθμιου ψύκτη απορρόφησης κλειστού κύκλου, σε συνδυασμό με παραβολικούς συλλέκτες για τις περιπτώσεις:

- ενός μεγάλου κτιρίου γραφείων στην Αθήνα
- ενός συγκροτήματος κατοικιών στο Ηράκλειο, στην Αθήνα και στη Θεσσαλονίκη.

Η εργασία επικεντρώνεται στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων των μελετών εφαρμογής καθώς και στην αξιολόγησή τους.

**Λέξεις Κλειδιά:** Συγκεντρωτικά θερμικά ηλιακά συστήματα, ηλιακός κλιματισμός, προσομοίωση, εξοικονόμηση ενέργειας, κτίρια

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ηλιακή ακτινοβολία αποτελεί Ανανεώσιμη Πηγή Ενέργειας (ΑΠΕ) η οποία μπορεί να αξιοποιηθεί και να μετατραπεί σε ωφέλιμη θερμική ενέργεια μέσω των Θερμικών Ηλιακών Συστημάτων (ΘΗΣ). Τα ΘΗΣ αφορούν σε εξοπλισμό και διατάξεις με ή χωρίς συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας, που σκοπό έχουν να παράγουν θερμό ρευστό χαμηλών ( $T < 100^{\circ}\text{C}$ ), μεσαίων ( $100^{\circ}\text{C} < T < 400^{\circ}\text{C}$ ) και υψηλών θερμοκρασιών ( $T > 400^{\circ}\text{C}$ ), αναλόγως των απαιτήσεων της θερμικής εφαρμογής.

Η χρήση θερμοσιφωνικών συστημάτων για παραγωγή ζεστού νερού χρήσης στον οικιακό τομέα (χαμηλή θερμοκρασία παραγόμενου νερού  $< 100^{\circ}\text{C}$ ) αποτελεί την πλέον διαδομένη εφαρμογή σε εθνικό, αλλά και παγκόσμιο, επίπεδο. Διαδεδομένες εμπορικές εφαρμογές ΘΗΣ αποτελούν επίσης:

- η παραγωγή θερμού αέρα κυρίως για εφαρμογές ξήρανσης προϊόντων και θέρμανσης χώρων,
- η παραγωγή ζεστού νερού χρήσης και η υποβοήθηση θέρμανσης στον κτιριακό τομέα με ηλιακά συστήματα βεβιασμένης κυκλοφορίας,
- οι βιομηχανικές εφαρμογές με διευρυμένο θερμοκρασιακό εύρος (ζεστό νερό χρήσης / ή και αέρας χαμηλών θερμοκρασιών μέχρι και ατμός για άμεση ή έμμεση χρήση),
- ο ηλιακός κλιματισμός με συνδυασμό ηλιακών συλλεκτών και ψυκτών απορρόφησης ή προσρόφησης.
- η ηλεκτροπαραγωγή με χρήση διατάξεων συγκέντρωσης της άμεσης δέσμης της ακτινοβολίας, ήτοι Συγκεντρωτικών Θερμικών Ηλιακών (ΣΘΗ) συστημάτων

Στις ηλιακές εφαρμογές χαμηλών θερμοκρασιών χρησιμοποιούνται ως συσκευές οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες, με διάφορες σχεδιαστικές παραλλαγές, χωρίς συγκέντρωση ακτινοβολίας, όπου όλα τα στοιχεία που τις αποτελούν έχουν την ίδια φυσική θέση. Όταν όμως πρόκειται για ηλιακές εφαρμογές μεσαίων και υψηλών θερμοκρασιών, ο ηλιακός συλλέκτης φέρει δύο σαφώς διακριτά μέρη, τον συγκεντρωτή - ήτοι το ηλιακό πεδίο και τον υποδοχέα (ή απορροφητή ή δέκτη), επίσης με διάφορες σχεδιαστικές παραλλαγές. Η συνδυασμένη λειτουργία αυτών των μερών επιτυγχάνει την συγκέντρωση της άμεσης δέσμης της ηλιακής ακτινοβολίας.

Εμπορικές εφαρμογές σήμερα των ΣΘΗ συστημάτων αποτελούν τέσσερις τεχνολογίες συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας, με λιγότερη ή ευρύτερη διείσδυση στην αγορά (Εικόνα 1), ήτοι :

- τα παραβολικά κοίλα (ή παραβολικοί συλλέκτες) - που κατέχουν το μεγαλύτερο μερίδιο εγκατεστημένης ισχύος στην Ευρώπη και στον κόσμο [1],
- οι συλλέκτες τύπου κατόπτρων Fresnel,
- οι ηλιακοί πύργοι ισχύος, και
- τα συστήματα δίσκου – μηχανής.



(α)



(β)



(γ)

(δ)

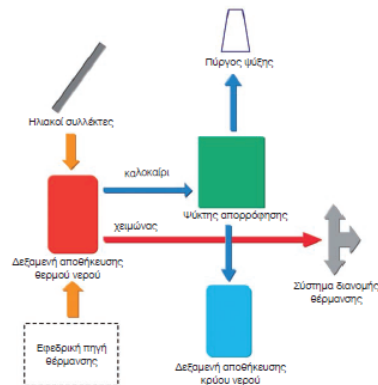
Εικόνα 1: Συστήματα ΣΘΗ τεχνολογιών (α) παραβολικού τύπου (β) τύπου κατόπτρων Fresnel (γ) ηλιακού πύργου ισχύος και δίσκου μηχανής [2]

Από τα μέσα της δεκαετίας του 2000, οι εφαρμογές των ΣΘΗ επεκτάθηκαν ταχύτατα και εξελίχθηκαν από μια σε μια αξιόπιστη λύση παραγωγής ενέργειας. Το 2016 λειτουργούσαν παγκοσμίως περισσότερα από 5 GW ΣΘΗ συστημάτων για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, με άλλα 300 MW έργων υπό κατασκευή – κυρίως στη Νότια Αφρική, την Ινδία, τη Μέση Ανατολή και το Μαρόκο, ενώ η εγκατεστημένη ισχύς των ΣΘΗ αναμένεται να διπλασιαστεί μέχρι το 2020 [3]. Ωστόσο, καθώς η τεχνολογία εξελίσσεται, υπάρχουν δυνατότητες τα ΣΘΗ να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο και σε μικρότερης κλίμακας θερμικές εφαρμογές, στο θερμοκρασιακό εύρος απαιτήσεων μεταξύ των 100<sup>ο</sup>C και 250<sup>ο</sup>C. Τέτοιες εφαρμογές παρουσιάζουν ενδιαφέρον στον κτιριακό τομέα, καθώς συνδυαζόμενες με ψύκτες απορρόφησης διπλής βαθμίδας σε ολοκληρωμένα συστήματα ηλιακού κλιματισμού, μπορούν να διασφαλίσουν την επίτευξη υψηλού βαθμού απόδοσης από τους ψύκτες, κάτι που οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες δεν μπορούν να πετύχουν.

Τα κύρια υποσυστήματα μιας διάταξης ηλιακού κλιματισμού "κλειστού τύπου" – δηλαδή διατάξεων όπου το ψυκτικό μέσο δεν έρχεται σε επαφή με τον αέρα – είναι το πεδίο ηλιακών συλλεκτών, ο θερμοκινούμενος (ή θερμικός) ψύκτης, η δεξαμενή αποθήκευσης θερμικής ενέργειας, ο πύργος ψύξης, το υδραυλικό κύκλωμα, το σύστημα έλεγχου και ο λοιπός ηλεκτρομηχανολογικός υποστηρικτικός εξοπλισμός (Εικόνα 2). Ένα σύστημα ηλιακού κλιματισμού δύναται να λειτουργεί αυτόνομα μειώνοντας τα ψυκτικά φορτία του κλιματιζόμενου χώρου, αναλόγως της παρεχόμενης θερμικής ενέργειας από το ηλιακό πεδίο αλλά χωρίς καθορισμένες θερμοκρασιακές απαιτήσεις ή συνδυαζόμενο με εφεδρική πηγή (συμβατικό ψύκτη, αντλία θερμότητας κ.α.) για την επίτευξη συγκεκριμένων ποσοτικών και ποιοτικών χαρακτηριστικών αέρα του κλιματιζόμενου χώρου.

Τα συστήματα ηλιακής ψύξης παρουσιάζουν σειρά πλεονεκτημάτων στα σημαντικότερα των οποίων συγκαταλέγονται ότι δεν χρησιμοποιούν επιβλαβή ψυκτικά μέσα για το περιβάλλον και τον άνθρωπο, ότι μπορούν να προσαρμοστούν σε ήδη υφιστάμενα συστήματα και δίκτυα κλιματισμού (με αέρα ή νερό), ότι χρησιμοποιούν ΑΠΕ ως θερμή πηγή τροφοδοσίας του ψυκτικού μηχανήματος και ότι παρουσιάζουν σύμπτωση αιχμής φορτίου και απόδοσης, συμβάλλοντας στην μείωση των ηλεκτρικών φορτίων αιχμής του καταναλωτή αλλά και του δικτύου.

Στα μειονεκτήματά τους συγκαταλέγονται το υψηλό αρχικό κόστος επένδυσης, η πολυπλοκότητα της εγκατάστασης, ειδικά για τα μικρής ισχύος συστήματα, η σχετική έλλειψη τεχνογνωσίας και η απαίτηση μεγάλων κατάλληλων επιφανειών για την τοποθέτηση των ηλιακών συλλεκτών. Στην Ελλάδα δραστηριοποιούνται εταιρείες για συστήματα ηλιακού κλιματισμού και ήδη έχουν εγκατασταθεί περί τα 10 συστήματα εμπορικής και πειραματικής φύσεως, συνολικής εγκατεστημένης ψυκτικής ισχύος 1500 kW [5],[6],[7],[8]. Τόσο σε εθνικό όσο και σε ευρωπαϊκό επίπεδο, η πλειονότητα των συστημάτων ηλιακού κλιματισμού φέρει συνδυασμό μονοβάθμιων θερμικών ψυκτών και επίπεδων επιλεκτικών ηλιακών συλλεκτών.



Εικόνα 2: Συστήματα ηλιακού κλιματισμού με θερμικό ψύκτη [4]

Οι διβάθμιοι θερμικοί ψύκτες για την λειτουργία τους απαιτούν θερμό ρευστό προσαγωγής με θερμοκρασία  $> 90^{\circ}\text{C}$ , ενώ για να προσεγγίσουν βαθμό απόδοσης μεγαλύτερο της μονάδας αντίστοιχη θερμοκρασία  $> 120^{\circ}\text{C}$ . Αυτά τα θερμοκρασιακά επίπεδα δύνανται να επιτευχθούν με τη χρήση ΣΘΗ συστημάτων με καταλληλότερη τεχνολογία αυτή της γραμμικής συγκέντρωσης ήτοι παραβολικούς συλλέκτες και συλλέκτες τύπου Fresnel.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να διερευνηθεί η δυνατότητα εφαρμογής ΣΘΗ σε συνδυασμό με θερμικούς διβάθμιους ψύκτες, για κάλυψη των αναγκών σε κλιματισμό στον κτιριακό τομέα. Επιλέχθηκαν τα πλέον διαδομένα είδη μεγάλης κλίμακας κτιρίων στη χώρα, ήτοι κτίρια γραφείων και συγκροτήματος κατοικιών και προσομοιώθηκε η εφαρμογή συστήματος ηλιακού κλιματισμού για τα κλιματικά δεδομένα 4 διαφορετικών πόλεων σε διαφορετικές κλιματικές ζώνες. Η εργασία επικεντρώθηκε στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων καθώς και στην αξιολόγησή τους.

## 2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα προσομοίωσης Greenius [9]. Το Greenius αναπτύχθηκε στο Κέντρο Αεροδιαστημικής Έρευνας της Γερμανίας (DLR) με συγχρηματοδότηση της Γερμανίας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης και αφορά στην υπολογισμό και ανάλυση έργων συγκεντρωτικών θερμικών ηλιακών συστημάτων για ηλεκτροπαραγωγή ή/και βιομηχανικές εφαρμογές. Για τις προσομοιώσεις των φορτίων των κτιρίων σε ωριαία βάση χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Energy Plus Software [10].

### 2.1. Τεχνικά στοιχεία διάταξης ηλιακού κλιματισμού

Για λόγους σύγκρισης αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν κοινός τύπος ηλιακού συλλέκτη, θερμικού ψύκτη και συμβατικού εξοπλισμού στην υπό μελέτη διάταξη του ηλιακού κλιματισμού.

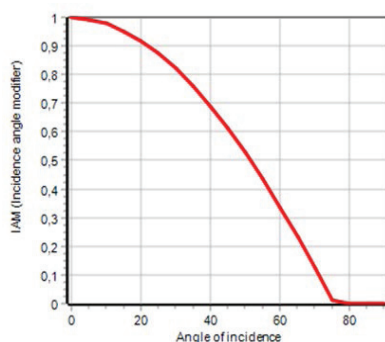
Ο ηλιακός συλλέκτης που χρησιμοποιήθηκε είναι παραβολικού τύπου, εμπορικό προϊόν (Industrial Solar Technology), με καμπύλη συντελεστή γωνίας πρόσπτωσης (IAM) όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 3 και εξίσωση απόδοσης όπως δίδεται στην Εξίσωση 1. Παρέχεται από την βιβλιοθήκη συλλεκτών του προγράμματος προσομοίωσης.

$$\eta_{\text{collector}} = K \cdot \eta_0 - \frac{0,00118 \cdot \Delta T^2}{DNI} \quad (1)$$

όπου

$$K = IAM \cdot \cos\theta$$

$$\Delta T = \frac{T_{in} + T_{out}}{2} - T_{amb}$$



Εικόνα 3: Συντελεστής γωνίας πρόσπτωσης παραβολικού συλλέκτη

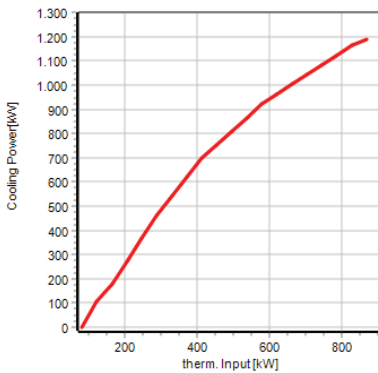
Ο ηλιακός συλλέκτης έχει μήκος 6,10m, πλάτος 2,30m και οπτική απόδοση 71,50%. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του ηλιακού πεδίου φαίνονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Τεχνικά χαρακτηριστικά του ηλιακού πεδίου

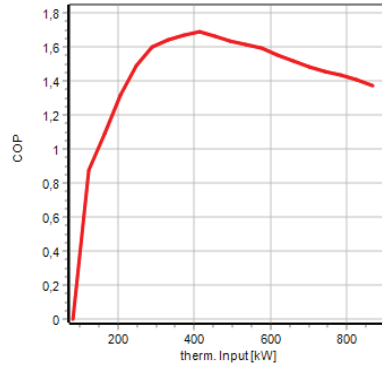
Παράμετρος	Τιμή / χαρακτηριστικό
Αριθμός σειρών πεδίου	13
Αριθμός συλλεκτών / σειρά	10
Επιφάνεια κατόπτρων ηλιακού πεδίου	1716m <sup>2</sup>
Απαιτούμενη επιφάνεια εγκατάστασης	5720m <sup>2</sup>
Συνολικό μήκος «header»	250m
Μέση διάμετρος «header»	0,0072m
Θερμοκρασία ρευστού εξόδου	180 <sup>o</sup> C
Θερμοκρασία ρευστού εισόδου	150 <sup>o</sup> C
Μέσος συντελεστής καθαρότητας κατόπτρων	97%
Θερμομεταφέυρον ρευστό	DOWTHERM A
Μέγιστη θερμοκρασία ρευστού	405 <sup>o</sup> C
Ελάχιστη θερμοκρασία ρευστού	15 <sup>o</sup> C

Ο θερμικός ψύκτης που χρησιμοποιήθηκε είναι διβάθμιος, διαθέσιμος στην αγορά (Broad, model BY5100), ονομαστικής ψυκτικής ισχύος 1163kW. Οι χαρακτηριστικές καμπύλες συντελεστή απόδοσης (COP) και ψυκτικής ισχύος φαίνονται στις Εικόνες 4 και 5, ενώ είναι διαθέσιμος και στην βιβλιοθήκη θερμικών ψυκτών του προγράμματος προσομοίωσης.

Για την ολοκλήρωση της διάταξης ηλιακού κλιματισμού χρησιμοποιήθηκε επίσης συμβατικός λέβητας – καυστήρας πετρελαίου ονομαστικής ισχύος 1000kW και θερμική αποθήκευση ενέργειας ισοδύναμη με 0,1 ώρα πλήρους φορτίου (100kWh).



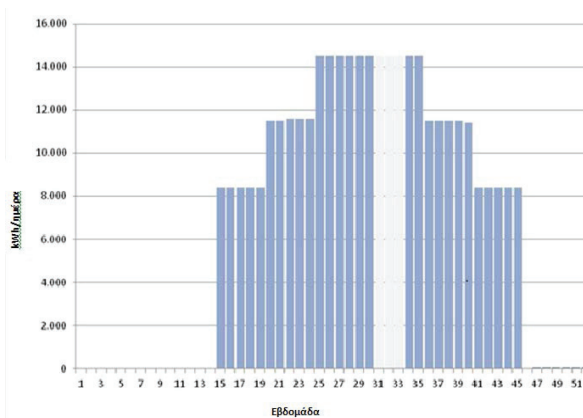
Εικόνα 1 Ψυκτικής ισχύς ηλιακού ψύκτη



Εικόνα 2 COP ηλιακού ψύκτη

## 2.2. Κτίριο γραφείων – Αθήνα

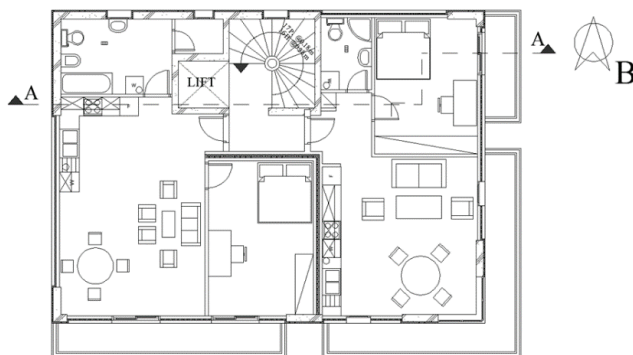
Για την παρούσα εργασία επιλέχθηκε ένα δεκαόροφο κτίριο γραφείων με κλιματιζόμενη επιφάνεια  $9.800\text{m}^2$  μέγιστου ψυκτικού φορτίου  $1200\text{kW}$ , με ώρες λειτουργίας μεταξύ 08:00-20:00. Η κάτοψη του τυπικού ορόφου είναι περίπου  $980\text{m}^2$ . Η ετήσια διακύμανση του φορτίου ψύξης απεικονίζεται στην Εικόνα 10. Το σύστημα προσομοιώθηκε χρησιμοποιώντας αρχεία τυπικού μετεωρολογικού έτους (TMY) για την Αθήνα (38,000N, 23,730E).



Εικόνα 3 Ετήσια μεταβολή ψυκτικού φορτίου κτιρίου.

## 2.3. Συγκρότημα κατοικιών – Ηράκλειο, Αθήνα, Θεσσαλονίκη

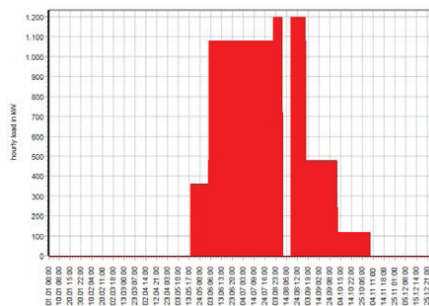
Αναφορικά με το κτιριακό συγκρότημα, θεωρήθηκε ότι αποτελείται από 35 όμοιες τυπικές τριόροφες κατοικίες. Η κάθε τυπική κατοικία αποτελείται από τρεις ορόφους και ένα υπόγειο, και βασίζεται στην τυπολογία ενός κτιρίου που προσομοιάζει στην τυπική ελληνική πολυκατοικία. Το καθαρό ύψος του τυπικού ορόφου είναι  $3\text{m}$  και ο συνολικός θερμαινόμενος χώρος είναι  $400\text{m}^2$ . Στην Εικόνα 11 απεικονίζεται η κάτοψη ενός τυπικού ορόφου κατοικίας του συγκροτήματος.



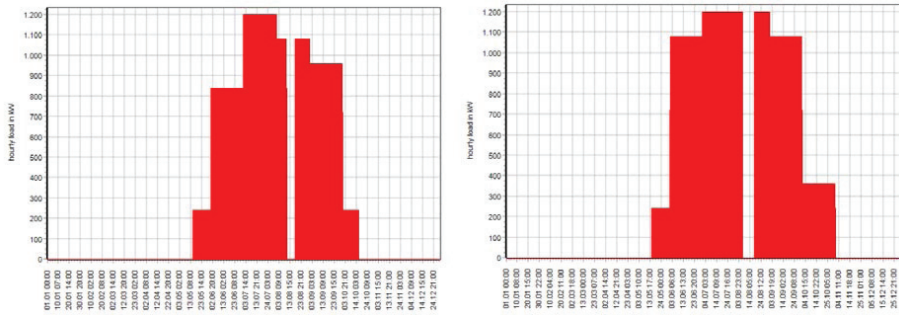
Εικόνα 11 Κάτοψη τυπικού ορόφου κτιρίου.

Το σύστημα θέρμανσης του κτιρίου αποτελείται από έναν συμβατικό λέβητα πετρελαίου, ενώ η ψύξη πραγματοποιείται με τοπικές αντλίες θερμότητας (κλιματιστικά δωματίου τοίχου). Σύμφωνα με τον ισχύοντα Κανονισμό για την Ενεργειακή Απόδοση των Κτιρίων (ΚΕΝΑΚ), ο οποίος δημοσιεύθηκε το 2010, σε εφαρμογή της Οδηγίας 2010/31/ΕΚ, θεωρείται ότι το κτίριο ψύχεται στο 50% της συνολικής επιφάνειάς του, με τον θερμοστατικό έλεγχο καθορισμένο στους 26°C για 18 ώρες την ημέρα. Όλες οι άλλες παράμετροι που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση ελήφθησαν επίσης σύμφωνα με τον ΚΕΝΑΚ.

Η ανάλυση υλοποιήθηκε για το ίδιο συγκρότημα κατοικιών στις τρεις μεγαλύτερες πόλεις της Ελλάδας – από άποψη πληθυσμού – τριών διαφορετικών κλιματικών ζωνών στην χώρα, όπως ορίζονται στο ΚΕΝΑΚ, και συγκεκριμένα στο Ηράκλειο (κλιματική ζώνη Α, 35,20° N, 25,08° E), στην Αθήνα (κλιματική ζώνη Β, 37,50° N, 23,45° E) και στη Θεσσαλονίκη (κλιματική ζώνη Γ, 40,30° N, 22,58° E). Δεν εξετάστηκε κλιματική ζώνη Δ, επειδή τα ψυκτικά φορτία είναι πρακτικά αμελητέα. Οι ενεργειακές ανάγκες για την κάλυψη των ψυκτικών αναγκών της κάθε κατοικίας σε ωριαία βάση στις διαφορετικές πόλεις της Ελλάδας παρουσιάζονται στην Εικόνα 12 και στην Εικόνα 13.



Εικόνα 12 Ωριαία ψυκτικά φορτία κατοικίας για την Θεσσαλονίκη.

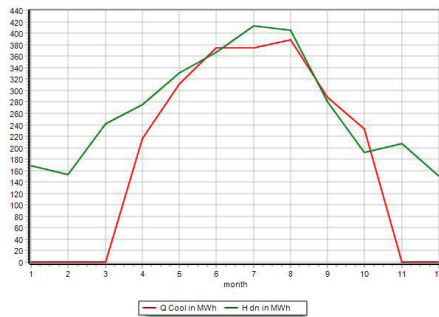


Εικόνα 13 Ωριαία ψυκτικά φορτία κατοικίας για την Αθήνα και το Ηράκλειο

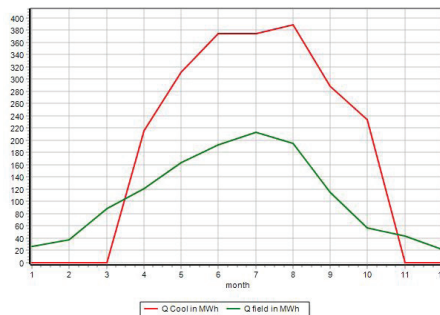
### 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

#### 3.1. Κτίριο γραφείων – Αθήνα

Αναφορικά με τη διερεύνηση του συστήματος ηλιακού κλιματισμού, με συνδυασμό παραβολικών ηλιακών συλλεκτών και διβάθμιοι θερμικού ψύκτη, σε κτίριο γραφείων στην Αθήνα, παρουσιάζεται στην Εικόνα 14 η μεταβολή της ψυκτικής ενέργειας που παρέχει ο ψύκτης απορρόφησης (σε MWh) κατά την διάρκεια του έτους, συναρτήσει της μεταβολής της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας (DNI) στην επιφάνεια του συλλέκτη (σε MWh). Στην Εικόνα 15 παρουσιάζεται η μεταβολή της θερμικής ενέργειας στην έξοδο του πεδίου των ηλιακών συλλεκτών ( $Q_{field}$ ) σε συνάρτηση με την αποδιδόμενη ψυκτική ενέργεια του ψύκτη απορρόφησης ( $Q_{cool}$ ).



Εικόνα 14 Μεταβολή ψυκτικής ενέργειας συναρτήσει DNI.



Εικόνα 15 Μεταβολή θερμικής ενέργειας ηλιακού πεδίου συναρτήσει της αποδιδόμενης ψύξης.

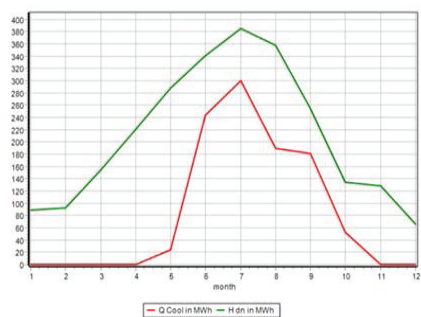
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για ένα λειτουργικό έτος φαίνονται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2. Αποτελέσματα προσομοίωσης συστήματος ηλιακού κλιματισμού σε κτίριο γραφείων /Αθήνα

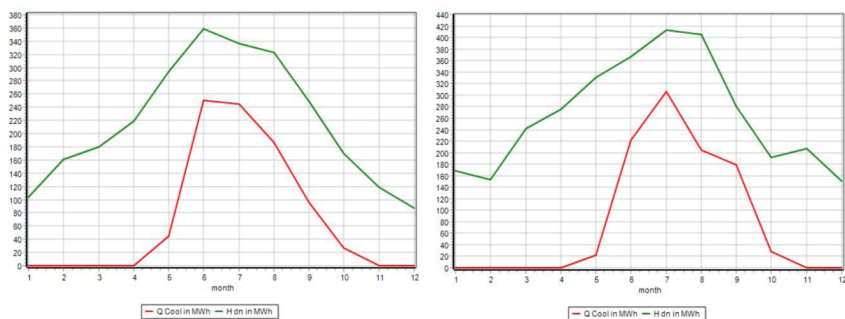
Παράμετρος	Τιμή / χαρακτηριστικό
Θερμική ενέργεια στην έξοδο του πεδίου ηλιακών συλλεκτών (MWh/έτος)	1.296,83
Αποδιδόμενη ψυκτική ενέργεια (MWh/έτος)	2.185,93
Ποσοστό ηλιακής κάλυψης (%)	49

### 3.2. Συγκρότημα κατοικιών – Ηράκλειο, Αθήνα, Θεσσαλονίκη

Αναφορικά με την διερεύνηση συστήματος ηλιακού κλιματισμού με συνδυασμό παραβολικών ηλιακών συλλεκτών και διβάθμιοι θερμικού ψύκτη, σε συγκρότημα κατοικιών στο Ηράκλειο, στην Αθήνα και στην Θεσσαλονίκη, παρουσιάζεται στην Εικόνα 16 και στην Εικόνα 17 η μεταβολή της αποδιδόμενης ψυκτικής ενέργειας του ψύκτη (σε MWh) σε ετήσια βάση, σε σχέση με την άμεση ηλιακή ακτινοβολία (DNI) στην επιφάνεια του συλλέκτη (σε MWh).

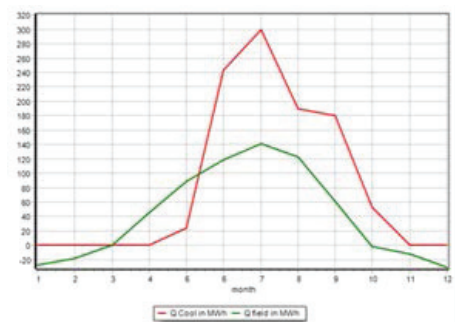


Εικόνα 16 Μεταβολή ψυκτικής ενέργειας συναρτήσει DNI για Ηράκλειο.

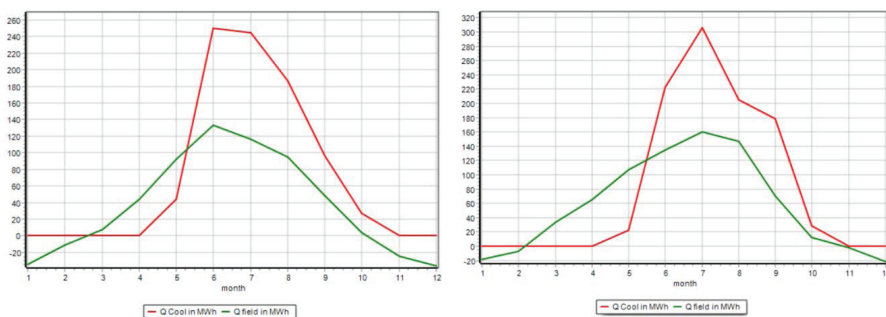


Εικόνα 17 Μεταβολή ψυκτικής ενέργειας συναρτήσει DNI για Θεσσαλονίκη και Αθήνα.

Στην Εικόνα 18 και στην Εικόνα 19 απεικονίζεται η μεταβολή της θερμικής ενέργειας στην έξοδο του ηλιακού πεδίου σε σχέση με την παραγόμενη ενέργεια ψύξης από τον ηλιακό ψύκτη, όπου αναδεικνύεται η σύμπτωση αιχμής φορτίου και διαθέσιμης ηλιακής ενέργειας ήτοι παραγόμενης θερμικής ενέργειας από το ηλιακό πεδίο, για τις τρεις πόλεις της παρούσας μελέτης.



Εικόνα 18 Μεταβολή θερμικής ενέργειας ηλιακού πεδίου συναρτήσει της αποδιδόμενης ψύξης για Ηράκλειο.



Εικόνα 19 Μεταβολή θερμικής ενέργειας ηλιακού πεδίου συναρτήσει της αποδιδόμενης ψύξης για Αθήνα και Θεσσαλονίκη.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για ένα τυπικό έτος λειτουργίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3. Αποτελέσματα προσομοίωσης για τυπικό έτος λειτουργίας

Παράμετρος	Θεσ/νίκη Τιμή	Αθήνα Τιμή	Ηράκλειο Τιμή
Θερμική ενέργεια στην έξοδο του πεδίου ηλιακών συλλεκτών (MWh/έτος)	706,10	912,33	840,38
Αποδιδόμενη ψυκτική ενέργεια (MWh/έτος)	845,59	963,20	1.050,96
Ποσοστό ηλιακής κάλυψης (%)	66,7	74,7	67,1

Η συνολική επιφάνεια του πεδίου των παραβολικών ΣΘΗ ηλιακών συλλεκτών που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του συστήματος ηλιακού κλιματισμού σε όλες τις περιπτώσεις της παρούσας μελέτης είναι  $1.716\text{m}^2$ . Λαμβάνοντας υπ' όψιν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων εξάγεται το συμπέρασμα ότι η ανηγμένη αποδιδόμενη θερμική ενέργεια για τον συγκεκριμένο παραβολικό συλλέκτη είναι  $755,7\text{ kWh/m}^2$  για την περίπτωση του κτιρίου γραφείων στην Αθήνα,  $411,48\text{ kWh/m}^2$  για την περίπτωση του συγκροτήματος κατοικιών στη Θεσσαλονίκη,  $531,6\text{ kWh/m}^2$  για την ίδια περίπτωση Αθήνα και  $489,7\text{ kWh/m}^2$  για την ίδια περίπτωση στο Ηράκλειο.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για την πόλη της Αθήνας με ΣΘΗ (περίπτωση Α) με δημοσιευμένα ερευνητικά αποτελέσματα (περίπτωση Β) (για το έτος 2012, για το μήνα Ιούλιο), που

αφορούν σύστημα ηλιακού κλιματισμού, με επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες και μονοβάθμιο ηλιακό ψύκτη [11], προκύπτουν τα αποτελέσματα του Πίνακα 4.

*Πίνακας 4. Σύγκριση ενεργειακής απολαβής για σύστημα ηλιακού κλιματισμού με συγκεντρωτικούς και με επίπεδους συλλέκτες, για κτίρια γραφείων και κατοικιών στην Αθήνα*

Εφαρμογή	Θερμική ενέργεια στην έξοδο του πεδίου (kWh/m <sup>2</sup> ) / Αθήνα / Ιούλιος	
	Περίπτωση Α ΣΘΗ	Περίπτωση Β Επίπεδοι συλλέκτες
Κτίριο γραφείων	125,7	78,9
Συγκρότημα κατοικιών	178,3	78,9

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή διερευνήθηκε η δυνατότητα χρήσης των ΣΘΗ σε εφαρμογή ηλιακού κλιματισμού, τεχνολογίας διβάθμιου ψύκτη απορρόφησης κλειστού κύκλου, σε συνδυασμό με παραβολικούς συλλέκτες για τις περιπτώσεις ενός κτιρίου γραφείων στην Αθήνα και ενός συγκροτήματος κατοικιών στο Ηράκλειο, στην Αθήνα και στη Θεσσαλονίκη.

Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων προκύπτει ότι η χρήση ΣΘΗ μπορεί να αποδώσει σημαντικά υψηλότερες θερμοκρασίες απαγωγής στο πεδίο και επομένως υψηλότερα ποσά θερμικής ενέργειας ανά m<sup>2</sup> συλλεκτικής επιφάνειας σε σχέση με τους επίπεδους συλλέκτες ή και τους συλλέκτες κενού. Η παράμετρος αυτή, εκτός από την προφανή επίδραση που έχει στη βελτίωση του συντελεστή απόδοσης του θερμικού ψύκτη, έχει και μία ακόμη ιδιαίτερα σημαντική συνέπεια: επιτρέπει τη μείωση της απαιτούμενης εγκατεστημένης επιφάνειας του ηλιακού πεδίου, για την επίτευξη της ίδιας ψυκτικής ισχύος, σε σχέση με ένα ηλιακό πεδίο επίπεδων συλλεκτών

Ειδικά για τον τομέα του ηλιακού κλιματισμού κτιρίων, ο οποίος αφορά κυρίως εγκαταστάσεις σε δομημένο περιβάλλον, η μείωση της απαιτούμενης εγκατεστημένης επιφάνειας του ηλιακού πεδίου, είναι σημαντική καθώς η διαθέσιμη επιφάνεια είναι ένα ουσιώδες μέγεθος, που δεν είναι πάντα διαθέσιμο στον απαιτούμενο βαθμό. Πέραν τούτου, η μείωση της απαιτούμενης συλλεκτικής επιφάνειας αντανακλάται στη μείωση του συνολικού κόστους της επένδυσης, λόγω μικρότερης απαιτούμενης επιφάνειας γης, μειωμένου κόστους εγκατάστασης, λιγότερων υλικών υδραυλικού κυκλώματος, εργασιών και υλικών συντήρησης όπως επίσης και μικρότερη αισθητική όχληση.

Θερμοδυναμικά η σημαντικότερη επίπτωση είναι το γεγονός ότι η χρήση των συγκεντρωτικών ηλιακών συλλεκτών επιτρέπει την ενσωμάτωση διβάθμιων θερμικών ψυκτών σε συστήματα ηλιακού κλιματισμού, οι οποίοι απαιτούν για την λειτουργία τους θερμοκρασίες εισόδου > 100<sup>ο</sup>C. Ένας διβάθμιος ψύκτης απορρόφησης λειτουργεί με υψηλότερο συντελεστή απόδοσης σε σχέση με τους μονοβάθμιους ψύκτες - με τους οποίους παραδοσιακά λειτουργούν οι επίπεδοι και οι συλλέκτες κενού - των οποίων ο συντελεστής απόδοσης είναι σημαντικά χαμηλότερος της μονάδας.

Από τα αποτελέσματα συνάγεται ότι η χρήση των ΣΘΗ είναι ενεργειακά αποδοτική, διαθέτοντας περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα έναντι των αντίστοιχων συμβατικών τεχνολογιών. Παράμετροι κόστους τους, τεχνογνωσίας και βελτίωσης της ανταγωνιστικότητάς τους αποτελούν αντικείμενα περαιτέρω διερεύνησης, που είναι απαραίτητη ώστε αυτές οι εφαρμογές να αποκτήσουν και εμπορικό ενδιαφέρον

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] CSP World. <http://www.csp-world.com>. Ημ. ανάκτησης: 13-11-2017.
- [2] EU-SOLARIS project- Brochure [www.eusolaris.eu](http://www.eusolaris.eu). Ημ. ανάκτησης 14-11-2017.
- [3] "Solar Thermal Electricity Global Outlook 2016 Executive Summary," Published by: SolarPACES, Greenpeace International, ESTELA.
- [4] SOLCO project – Brochure
- [5] Tsekouras, P., Drosou, V., Tzivanidis, C., Antonopoulos, K.A., (2014) Experimental results of a solar absorption cooling plant in Greece, International Journal of Sustainable Energy, DOI: 10.1080/14786451.2014.899229.
- [6] 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.
- [7] Tsoutsos, T., Karagiorgas, M., Zidianakis, G., Drosou, V., Aidonis, A., Gouskos, Z., Moese, C., (2009) Development of the applications of solar thermal cooling systems in Greece and Cyprus. Fresenius Environmental Bulletin, 18(7b), pp 1367-1380.
- [8] Maintenance experience from solar assisted air conditioning installations in Greece. V. Drosou, P. Lamaris, G. Vokas, Ph. Skittides. In: Proceedings of the 2nd International Conference on Solar Air Conditioning, Tarragona, Spain, October 18-19, 2007, edited by OTTI., 2007, p.p.129-139.
- [9] Greenius – The green energy system analysis tool. <http://freegreenius.dlr.de/>.
- [10] ENERGY PLUS, Version 7.1, Documentation, October 2011
- [11] Tsekouras, P., Drosou, V., Tzivanidis, C., Antonopoulos, K.A., (2014). Experimental results of a solar absorption cooling plant in Greece, International Journal of Sustainable Energy, (35)4, 309-322.

## ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ ΚΑΙ ΚΑΥΣΤΗΡΑ ΒΙΟΜΑΖΑΣ, ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ CARNOT, ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΛΥΨΗ ΤΩΝ ΑΝΑΓΚΩΝ ΣΕ ΖΕΣΤΟ ΝΕΡΟ ΧΡΗΣΗΣ ΣΕ ΕΝΟΙΚΙΑΖΟΜΕΝΑ ΔΩΜΑΤΙΑ ΣΤΟ ΣΙΔΑΡΙ ΤΗΣ ΚΕΡΚΥΡΑΣ

Σ. Χ. Αλεξόπουλος<sup>1\*</sup>, Γ. Γαβριηλίδης<sup>2</sup>, Χ. Παπασπήλιου<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup> Fachbereich Energietechnik, Aachen University of Applied Sciences, Solar-Institut Jülich (SIJ), Heinrich-Mußmann-Str. 5, D-52428 Jülich, e-mail: alexopoulos@sij.fh-aachen.de

<sup>2</sup> Μηχανολόγος Μηχανικός Τ.Ε., Α.Τ.Ε.Ι. Δυτικής Ελλάδας (Πάτρα), Μεταπτυχιακό στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Α.Τ.Ε.Ι. Δυτικής Ελλάδας (Πάτρα)

<sup>3</sup> Ιδιοκτήτης ενοικιαζόμενων δωματίων στο Σιδάρι της Κέρκυρας

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Με την βοήθεια του προγράμματος CARNOT δημιουργήθηκε ένα υβριδικό σύστημα, το οποίο αποτελείται από ηλιακούς συλλέκτες και καυστήρα βιομάζας, για την κάλυψη των αναγκών σε ζεστό νερό χρήσης (Ζ.Ν.Χ.) σε ενοικιαζόμενα δωμάτια στο Σιδάρι της Κέρκυρας, στην Ελλάδα. Το πρόγραμμα CARNOT είναι ένα λογισμικό εργαλείο για την προσομοίωση θερμικών συστημάτων τόσο με συμβατικά όσο και με ανανεώσιμα εξαρτήματα. Έχει την δυνατότητα να προσομοιώνει συστήματα με διάφορα βήματα (ημερήσια, ωριαία, ανά δευτερόλεπτο), ανάλογα τις ανάγκες και τον προγραμματισμό του χρήστη.

Με το μοντέλο που δημιουργήθηκε, έγιναν 3 προσομοιώσεις:

- για τον ήδη υπάρχον καυστήρα πετρελαίου
- για υβριδικό σύστημα με παράλληλη εγκατάσταση ηλιακών συλλεκτών

Στο πλαίσιο αυτό έγινε ο υπολογισμός της συλλεκτικής επιφάνειας των ηλιακών συλλεκτών που απαιτούνται, έτσι ώστε να έχουν μια ελάχιστη κάλυψη κατά 60%

- για υβριδικό σύστημα με την ίδια επιφάνεια ηλιακών συλλεκτών, αλλά με καυστήρα πέλλετ ξύλου (βιομάζα), ίδιας ισχύος με τον καυστήρα πετρελαίου

Σε αυτή την περίπτωση υπολογίστηκε η τιμή και η ποσότητα των πέλλετ ξύλων που απαιτούνται για να θερμάνουν το νερό χρήσης των ενοικιαζόμενων δωματίων.

Η προσομοίωση έγινε κάθε δευτερόλεπτο του μήνα λειτουργίας των ενοικιαζόμενων δωματίων, αλλά λόγω του μεγάλου όγκου δεδομένων, τα αποτελέσματα παρουσιάστηκαν για κάποιες χαρακτηριστικές ημέρες, και για το σύνολο κάθε μήνα ξεχωριστά.

**Λέξεις Κλειδιά:** Υβριδικό σύστημα, πρόγραμμα CARNOT, ζεστό νερό χρήσης, ηλιακός συλλέκτης

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

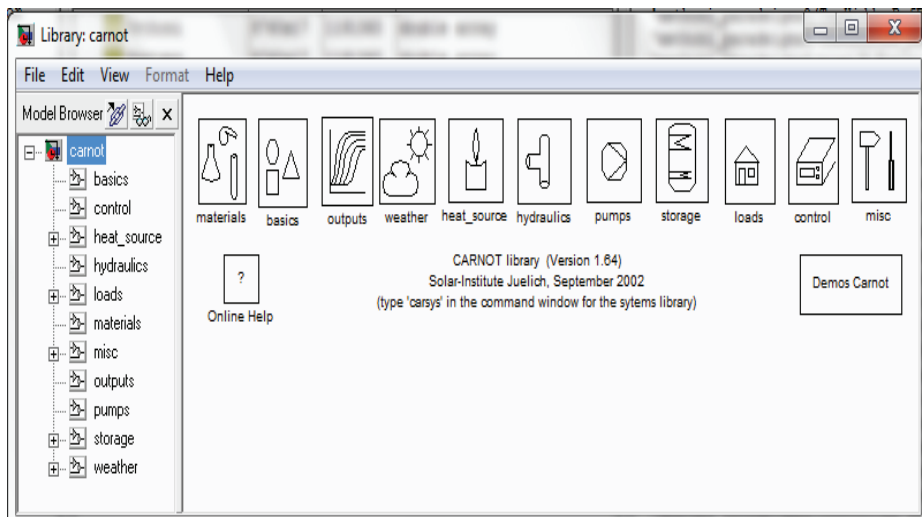
Με την βοήθεια του προγράμματος CARNOT δημιουργήθηκε ένα υβριδικό σύστημα, το οποίο αποτελείται από ηλιακούς συλλέκτες και καυστήρα βιομάζας, για την κάλυψη των αναγκών σε ζεστό νερό χρήσης (Ζ.Ν.Χ.) σε ενοικιαζόμενα δωμάτια στο Σιδάρι της Κέρκυρας, στην Ελλάδα [1]. Το ξενοδοχείο λειτουργεί κάθε χρόνο μόνο το καλοκαίρι, από τις αρχές Μαΐου μέχρι τα τέλη Οκτωβρίου. Για το λόγο αυτό δεν απαιτείται θέρμανση χώρου αλλά μόνο θέρμανση νερού για οικιακή χρήση.

## 2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Για την δημιουργία του μοντέλου προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκαν δύο λογισμικά προγράμματα, τα οποία περιγράφονται παρακάτω. Τα προγράμματα αυτά είναι: το C.A.R.N.O.T. και το Meteororm4.

### 2.1. Λογισμικό πρόγραμμα C.A.R.N.O.T.

Το πρόγραμμα C.A.R.N.O.T. [2] [3] είναι ένα λογισμικό εργαλείο για την προσομοίωση θερμικών συστημάτων με συμβατικά και ανανεώσιμα συστατικά για το περιβάλλον του MATLAB®-Simulink®. Αναπτύχθηκε και εξελίσσεται από το Solar-Institut Jülich, στην Γερμανία, και διατίθεται από τον Νοέμβριο του 1999. Τα δομικά διαγράμματα (blocks) του C.A.R.N.O.T. είναι οργανωμένα ως αρθρωτή βιβλιοθήκη παρόμοια με την τυπική βιβλιοθήκη του Simulink®. Περιέχει δύο βιβλιοθήκες, τη βιβλιοθήκη Carnot και την βιβλιοθήκη Carsys.



Εικ.2.1: Βιβλιοθήκη Carnot

Η βιβλιοθήκη Carnot, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.1, περιλαμβάνει 11 διαφορετικά δομικά διαγράμματα, με τα αντίστοιχα στοιχεία τους, προκειμένου να διευκολυνθεί η μοντελοποίηση. Αυτά τα δομικά διαγράμματα περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων βασικά πρότυπα καιρού, πηγές θερμότητας υδραυλικά στοιχεία που βρίσκονται σε συστήματα θέρμανσης κατοικιών, όπως σωλήνες, βαλβίδες και εκτροπείς ροής.

Η βιβλιοθήκη Carsys είναι παρόμοια με τη βιβλιοθήκη Carnot, αλλά όλα τα στοιχεία έχουν τα σύνολα παραμέτρων των κατασκευαστών. Αυτό σημαίνει ότι η βιβλιοθήκη του Carsys απευθύνεται σε πιο εφαρμοσμένη και πρακτική χρήση στον προγραμματισμό, στο σχεδιασμό του συστήματος, στις οικονομικές αναλύσεις κλπ.

Τα δομικά διαγράμματα (blocks) συνδέονται μεταξύ τους με γραμμές, όπως στην περίπτωση του Simulink<sup>®</sup>, οι οποίες ονομάζονται THV (Thermo-Hydraulic Vector). Το THV μεταφέρει όλες τις απαραίτητες θερμικές και υδραυλικές πληροφορίες από το ένα μπλοκ στο άλλο.

Έχει γίνει βασική επικύρωση για τα μπλοκ CARNOT και έχει γίνει και σύγκριση με άλλα προγράμματα προσομοίωσης. Το μοντέλο του ηλιακού συλλέκτη ελέγχθηκε με τα αποτελέσματα προηγούμενων προσομοιώσεων TRNSYS του Solar Campus Juelich, όπου χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο συλλογής Isakson (Τύπος 101). Η διαφορά στην ετήσια παραδοθείσα ενέργεια μεταξύ των μοντέλων ήταν μικρότερη από 2%. Το μοντέλο αποθήκευσης με εναλλάκτη θερμότητας ελέγχθηκε με μοντέλα TRNSYS και παρουσιάζουν ετήσια ενεργειακή διαφορά αποθήκευσης περίπου 3% [2].

## 2.2. Λογισμικό πρόγραμμα Meteorm4

Το Meteorm4 [4] είναι ένα λογισμικό πρόγραμμα μετεωρολογικής βάσης δεδομένων που περιέχει κλιματολογικά δεδομένα για εφαρμογές ηλιακής μηχανικής από όλο τον κόσμο. Το πρόγραμμα συνεργάζεται με περισσότερους από 8325 μετεωρολογικούς σταθμούς και 5 γεωστατικούς δορυφόρους και τα μοντέλα παρεμβολής του παρέχουν τα παγκόσμια δεδομένα με την υψηλότερη ακρίβεια. Στην Ελλάδα, το Meteorm4 έχει περισσότερους από 30 μετεωρολογικούς σταθμούς, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (Εικ. 2.2).



Εικ. 2.2: Μετεωρολογικοί σταθμοί του Meteorm4 στην Ελλάδα

Το Meteorm4 διαθέτει περισσότερες από 30 παραμέτρους που αφορούν την ακτινοβολία και τη θερμοκρασία κάθε περιοχής. Οι σημαντικότερες από αυτές είναι: η άμεση και διάχυτη ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο, η οριζόντια παγκόσμια ακτινοβολία, ο δείκτης σύννεφων, η κατεύθυνση και η ταχύτητα του ανέμου, η βροχόπτωση, η σχετική υγρασία, η πίεση του αέρα, η εκπομπή στο οριζόντιο και το κατακόρυφο επίπεδο, το ύψος του ήλιου, το αζιμούθιο του ήλιου και άλλα.

## 2.3. Δημιουργία του μοντέλου προσομοίωσης με το πρόγραμμα C.A.R.N.O.T.

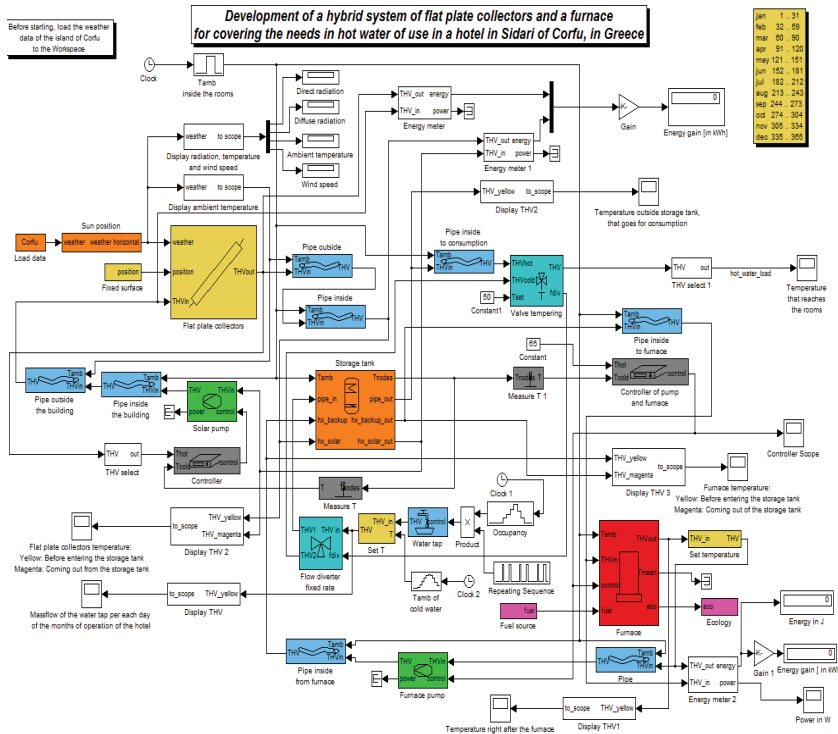
Στην παρακάτω εικόνα (Εικ. 2.3) φαίνεται το μοντέλο προσομοίωσης που δημιουργήθηκε στο πρόγραμμα C.A.R.N.O.T. Στο σύστημα διακρίνονται οι ηλιακοί συλλέκτες, οι σωληνώσεις (εσωτερικές και εξωτερικές), ο αποθηκευτής θερμότητας, ο καυστήρας και οι αντλίες.

Το υβριδικό σύστημα αποτελείται από τρεις διαφορετικούς κύκλους: ο πρώτος είναι ο κλειστός κύκλος των επιπέδων συλλεκτών, ο δεύτερος ο λέβητας και ο καυστήρας και ο τρίτος είναι ο ανοικτός κύκλος της κατανάλωσης ζεστού νερού χρήσης.

Η θερμοκρασία περιβάλλοντος των εξωτερικών σωληνών λαμβάνεται από τα ωριαία δεδομένα, όπως αυτά εξήχθησαν από το πρόγραμμα Meteorm4, ενώ οι θερμοκρασίες των δομικών διαγραμμάτων

(blocks), όπως οι εσωτερικοί σωλήνες, η δεξαμενή αποθήκευσης και ο καυστήρας, που προστατεύονται από τις εξωτερικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή, παίρνουν τις τιμές τους από ένα διαφορικό δομικό διάγραμμα, που ονομάζεται "Tamb μέσα στο δωμάτιο". Αυτό το δομικό διάγραμμα περιλαμβάνει τις μηνιαίες θερμοκρασίες των εσωτερικών χώρων, όπως αυτές καθορίστηκαν από το Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος (Τ.Ο.Τ.Ε.Ε.) [5], για ξενοδοχείο εποχικής λειτουργίας. Ειδικότερα, για ένα ξενοδοχείο εποχικής καλοκαιρινής λειτουργίας κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου, η εσωτερική θερμοκρασία ορίζεται στους 20°C, ενώ κατά τη θερινή περίοδο αυτή η θερμοκρασία είναι ίση με 26°C.

Για την συλλογή των αναγκαίων πληροφοριών (πληρότητα ξενοδοχείου, υπάρχουν σύστημα θέρμανσης του νερού κ.α.) ένα ερωτηματολόγιο δημιουργήθηκε και στάλθηκε στον ιδιοκτήτη του ξενοδοχείου. Λίγο πριν τη βρύση υπάρχει ένας πολλαπλασιασμός της επαναλαμβανόμενης ακολουθίας (που περιέχει τις ώρες αιχμής κατανάλωσης, όπως αποκτήθηκαν από το ερωτηματολόγιο), με την πληρότητα του ξενοδοχείου για κάθε μήνα λειτουργίας.



Εικ. 2.3: Πρόγραμμα προσομοίωσης του υβριδικού συστήματος, με το πρόγραμμα C.A.R.N.O.T.

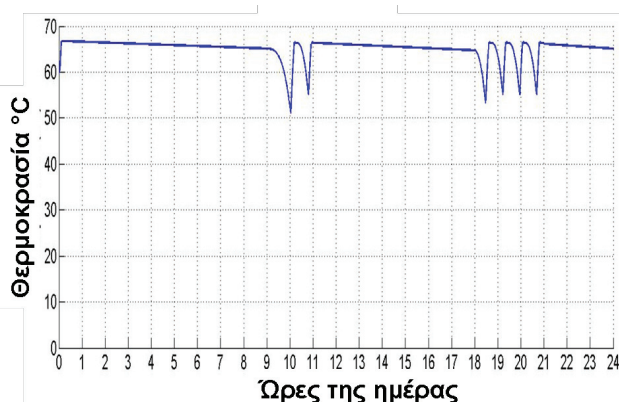
Η θερμοκρασία περιβάλλοντος του νερού στη βρύση δεν είναι η ίδια για κάθε μήνα. Για το λόγο αυτό, μετά το δομικό διάγραμμα παροχής νερού, υπάρχουν δύο δομικά διαγράμματα, το "Tamb κρύου νερού" και το "Set T". Το δομικό διάγραμμα "Tamb κρύου νερού" περιλαμβάνει την θερμοκρασία περιβάλλοντος του δικτύου ύδρευσης για κάθε μήνα του έτους όπως αποκτήθηκε από τον ΕΛΟΤ 1291 (Εθνικός Οργανισμός Τυποποίησης στην Ελλάδα) [6] και περιγράφεται λεπτομερώς από το Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος (ΤΟΤΕΕ) [7]. Το δομικό διάγραμμα "Set T" ρυθμίζει κάθε μήνα την κατάλληλη θερμοκρασία του κρύου νερού στον ανοικτό κύκλο κατανάλωσης.

### 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

#### 3.1. Υπάρχων σύστημα καυστήρα πετρελαίου

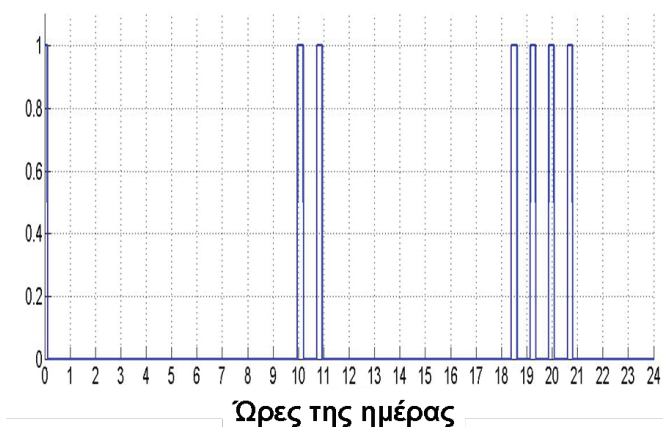
Ο υπάρχων καυστήρας του ξενοδοχείου καίει πετρέλαιο ως καύσιμο. Το υπάρχων σύστημα εξετάστηκε λεπτομερώς για δύο διαφορετικές μέρες [1]. Ενδεικτικά παρουσιάζονται εδώ ορισμένα αποτελέσματα για μια μέρα του Αυγούστου με 100% ποσοστό πληρότητας του ξενοδοχείου.

Στην Εικ. 3.1 παρουσιάζεται η θερμοκρασία της δεξαμενής αποθήκευσης για την 4 Αυγούστου.



Εικ. 3.1: Θερμοκρασία της δεξαμενής αποθήκευσης για την 4 Αυγούστου

Λόγω των μειωμένων απωλειών στη δεξαμενή, η θερμοκρασία στη δεξαμενή αποθήκευσης δεν μειώνεται σημαντικά κατά τη διάρκεια της νύχτας. Στις 09:00 λόγω της αυξημένης ζήτησης σε ζεστό νερό, το ψυχρό νερό εισέρχεται στη δεξαμενή αποθήκευσης και η συνολική θερμοκρασία αρχίζει να μειώνεται. Όταν η θερμοκρασία φτάσει σε κρίσιμο επίπεδο, τότε, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2, ο καυστήρας αρχίζει να λειτουργεί, για να διατηρηθεί η θερμοκρασία της δεξαμενής αποθήκευσης πάντα πάνω από 50°C.

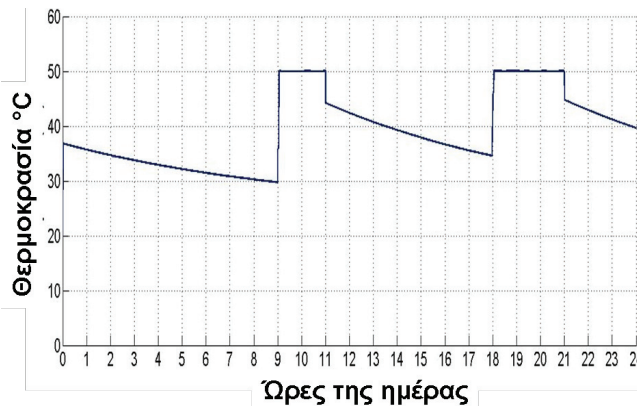


Εικ. 3.2: Ώρες λειτουργίας του καυστήρα πετρελαίου για την 4 Αυγούστου

Στις 11:00, όταν η ζήτηση ζεστού νερού σταματά (σύμφωνα με τις ώρες αιχμής των καταναλώσεων που δηλώθηκαν από τον ιδιοκτήτη του ξενοδοχείου), η δεξαμενή αποκαθιστά την αρχική υψηλή θερμοκρασία και ο καυστήρας τίθεται εκτός λειτουργίας.

Στις 18:00 και μέχρι τις 21:00 απαιτείται περισσότερο ζεστό νερό από τους κατοίκους του ξενοδοχείου. Αυτός είναι ο λόγος που το κρύο νερό εισάγεται στη δεξαμενή αποθήκευσης και μειώνει την αρχική θερμοκρασία. Μια ακόμη φορά, ο καυστήρας πετρελαίου αρχίζει να λειτουργεί, ώστε να κρατηθεί η θερμοκρασία της δεξαμενής αποθήκευσης πάνω από 50°C. Στις 21:00 δεν υπάρχει ζήτηση ζεστού νερού και ο καυστήρας σταματά να λειτουργεί, ενώ στη δεξαμενή αποκαθίσταται η αρχική υψηλή θερμοκρασία.

Η Εικ. 3.3 δείχνει τη θερμοκρασία του ζεστού νερού για τα δωμάτια για την 4 Αυγούστου. Αξίζει να σημειωθεί ότι κατά τις ώρες αιχμής της κατανάλωσης (09:00 - 11:00 και 18:00 - 21:00), αν και το ξενοδοχείο έχει 100% πληρότητα και 1800 λίτρα ζεστό νερό κατανάλωση ανά ημέρα, η θερμοκρασία που φτάνει στο δωμάτιο κατά τη διάρκεια αυτών των ωρών αιχμής είναι σταθερή στους 50°C, όπως ζητείται από την Τ.Ο.Τ.Ε.Ε.

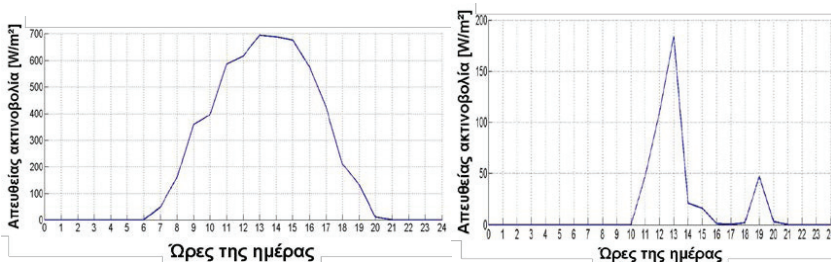


Εικ. 3.3: Θερμοκρασία του ζεστού νερού για τα δωμάτια για την 4 Αυγούστου

### 3.2. Καυστήρας πετρελαίου με προσθήκη ηλιακών συλλεκτών

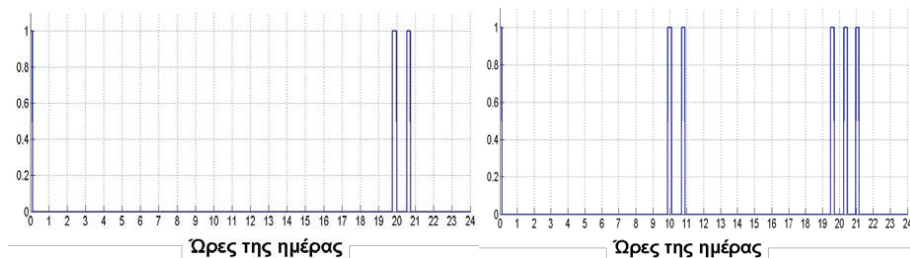
Η συνολική επιφάνεια των επίπεδων συλλεκτών που απαιτούνται για να επιτευχθεί τουλάχιστον 60% λόγος κάλυψης είναι 22 m<sup>2</sup>. Ο υπόλοιπος λόγος κάλυψης σχεδιάστηκε να παρασχεθεί από τον καυστήρα πετρελαίου, προκειμένου να καλύψει πλήρως τις ανάγκες χρήσης ζεστού νερού για το ξενοδοχείο.

Η εικόνα 3.4 δείχνει την απευθείας ηλιακή ακτινοβολία για την 3 και 4 Αυγούστου. Στις 3 Αυγούστου η ηλιακή ακτινοβολία είναι ικανοποιητική και φτάνει το μέγιστο των 700 W/m<sup>2</sup>. Η 4 Αυγούστου (εικόνα 3.4 δεξιά) ήταν μια συννεφιασμένη μέρα και η ακτινοβολία δεν ξεπέρασε τα 180 W/m<sup>2</sup>. Σε αυτή την περίπτωση δεν επιτυγχάνεται η αισθητή άνοδος της θερμοκρασίας της δεξαμενής αποθήκευσης και είναι απαραίτητη η χρήση του καυστήρα πετρελαίου (βλέπε εικόνα 3.5).



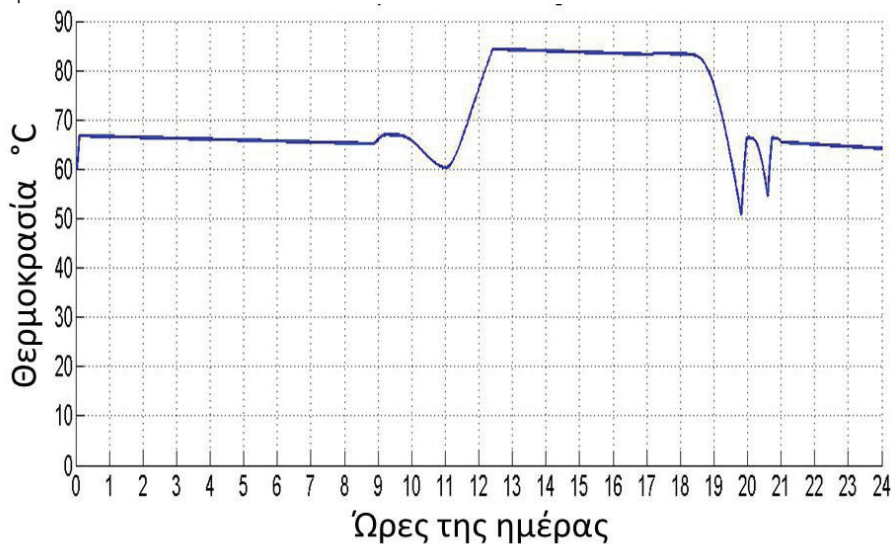
Εικ. 3.4: Απευθείας ηλιακή ακτινοβολία για την 3 και 4 Αυγούστου (αριστερά και δεξιά αντίστοιχα)

Σε σύγκριση με τη χρήση του υπάρχοντος συστήματος καυστήρα πετρελαίου χρειάζονται λιγότερες ώρες λειτουργίας του καυστήρα όταν συνδυάζεται με ηλιακούς συλλέκτες. Αυτό ισχύει κυρίως για ημέρες με μεγάλη ηλιοφάνεια (βλέπε εικόνα 3.5 αριστερά), αλλά ακόμη ως ένα βαθμό και για συννεφιασμένες μέρες (βλέπε εικόνα 3.5 δεξιά).



Εικ. 3.5: Ώρες λειτουργίας του καυστήρα πετρελαίου για την 3 και 4 Αυγούστου (αριστερά και δεξιά αντίστοιχα)

Η επόμενη εικόνα 3.6 δείχνει τη θερμοκρασία του αποθηκευτή θερμότητας για την τρίτη ημέρα του Αυγούστου.



Εικ. 3.6: Θερμοκρασία του αποθηκευτή θερμότητας για την 3 Αυγούστου

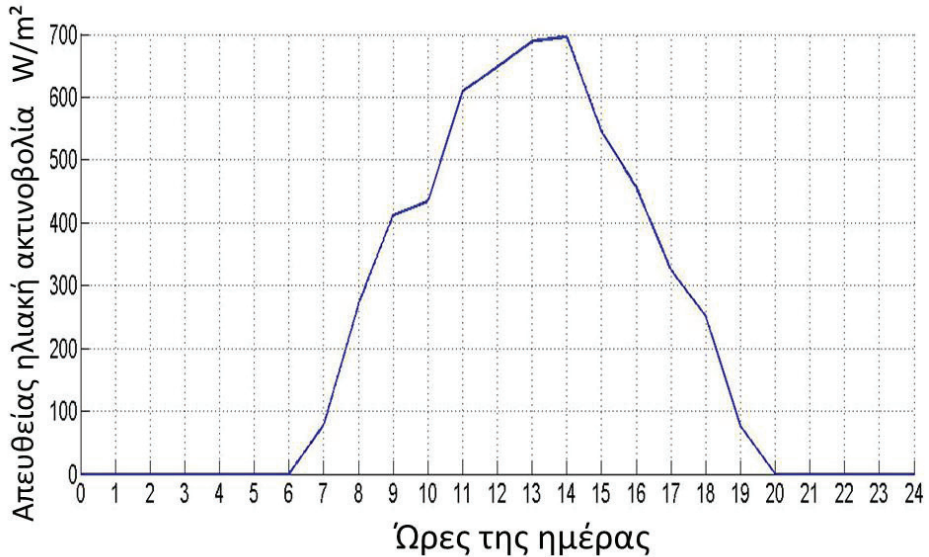
Κατά τις πρωινές ώρες κατανάλωσης αιχμής (09:00 - 11:00), λόγω του γεγονότος ότι η άμεση ηλιακή ακτινοβολία κυμαίνεται από  $360 \text{ W / m}^2$  έως  $590 \text{ W / m}^2$ , η θερμοκρασία της δεξαμενής αποθήκευσης δεν φθάνει κρίσιμο επίπεδο και γι' αυτό, στην Εικόνα 3.5, ο κλίβανος πετρελαίου δεν λειτουργεί. Κατά τις απογευματινές ώρες κατανάλωσης αιχμής (18:00 - 21:00), λόγω του γεγονότος ότι η άμεση ηλιακή ακτινοβολία είναι χαμηλή (κάτω από  $100 \text{ W / m}^2$ ), ο κλίβανος αρχίζει να λειτουργεί, για να θερμανθεί το νερό χρήσης.

### 3.3. Ηλιακοί συλλέκτες με προσθήκη καυστήρα βιομάζας

Αυτό το σενάριο εξετάζει την περίπτωση που ο ιδιοκτήτης, μαζί με την εγκατάσταση των επίπεδων ηλιακών συλλεκτών, θα ήθελε να αντικαταστήσει τον καυστήρα πετρελαίου με έναν άλλο καυστήρα βιομάζας της ίδιας ονομαστικής ισχύος, ο οποίος καίει πέλετς.

Και σε αυτήν την περίπτωση έγιναν προσωμειώσεις για διάφορες ενδεικτικές μέρες του χρόνου. Τα αποτελέσματα παρατείνονται λεπτομερώς στην πτυχιακή εργασία [1]. Ενδεικτικά παρουσιάζονται εδώ ορισμένα αποτελέσματα.

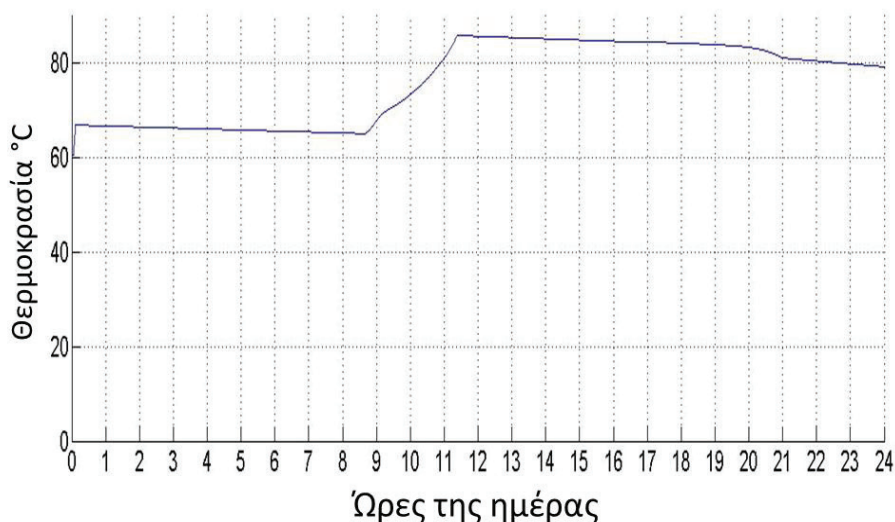
Η εικόνα 3.7 δείχνει την απευθείας ηλιακή ακτινοβολία για την 6 Μαΐου για το υβριδικό σύστημα.



Εικ. 3.7: Απευθείας ηλιακή ακτινοβολία για την 6 Μαΐου

Κατά τις πρωινές ώρες κατανάλωσης αιχμής, λόγω της υψηλής ηλιακής ακτινοβολίας ( $400 W / m^2$  έως  $600 W / m^2$ ), η θερμοκρασία της δεξαμενής αποθήκευσης είναι υψηλή. Το ίδιο συμβαίνει επίσης κατά τις απογευματινές ώρες κατανάλωσης αιχμής. Ως εκ τούτου, ο κλίβανος βιομάζας δεν λειτουργεί καθόλου καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, καθώς όλη η ζήτηση για ζεστό νερό καλύπτεται εξ ολοκλήρου από τους επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες.

Η επόμενη εικόνα 3.8 δείχνει τη θερμοκρασία του αποθηκευτή θερμότητας για την 6 Μαΐου.

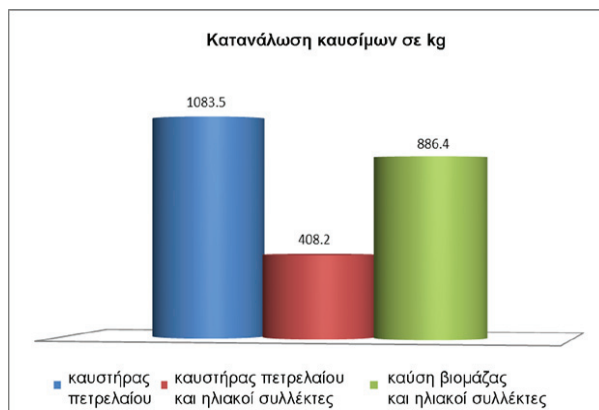


Η θερμοκρασία είναι καθόλη τη διάρκεια της ημέρας αισθητά πάνω από τους 50°C χωρίς να χρειάζεται η άμεση καύση των πέλετες διότι η ηλιακή ακτινοβολία είναι αρκετή.

#### 3.4. Σύγκριση των αποτελεσμάτων

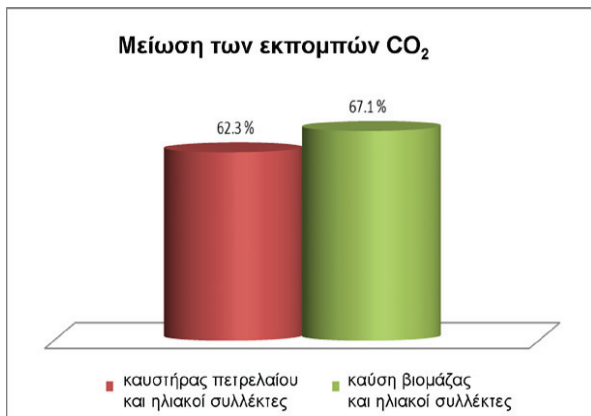
Λόγω του γεγονότος ότι ο κύριος σκοπός είναι η μείωση τόσο της κατανάλωσης καυσίμου όσο και των εκπομπών CO<sub>2</sub>, ενώ ο τελικός στόχος είναι η μείωση του κόστους λειτουργίας του ζεστού νερού, κρίθηκε απαραίτητο να συγκριθούν τα αποτελέσματα για τις τρεις διαφορετικές περιπτώσεις [1].

Το Σχήμα 3.6 παρακάτω δείχνει τη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου μεταξύ του υφιστάμενου συστήματος του καυστήρα πετρελαίου και του δεύτερου σεναρίου προσθήκης στο υφιστάμενο σύστημα των επίπεδων συλλεκτών. Αυτό αντιστοιχεί σε μείωση της κατανάλωσης καυσίμου ίση με 62,3%. Αντίθετα, στο τρίτο σενάριο, υπάρχει μετατόπιση κατά 100% προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Αυτό οδηγεί σε μείωση κατά 100% του συμβατικού καυσίμου πετρελαίου, καθώς ο κλίβανος πετρελαίου αντικαθίσταται από καύση βιομάζας.



Εικ. 3.6: Κατανάλωση καυσίμων για τις τρεις διαφορετικές περιπτώσεις για όλη την περίοδο λειτουργίας του ξενοδοχείου

Το σχήμα 3.7 με το κόκκινο χρώμα δείχνει τη μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> του καυστήρα πετρελαίου και των επίπεδων ηλιακών συλλεκτών σε σύγκριση με το υπάρχον σύστημα του καυστήρα πετρελαίου, ενώ το πράσινο χρώμα δείχνει τη μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> με καύση βιομάζας μαζί με χρήση επίπεδων ηλιακών συλλεκτών σε σύγκριση με το υπάρχον σύστημα του καυστήρα πετρελαίου.



Εικ. 3.7: Μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> που επιτεύχθηκε με την εγκατάσταση των ηλιακών συλλεκτών

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρατηρήθηκε ότι με την εγκατάσταση των ηλιακών συλλεκτών στο ήδη υπάρχον σύστημα του καυστήρα πετρελαίου των ενοικιαζόμενων δωματίων υπήρξε μια μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> και μια μείωση του συνολικού κόστους καυσίμων για το σύνολο της περιόδου λειτουργίας των ενοικιαζόμενων δωματίων. Αυτό αποδεικνύει ότι η εξοικονόμηση η οποία επιτυγχάνεται στο υβριδικό σύστημα των ηλιακών συλλεκτών με τον καυστήρα πετρελαίου βρίσκεται σε πολύ ικανοποιητικά επίπεδα.

Ωστόσο, αυτό το μοντέλο προσομοίωσης δεν είναι τέλειο, καθώς πολλά από τα στοιχεία (μήκος των σωλήνων, πτώση πίεσης στους σωλήνες) δεν υπολογίστηκαν ή ελήφθησαν κατ' εκτίμηση. Επίσης, όσον αφορά τις ώρες αιχμής της κατανάλωσης ζεστού νερού, δεν μπορούν να περιοριστούν μόνο σε 5 ώρες ημερησίως σε ένα συγκρότημα ενοικιαζόμενων δωματίων. Ένα πιο ομαλοποιημένο προφίλ κατανάλωσης θα βελτώνει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Τέλος, η θερμοκρασία των 50°C που φτάνει στα δωμάτια, όπως και η ημερήσια κατανάλωση των 60 lt / άτομο / ημέρα, παρόλο που έχουν ληφθεί από τον TOTEE, θεωρούνται υπερβολικά.

Μια περαιτέρω έρευνα σχετικά με τις πραγματικές ανάγκες του συγκεκριμένου ξενοδοχείου σε ζεστό νερό, καθώς και μια μείωση της τελικής θερμοκρασίας που φθάνει στα δωμάτια θα μειώσει την απαραίτητη επιφάνεια των ηλιακών συλλεκτών.

Σε ότι αφορά το σύστημα του καυστήρα βιομάζας και των ηλιακών συλλεκτών παρατηρείται ότι αν και η συνολική μάζα του καυσίμου σε κιλά διπλασιάζεται, σε σύγκριση με την πρώτη περίπτωση του καυστήρα πετρελαίου και των ηλιακών συλλεκτών, το ποσό των εκπομπών CO<sub>2</sub> και το συνολικό κόστος μειώνεται. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο καυστήρας πετρελαίου και ο καυστήρας βιομάζας έχουν την ίδια ονομαστική ισχύ. Επομένως, συμπεραίνεται ότι ο καυστήρας βιομάζας θεωρείται ως η πιο αποτελεσματική λύση για τη θέρμανση του νερού στα συγκεκριμένα ενοικιαζόμενα δωμάτια.

Το πρόγραμμα C.A.R.N.O.T. αποδείχθηκε ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο προσομοίωσης. Χάρη στον συνδυασμό της εύχρηστης γραφικής διεπαφής του προγράμματος Simulink και των αλγορίθμων και των διαφορικών εξισώσεων λύσεων του προγράμματος MATLAB®, καθώς και των μεταβλητών χρονικών βημάτων που έχει, κατάφερε να προσομοιώσει ανά δευτερόλεπτο όλη την περίοδο των 6 μηνών λειτουργίας του ξενοδοχείου.

Η χρήση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας θεωρείται απαραίτητη για την αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών και ενεργειακών προβλημάτων, ιδιαίτερα σε ξενοδοχειακές εφαρμογές που απαιτούν

τεράστια ποσά ενέργειας για τη θέρμανση του νερού χρήσης κατά την περίοδο λειτουργίας τους. Ιδιαίτερα όταν αυτά τα ξενοδοχεία βρίσκονται στην Ελλάδα, η οποία έχει τεράστιο ηλιακό δυναμικό κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών, είναι κρίμα αυτό το δυναμικό να χάνεται, και τα ξενοδοχεία να χρησιμοποιούν συμβατικές πηγές ενέργειας (όπως πετρέλαιο, άνθρακα και βενζίνη)

Η Ελλάδα έχει δεσμευτεί, ως μέλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης, να καλύψει μέχρι το 2020 τουλάχιστον το 20% των συνολικών ενεργειακών αναγκών της με τη χρήση Α.Π.Ε. Δυστυχώς, ενώ απέμειναν μόνο δύο χρόνια, η Ελλάδα εξακολουθεί να είναι πολύ μακριά από αυτόν τον στόχο. Για το λόγο αυτό και προκειμένου να αποφευχθούν κυρώσεις που μπορεί να επιβληθούν εάν η Ελλάδα δεν επιτύχει το στόχο της κατά 20%, καλείται να ξεπεράσει οποιαδήποτε γραφειοκρατικά προβλήματα και να επενδύσει ουσιαστικά στην ανάπτυξη των Α.Π.Ε.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Grigorios Gavriilidis: Development of a hybrid system of solar collectors and a biomass furnace, with the use of the program C.A.R.N.O.T., for covering the needs in hot water of a hotel in Greece, Master thesis, 2015
- [2] Carsten Wemhöner, Bernd Hafner, Klemens Schwarzer: Simulation of solar thermal systems with carnot blockset in the environment MATLAB® Simulink®, Proceedings of the Eurosun Conference 2000
- [3] Bernd Hafner, Johannes Plettner, Carsten Wemhöner, Thomas Wenzel: CARNOT Blockset, Version 1.0, Conventional And Renewable eNergy systems OpTimization Blockset, User's Guide, Solar-Institut Jülich and Scientific Computers GmbH, Germany
- [4] Meteonorm, Irradiation data for every place on Earth (website: <http://meteonorm.com>)
- [5] Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος, «Αναλυτικές εθνικές προδιαγραφές παραμέτρων για τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης κτηρίων και την έκδοση του πιστοποιητικού ενεργειακής απόδοσης», Έκδοση Β, σελίδα 24, πίνακας 2.2, Απρίλιος 2012
- [6] ΕΛΟΤ 1291, «Ηλιακή Ενέργεια – Μετεωρολογικά στοιχεία πόλεων της Ελλάδας για τις ανάγκες του προτύπου ΕΛΟΤ 879», 1991
- [7] Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος, «Κλιματικά δεδομένα Ελληνικών περιοχών», Έκδοση Β, σελίδα 52, πίνακας 6.1, Απρίλιος 2012



## ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΜΕΣΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΙΑΚΟΥ ΠΥΡΓΟΥ

Σ. Χ. Αλεξόπουλος<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup> Fachbereich Energietechnik, Aachen University of Applied Sciences, Solar-Institut Jülich (SIJ), Heinrich-Mußmann-Str. 5, D-52428 Jülich, e-mail: alexopoulos@sj.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 μεταφορέα 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 συγκεντρωτικής ηλιακής ακτινοβολίας επιτυγχάνει υψηλούς συντελεστές απόδοσης και ταχύτερα υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας της ενεργειακής εγκατάστασης.

Εκτός από τη χρήση αέρος ως μεταφορέα θερμότητας μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλα μέσα όπως τεκμημένο αλάτι και σύστημα νερού/ατμού. Στην Ισπανία και στις ΗΠΑ είναι σε λειτουργία ηλιακοί πύργοι για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίοι χρησιμοποιούν ένα από τα δύο αυτά μέσα για την μεταφορά θερμότητας από τον ηλιακό αποδέκτη. Στο κείμενο παρουσιάζονται τα μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα διαφόρων μέσων μεταφοράς της θερμότητας καθώς και οι αντίστοιχες τεχνολογίες συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας.

Με τη χρήση των ηλιακών πύργων, 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: ηλιακή ενέργεια, ηλιακός πύργος, μεταφορέας θερμότητας, ηλιοθερμικό εργοστάσιο

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην εποχή μας εξαιτίας της αύξησης των επιπτώσεων του φαινομένου του θερμοκηπίου στον άνθρωπο και το περιβάλλον και της αύξησης της ζήτησης ενέργειας γίνεται όλο και επιτακτικότερη η ανάγκη ανάπτυξης των Α.Π.Ε. Σε αυτές ανήκει και η ηλιοθερμία. Στην ηλιοθερμική ενέργεια συγκαταλέγονται και τα μεγάλα ηλιοθερμικά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος με ηλιακούς συλλέκτες. Στα ηλιοθερμικά εργοστάσια παραγωγής ενέργειας συγκαταλέγονται: οι παραβολικοί συλλέκτες σκάφης, ο ηλιακός δίσκος, η ηλιακή καπνοδόχος, οι καθρέφτες Φρενέλ και ο ηλιακός πύργος. Από αυτές τις τεχνολογίες οι παραβολικοί συλλέκτες σκάφης και οι ηλιακοί πύργοι είναι ήδη εμπορικά αξιοποιήσιμες [1].

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε ηλιοθερμικά εργοστάσια, όπως οι ηλιακοί πύργοι, είναι ένας τρόπος, ώστε να αναπληρωθεί μακροπρόθεσμα η χρήση συμβατικών μορφών ενέργειας [2]. Με την συγκέντρωση της απευθείας ηλιακής ακτινοβολίας μέσω ηλιοστατών σε έναν αποδέκτη θερμότητας επιτυγχάνονται σε έναν ηλιακό πύργο πολύ υψηλές θερμοκρασίες στον μεταφορέα θερμότητας. Η θερμότητα αυτή μετατρέπεται σε έναν θερμικό κύκλο σε μηχανική ενέργεια και στη συνέχεια με γεννήτρια σε ηλεκτρική ενέργεια.

## 2. ΗΛΙΟΘΕΡΜΙΚΟ ΗΛΙΑΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ

Η ετήσια ηλιοφάνεια αυξάνει στην Ελλάδα από βορρά προς νότο και από τα εσωτερικά ηπειρωτικά τμήματα προς την κατεύθυνση των ακτών [3]. Το ηλιακό δυναμικό της Ελλάδας είναι πολύ υψηλό ξεπερνώντας τις 4200 κιλοβατώρες ανά τετραγωνικό μέτρο ημερησίως.

Το μέσο ετήσιο φυσικός διαθέσιμο (θεωρητικό) δυναμικό της ηλιακής ακτινοβολίας για την Ελλάδα υπολογίζεται σε  $195 \cdot 10^9$  GWh/a [4]. Το φυσικός 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.

## 3. ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΠΥΡΓΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Από τις αρχές της δεκαετίας του 80 μέχρι το τέλος της δεκαετίας του 90 έγιναν πολλά ερευνητικά προγράμματα στην Βόρεια Αμερική και την Ευρώπη για τη χρήση του ηλιακού πύργου. Με την αποκτηθείσα εμπειρία διαμορφώθηκαν οι προϋποθέσεις για την εμπορική αξιοποίηση και την δημιουργία των πρώτων ηλιακών εργοστασίων παραγωγής ενέργειας με ηλιακό πύργο. Πρωτοπόροι στην εγκατάσταση και ανάπτυξη της τεχνολογίας στην Ευρώπη σήμερα είναι η Γερμανία και η Ισπανία.

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια αναγέννηση στον τομέα των συγκεντρωτικών ηλιοθερμικών συστημάτων με την δημιουργία νέων μονάδων σε όλο τον κόσμο. Στις ΗΠΑ έχουν ήδη γίνει μεγάλες εγκαταστάσεις ηλιακών πύργων αλλά και στην Κίνα έχουν σχεδιαστεί και θα αρχίσει η δημιουργία μεγάλων ηλιακών πύργων άνω των 100 MW.

Πρωτοπόροι στην εγκατάσταση και ανάπτυξη της τεχνολογίας στην Ευρώπη σήμερα είναι η Γερμανία και η Ισπανία, όπου ήδη λειτουργούν ηλιακοί πύργοι. Στην Ισπανία είναι ήδη σε λειτουργία ένας ηλιακός πύργος με ονομαστική ισχύ 10 MW και άλλοι δύο με 20 MW. Δύο από αυτούς χρησιμοποιούν ατμό ως μέσο μεταφοράς θερμότητας και ο άλλος των 20 MW τετηγμένο αλάτι.

Στην Ελλάδα βρίσκεται υπό εξέλιξη ο σχεδιασμός για την παραγωγή μέσω ηλιακού πύργου ηλεκτρικής ενέργειας για τον Αθρινόλακο της Κρήτης. Στο έργο αυτό με την ονομασία MINOS έχει απονεμηθεί το βραβείο NER300 της Ευρωπαϊκής Ένωσης και θα συμβάλει σημαντικά στην αποκεντροποίηση του ηλεκτρικού δικτύου της Κρήτης που βασίζεται στο πετρέλαιο και το ντίζελ. Η εκκίνηση της ενεργειακής παραγωγής είναι σχεδιασμένη για το έτος 2020. Η εγκαταστημένη ισχύ θα είναι 52 MW και η συγκεντρωτική ηλιακή ενέργεια θα μπορεί να συνδυαστεί με 15% κάυση ντίζελ, βιοντίζελ ή βιομάζας.

Ακόμα και στη Γερμανία που δεν διαθέτει υψηλό ηλιακό δυναμικό ολοκληρώθηκε το έτος 2008 η εγκατάσταση ενός ηλιακού εργοστασίου με ηλεκτρική ισχύ 1,5 MW [5]. Είναι ο πρώτος πειραματικός σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ηλιακό πύργο ισχύος 1,5 MW. Στην πόλη του Γιούλιχ στο κρατίδιο της Ρηνανίας Βεσφαλίας δημιουργήθηκε γι' αυτόν τον σκοπό ένα μεγάλο πεδίο με καθρέφτες με συνολική επιφάνεια περίπου 20.000 m<sup>2</sup> [6]. Το ενεργειακό αυτό σχέδιο, το οποίο κόστισε περίπου 23 εκ. Ευρώ χρηματοδοτήθηκε κατά το μεγαλύτερο ποσοστό από το κρατίδιο της Ρηνανίας Βεσφαλίας, της Βαυαρίας και από το Υπουργείο Περιβάλλοντος της Γερμανίας.

Δεξιά στην Εικόνα 1 διακρίνεται ένα τμήμα του ηλιοστατικού πεδίου και αριστερά ο ηλιακός πύργος ύψους 60 μέτρων με τον αποδέκτη. Στον αποδέκτη αναπτύσσονται θερμοκρασίες που μπορεί να ξεπερνούν τους 900°C [7].



Εικόνα 1: Ηλιακός πύργος του Γιούλιχ, Πηγή: DLR

Ως μέσο μεταφοράς χρησιμοποιείται αέρας, ο οποίος μεταφέρει τη θερμότητα από τον αποδέκτη σε εναλλάκτες θερμότητας, όπου θερμαίνεται το νερό και παράγεται ατμός. Η θερμική ενέργεια του ατμού μετατρέπεται στον ατμοστρόβιλο του συμβατικού κύκλου σε μηχανική ενέργεια. Η με αυτό τον τρόπο παραγόμενη μηχανική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική μέσω γεννήτριας για την τελική παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος.

Η παρουσία ενός αποθηκευτή θερμότητας επιτρέπει την επέκταση της λειτουργίας του εργοστασίου κατά μια ώρα τη νύχτα ή σε συνεφιασμένες μέρες. Ο ηλιακός πύργος έχει τη δυνατότητα συνδυασμού σε υβριδικά συστήματα με την καύση φυσικού αερίου ή βιοαερίου.

#### 4. ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΜΕΣΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Ένα μέσο μεταφοράς της θερμότητας απορροφά τη συγκεντρωτική ακτινοβολία, η οποία αντανακλάται από τους ηλιοστάτες και τη μετατρέπει σε θερμική ενέργεια. Η θερμική ενέργεια μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή υπερθερμονόμενου ατμού για την λειτουργία ενός ατμοστρόβιλου. Εναλλακτικά μπορεί επίσης να αποθηκευτεί σε έναν αποθηκευτή θερμότητας σε υψηλές θερμοκρασίες.

Εκτός από τη χρήση αερός ως μεταφορέα θερμότητας μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλα μέσα όπως τεκμημένο αλάτι και σύστημα νερού/ατμού. Τα διάφορα μέσα μεταφοράς της θερμότητας έχουν μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα σε ότι αφορά το κόστος, τις θερμικές ιδιότητες, την δυνατότητα αποθήκευσης και την φιλικότητα με το περιβάλλον.

Ενώ η αμερικάνικη βιομηχανία χρησιμοποιεί κυρίως τετηγμένο αλάτι για την αποθήκευση αλλά και τη μεταφορά θερμότητας σε ηλιακούς πύργους, στην Ευρώπη ο βιομηχανικός τομέας παρέχει επιπλέον αέρα και νερό/ ατμό κατά προτίμηση ως φορέα θερμότητας.

Εαν χρησιμοποιηθεί αέριο ή αέρας σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες στους 1000°C ή παραπάνω μπορεί το μέσο να χρησιμοποιηθεί ακόμη και για να αντικαταστήσει απευθείας το φυσικό αέριο σε έναν αεριοστρόβιλο, κάνοντας έτσι χρήση της εξαιρετικής αποτελεσματικότητας του κύκλου (60% και περισσότερο) των σύγχρονων συνδυασμένων κύκλων αερίου και ατμού [8].

##### 4.1 Τετηγμένο αλάτι

Γενικά τετηγμένο αλάτι μπορεί να αποθηκευτεί σχετικά εύκολα εξαιτίας της υποσχόμενης ικανότητας μεταφοράς θερμότητας. Γιαυτό το σκοπό μπορεί να αποθηκευτεί σε μια ζεστή δεξαμενή και να επανακυκλοφορήσει σε μια κρύα δεξαμενή. Εγκαταστάσεις παραβολικών συλλεκτών σκάφης στην Ισπανία και τις ΗΠΑ έχουν μεγάλη εμπειρία με την αποθήκευση αλατιού. Τετηγμένο αλάτι βασίζεται κυρίως σε νιτρικά άλατα νατρίου και καλίου.

Ένα επιπλέον πλεονέκτημα περιλαμβάνει τη χαμηλότερη πίεση λειτουργίας και την καλύτερη μεταφορά θερμότητας συγκρητικά με αποδέκτη νερού/ ατμού. Με καλύτερη μεταφορά θερμότητας προκύπτει υψηλότερη επιτρεπόμενη συγκεντρωτική ακτινοβολία στον αποδέκτη. Αυτό σημαίνει, ότι ένας μικρότερος αποδέκτης μπορεί να εγκατασταθεί στον ηλιακό πύργο [9].

Τα λειτουργικά έξοδα για την αγορά τετηγμένου αλατιού δεν είναι υψηλά. Από την άλλη πλευρά, το τετηγμένο αλάτι χρειάζεται ειδική μεταχείριση εξαιτίας του χαμηλού ιξώδους και λόγω του προβλήματος της στερεοποίησης στους περίπου 220°C. Το τετηγμένο αλάτι πρέπει να διατηρείται σε μια ελάχιστη θερμοκρασία των περίπου 290°C.

Εξαιτίας του χαμηλότερου ιξώδους, η αποθήκευση και μεταφορά τετηγμένου αλατιού είναι επομένως δύσκολη. Καθώς πρέπει συνεχώς το αλάτι να παραμένει στην τετηγμένη κατάσταση, απαιτείται ειδική θέρμανση όταν η εγκατάσταση δεν είναι σε λειτουργία [9]. Ως αποτέλεσμα των πρόσθετων απαιτήσεων θέρμανσης αυξάνονται τα λειτουργικά έξοδα.

Ένα ηλεκτρικό σύστημα θέρμανσης είναι απαραίτητο για την αποφυγή διάβρωσης. Επιπλέον η ευαισθησία ατυχήματος και η σχετική πιθανότητα ατυχήματος αποτελούν επιπλέον μειονεκτήματα.

#### 4.2 Νερό/ατμός

Με τη χρήση νερού ως μέσου μεταφοράς της θερμότητας δεν χρειάζεται κανένας εναλλάκτης θερμότητας καθώς έχουμε την άμεση παραγωγή ατμού στον ηλιακό συγκεντρωτικό αποδέκτη στον πύργο. Σε αυτή την περίπτωση έχουμε την άμεση τροφοδοσία του ατμοστρόβιλου με ατμό. Επιπλέον έχουμε την αισθητή μείωση των λειτουργικών εξόδων και του κόστους συντήρησης. Η χρήση νερού προσφέρει υψηλό επίπεδο ασφάλειας και προστασίας σε ότι αφορά περιβαλλοντικές επιπτώσεις και έχει χαμηλότερο κόστος συγκριτικά με τεκτημένο αλάτι.

Εναλλαγές της ηλιακής ακτινοβολίας οδηγούν σε ταχέως μεταβαλλόμενες παραμέτρους και σε αλλαγή φάσης με αποτέλεσμα ο έλεγχος λειτουργίας του συστήματος να είναι περίπλοκος [9].

Η εμπειρία της λειτουργίας ηλιακών πύργων με χρήση υπερθερμαινόμενου ατμού ανέδειξε αρκετές τέτοιες τεχνικές φύσεως δυσκολίες. Αυτές σχετίζονται κυρίως με τη ρύθμιση των υπερθερμαντήρων και βραστήρων σε σχέση με τους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας [10].

Αντίθετα καλύτερα αποτελέσματα σε ότι αφορά τον αποδέκτη θερμότητας, τη διάρκεια ζωής της εγκατάστασης και τον έλεγχο λειτουργίας έχουν αναφερθεί για ηλιακούς αποδέκτες με κορεσμένο ατμό. Παρόλο που μειώνουν το τεχνικό ρίσκο, οι μέγιστες θερμοκρασίες εκροής είναι αισθητά χαμηλότερες από αυτές, οι οποίες επιτυγχάνονται με χρήση υπερθερμαινόμενου ατμού [10].

Ένα επιπλέον μειονέκτημα της χρήσης ατμού ως μέσου μεταφοράς της θερμότητας είναι η δυσκολία αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας καθώς και η μη βέλτιστη μεταφορά θερμότητας.

Ενδεικτικά αναφέρεται εδώ η εμπειρία της ερευνητικής εγκατάστασης στις ΗΠΑ την δεκαετία του 80. Εάν και η εξάχρονη λειτουργία απέδειξε την σκοπιμότητα του σχεδιασμού για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η θερμική αποθήκευση στους 220-305°C δεν ήταν συμβατή με τις υψηλές θερμοκρασίες του ατμού κατά την είσοδο στον ατμοστρόβιλο στους 510°C [10].

#### 4.3 Αέρας

Αέρας ως μέσο μεταφοράς της θερμότητας είναι ευχερίστος, ελεύθερα διαθέσιμος, φιλικός προς το περιβάλλον και μη τοξικός. Προσφέρει το υψηλότερο επίπεδο ασφάλειας και προστασίας σε ότι αφορά περιβαλλοντικές επιπτώσεις και έχει ελάχιστο κόστος. Η χρήση αέρα ως μέσου μεταφοράς της θερμότητας είναι

Σε αντίθεση με τεκτημένο αλάτι ο αέρας δεν χρειάζεται προστασία κατά της ψύξης για χρόνους μη λειτουργίας και επιτρέπει τη λειτουργία σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες χωρίς κανένα περιορισμό της θερμοκρασίας [9]. Αυτό επιτρέπει την λειτουργία με υψηλές παραμέτρους για τον ατμό και ως εκ τούτου υψηλές ενεργειακές αποδόσεις σε συνδυασμό με σύγχρονους συμβατικούς ατμοηλεκτρικούς κύκλους.

Από την άλλη πλευρά ο αέρας δεν προσφέρει καλή μεταφορά της θερμότητας, έχει χαμηλή θερμική ισχύ και η αποθήκευση της θερμότητας δεν είναι βέλτιστη.

Εργοστάσια παραγωγής ενέργειας με ηλιακούς κεντρικούς αποδέκτες είναι μια πολύ υποσχόμενη τεχνολογία, η οποία προσφέρει τόσο λειτουργικά πλεονεκτήματα λόγω της απλότητας του ζεστού κύκλου του αέρα όσο και λόγω των υψηλών ενεργειακών αποδόσεων.

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

#### 4.4 Άλλα μέσα

Διάφορα αέρια όπως διοξείδιο του άνθρακα, ήλιο, ρευστά μέταλλα, οργανικά υγρά και νάτριο μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μέσα μεταφοράς της θερμότητας.

Η χρήση νατρίου πραγματοποιήθηκε μονάχα μια φορά στην εγκατάσταση Small Solar Power System (SSPS) στην Ισπανία. Το SSPS ήταν ο πρώτος συγκεντρωτικός σταθμός παραγωγής ενέργειας στην Ευρώπη και χτίστηκε στην Plataforma Solar de Almeria (PSA) στην Almeria της Νότιας Ισπανίας, από την International Energy Agency (IEA). Ο ηλιακός πύργος με ηλεκτρική ισχύ 0.5 MW ξεκίνησε παραγωγή το 1981. Η εγκατάσταση καταστράφηκε ολοσχερώς το έτος 1986 από φωτιά νατρίου [9]. Εξαιτίας αυτής της καταστροφικής εμπειρίας το νάτριο δεν ξαναχρησιμοποιήθηκε σε ηλιακούς πύργους.

Τα ρευστά μέταλλα μπορούν λόγω της υψηλής πυκνότητας και της υψηλής τους θερμικής αγωγιμότητας να χρησιμοποιηθούν επίσης ως μέσα μεταφοράς θερμότητας. Δεν μπορούν όλα ανεξαιρέτως τα μέταλλα να χρησιμοποιηθούν. Ειδικά τα τοξικά βαρέα μέταλλα, όπως ο μόλυβδος εξαιρούνται της χρήσης λόγω του υψηλού κινδύνου.

Ένα παράδειγμα χρήσης είναι ο κασσίτερος, ο οποίος ως ελαφρύ μέταλλο κατέχει χαμηλή θερμοκρασία τήξης και υψηλότερη θερμοκρασία εξάτμισης [11]. Ένα μειονέκτημα είναι ότι καθώς η θερμότητα μεταφέρεται στον ρευστό κασσίτερο από τον ηλιακό αποδέκτη παρουσιάζονται θερμικές τάσεις, οι οποίες οφείλονται κυρίως στις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας. Αντίθετα σημαντικό πλεονέκτημα του κασσίτερου είναι η χαμηλή θερμική αντίσταση μεταξύ του ρευστού μετάλλου και των τοιχωμάτων του αποδέκτη θερμότητας.

### 5. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΠΥΡΓΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Η Ελλάδα προσφέρεται όσο λίγες ευρωπαϊκές χώρες για την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας. Η εμπειρία των καινούργιων ηλιακών μονάδων με πύργο στην Ευρώπη και την Αμερική δείχνουν μια συνεχή μείωση του κόστους, το οποίο κυμαίνεται πλέον γύρω στα 10 λεπτά ανά κιλοβατώρα.

Η τεχνολογία του ηλιακού πύργου για την Ελλάδα έχει πολλά πλεονεκτήματα διότι:

- 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 είναι 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.

### 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο ηλιακός πύργος αποτελεί μια ανταγωνιστική τεχνολογία. Ήδη σε ευρωπαϊκές χώρες λειτουργούν ή δημιουργούνται τέτοιες εγκαταστάσεις για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος.

Με τη χρήση των ηλιακών πύργων, επιτυγχάνεται η εξοικονόμηση συμβατικών καυσίμων και η μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα με ταυτόχρονη μείωση του ενεργειακού κόστους.

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.

Ως μέσο μεταφοράς θερμότητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί νερό/ατμός, τετηγμένο αλάτι, αέρας και άλλα ρευστά. Η χρήση αέρος ως μεταφορέα θερμότητας καθώς και κεραμικών δομών ως αποδεκτών της συγκεντρωτικής ηλιακής ακτινοβολίας επιτυγχάνει υψηλούς συντελεστές απόδοσης και ταχύτερα υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας της ενεργειακής εγκατάστασης. Στην Ισπανία και στις ΗΠΑ είναι σε λειτουργία ηλιακοί πύργοι για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίοι χρησιμοποιούν νερό/ατμό και τετηγμένο αλάτι για την μεταφορά θερμότητας από τον ηλιακό αποδέκτη.

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 είτε για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος είτε για αφαλάτωση.

Στην Ελλάδα ως χώρα της Νοτιοανατολικής Μεσογείου, με ένα αξιόλογο ηλιακό δυναμικό, είναι επιτακτική ανάγκη η ανάπτυξη της τεχνολογίας του ηλιακού πύργου, η οποία αποτελεί μια ανταγωνιστική ηλιακή τεχνολογία και ήδη σε άλλες χώρες πραγματοποιούνται πολλές εγκαταστάσεις για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ο συγγραφέας θέλει να ευχαριστήσει σε αυτό το σημείο τα Υπουργεία Περιβάλλοντος και Παιδείας και Έρευνας της Ομοσπονδιακής Δημοκρατίας της Γερμανίας για την χρηματοδότηση ερευνητικών προγραμμάτων του Solar-Institut Jülich καθώς και τους ερευνητές του Solar-Institut Jülich για τις εργασίες τους σε αυτόν τον τομέα των ΑΠΕ.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Σ. Χ. Αλεξόπουλος, Β. Χόφσμιντ: Εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με ηλιακό πύργο στη Γερμανία και μελλοντικές δυνατότητες ανάπτυξης της τεχνολογίας στην Ελλάδα και στην Κύπρο, 9<sup>ο</sup> Εθνικό Συνέδριο για τις ΑΠΕ, Γεροσκήπου, Πάφος, Κύπρος, 26-28 Μαρτίου 2009
- [2] Σπύρος Χ. Αλεξόπουλος: Υβριδικά συστήματα ηλιακού πύργου με καύση φυσικού αερίου και μελλοντικές δυνατότητες ανάπτυξης της τεχνολογίας στην Ελλάδα, 10ο Εθνικό Συνέδριο για τις ΑΠΕ, Θεσσαλονίκη, 26-28 Μαρτίου 2014
- [3] Α. Ματζαράκης, Β. Κατσούλης: Διάρκεια των ωρών της ηλιοφάνειας στον ελληνικό χώρο. 7<sup>ο</sup> Πανελλήνιο (Διεθνές) Συνέδριο Μετεωρολογίας, Κλιματολογίας και Φυσικής της Ατμόσφαιρας Λευκωσία, 28-30 Σεπτέμβρη 2004
- [4] Γ. Τσιλιγκιρίδης: Το δυναμικό των εγχώριων ενεργειακών πόρων, Πρακτικά 5ου Εθνικού Συνεδρίου για τις ΑΠΕ, σελ. 165-199, Αθήνα, 6-8 Νοεμβρίου 1996
- [5] Σ. Αλεξόπουλος: Η τεχνολογία του ηλιακού πύργου και προοπτικές στην Ελλάδα, Ο κόσμος της Ενέργειας, τεύχος 11, σελ. 28-29, Απρίλιος - Ιούνιος 2007
- [6] Praxistest für neuartiges Sonnenkraftwerk Solarturm Jülich: Strom aus gebündeltem Licht, BMU, Berlin, 4. Juli 2006
- [7] B. Hoffschmidt: Solarthermische Kraftwerke aus NRW, Rede am Cluster Energieforschung NRW, Essen, 16.6.2008
- [8] S. Giuliano, R. Buck, C. Schillings, S. Al Nuaimi, A. Al Obaidli: Analysis of solar-hybrid gas turbine cogeneration systems with absorption chillers in hot and dry climates Proceedings SolarPACES Berlin 2009
- [9] S. Alexopoulos, B. Hoffschmidt: Concentrating Receiver Systems (Solar Power Tower) in Robert A. Meyers (ed.) Encyclopedia of Sustainability Science and Technology, Springer Verlag, 2012

- [10] M. Romero, R. Buck, J.E. Pacheco: An update on solar central receiver systems, projects, and technologies ASME 98, Vol. 124, 2002
- [11] S. D. Moeni: Auslegung eines Solarturmkraftwerks mit Überkritischem Dampfprozess, Diplomarbeit, Universität Kassel, 2007



## ΗΛΙΑΚΗ ΣΥΣΚΕΥΗ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΝΕΡΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΥΛΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ ΚΑΙ ΜΕΡΙΚΟΥ ΚΕΝΟΥ

Μανώλης Σουλιώτης<sup>1,2\*</sup>, Σπυρίδων Παπαευθυμίου<sup>3</sup>, Ιωάννης Καούρης<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος / <sup>2</sup> Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,  
Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας

\* e-mail: msouliotis@uowm.gr

<sup>3</sup> Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης  
e-mail: spiros@dpem.tuc.gr

<sup>4</sup> Τμήμα Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών  
e-mail: caouris@upatras.gr

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι ηλιακές ολοκληρωμένες συσκευές συλλέκτη – αποθήκης για παραγωγή θερμού νερού χρήσης (Integrated Collector Storage, ICSWH) ενσωματώνουν τεχνολογίες για ταυτόχρονη παραγωγή και αποθήκευση θερμικής ενέργειας σε ενιαία μονάδα, καθιστώντας τις σαφώς οικονομικότερες έναντι των συμβατικών ηλιακών θερμοσιφωνικών συστημάτων. Η ανάπτυξη και μελέτη αποτελεσματικών τρόπων αύξησης της θερμοκρασίας του αποθηκευμένου νερού χρήσης αλλά και του περιορισμού των θερμικών απωλειών αυτού του τύπου ηλιακών συσκευών αποτελεί σήμερα προτεραιότητα των περισσότερων ερευνητών. Η εργασία πραγματεύεται το σχεδιασμό, την ανάπτυξη και τη μελέτη μιας συσκευής ICSWH. Η καινοτομία της συσκευής εντοπίζεται στη συνδυασμένη χρήση καμπύλων κατοπτρικών διατάξεων σύνθετης γεωμετρίας, υλικών αλλαγής φάσης αλλά και χρήσης μερικού κενού (partial vacuum). Η ηλιακή συσκευή ICSWH περιλαμβάνει δύο ομόκεντρα κυλινδρικά δοχεία τα οποία τοποθετούνται εντός ασύμμετρων καμπύλων κατόπτρων σύνθετης γεωμετρίας. Εντός του εσωτερικού κυλινδρικού δοχείου αποθηκεύεται το θερμό νερό χρήσης, ενώ ο χώρος μεταξύ των ομόκεντρων κυλινδρικών δοχείων βρίσκεται υπό μερικό κενό και προτείνεται να πληρώνεται μερικώς με επιλεγμένα υλικά αλλαγής φάσης (Phase Change Materials, PCM). Το εξωτερικό κυλινδρικό δοχείο λειτουργεί ως θερμικός απορροφητής, ο οποίος θερμαίνεται, μεταφέρει (μέσω συναγωγής) θερμότητα στο PCM, το οποίο ακολούθως αλλάζει φάση (από υγρή σε αέρια) και μέσω συμπύκνωσης μεταφέρει τη θερμική ενέργεια στο εσωτερικό δοχείο, αυξάνοντας τη θερμοκρασία του αποθηκευμένου νερού χρήσης. Η διάταξη αυτή εξασφαλίζει την αυξημένη θερμική μόνωση του εσωτερικού δοχείου και τη σημαντική μείωση των θερμικών απωλειών. Παρουσιάζονται αποτελέσματα από την οπτική ανάλυση της διάταξης κυλινδρικών δοχείων και καμπύλων κατόπτρων, καθώς και αποτελέσματα από τη λειτουργία της συσκευής σε εξωτερικές συνθήκες περιβάλλοντος, μέσω διαγραμμάτων διακύμανσης τόσο της θερμοκρασίας του νερού χρήσης όσο και της θερμοκρασίας και πίεσης του ατμού εντός του ενδιάμεσου χώρου μεταξύ των κυλινδρικών δοχείων. Παρουσιάζονται διαγράμματα μεταβολής της απόδοσης και του συντελεστή θερμικών απωλειών, συναρτήσει των συνθηκών λειτουργίας του συστήματος ICS. Αναλύονται τα αποτελέσματα και προτείνονται βελτιώσεις και νέες παρεμβάσεις για την αποτελεσματική λειτουργία της ηλιακής συσκευής.

**Λέξεις Κλειδιά:** Ηλιακοί Θερμαντήρες Νερού, Ηλιακές Συσκευές (ICSWH) Συλλέκτη Αποθήκης Θερμότητας, Πειραματική Μελέτη, Υλικά Αλλαγής Φάσης (PCM), Μερικό Κενό.

\*Corresponding Author

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι ηλιακές ολοκληρωμένες θερμικές συσκευές συλλέκτη αποθήκης (Integrated Collector Storage Solar Water Heaters, ICSWH) ανήκουν στην κατηγορία των ηλιακών θερμαντήρων νερού χαμηλού κόστους που καλύπτουν κυρίως ανάγκες για ζεστό νερό χρήσης, για οικιακές εφαρμογές. Η ανάπτυξη αλλά και οι σημαντικότερες ερευνητικές μελέτες που αφορούν αυτού του τύπου τις συσκευές παρουσιάζονται αναλυτικά στις πρόσφατες εργασίες των Singh et al [1] και Souliotis et al [2]. Οι συσκευές ICSWH παρουσιάζουν υψηλές θερμικές απώλειες, κυρίως τις νυκτερινές ώρες λειτουργίας τους. Οι περισσότερες από τις μελέτες στοχεύουν στη βελτίωση της θερμικής συμπεριφοράς τους, προτείνοντας μεθόδους και τεχνικές μείωσης των θερμικών απωλειών. Μεταξύ των πιο αντιπροσωπευτικών ερευνητικών εργασιών είναι αυτή των Smyth et al. [3] όπου μελετήθηκε η θερμική συμπεριφορά διαφορετικών τύπων ολοκληρωμένων ηλιακών συσκευών συλλέκτη αποθήκης με περιορισμένες θερμικές απώλειες. Η εργασία αναλύει τη λειτουργία των συσκευών σε 24ωρη βάση. Οι Henderson et al. [4] μελέτησαν μια συσκευή ICSWH που διαθέτει επίπεδο συλλέκτη που βρίσκεται σε επαφή με δεξαμενή αποθήκευσης σε διαφορετικές κλίσεις. Μια σημαντική κατηγορία εργασιών είναι αυτές που μελετούν τη δυνατότητα ενσωμάτωσης στο δοχείο ή/και δοχεία αποθήκευσης σύνθετες κατοπτρικές διατάξεις, παραβολικής γεωμετρίας μη ευκρινούς ειδώλου (Compound Parabolic Concentrator, CPC). Στη συγκεκριμένη κατηγορία συσκευών ICSWH, σημαντικό ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας ανακλάται και τελικά συλλέγεται στις απορροφητικές επιφάνειες των δοχείων-απορροφητών [5-12].

Τα υλικά αλλαγής φάσης (Phase Change Materials, PCM) είναι υλικά που αποθηκεύουν θερμότητα λόγω αλλαγής φάσης (λανθάνουσα θερμότητα) διατηρώντας σταθερή τη θερμοκρασία τους. Η ιδέα της χρήσης τέτοιων υλικών στις ηλιακές συσκευές ICSWH προτάθηκε αρχικά ως τεχνική για τη διατήρηση της αποθηκευμένης θερμότητας του ζεστού νερού χρήσης. Οι Haillot et al. [13] μελέτησαν ένα σύστημα που η δεξαμενή αποθήκευσης καλυπτόταν με ένα σύνθετο PCM, ενώ οι Eames και Griffiths [14] παρουσίασαν μια αριθμητική μελέτη της θερμικής συμπεριφοράς μιας συσκευής ICSWH με PCM σε θερμοκρασία 65°C. Οι Griffiths et al. [15] μελέτησαν πειραματικά τη διατήρηση της θερμότητας ενός ICSWH χρησιμοποιώντας PCM σε μορφή κονιάματος. Παρόμοια, οι Al-Hinti et al. [16] μελέτησαν πειραματικά έναν συμβατικό θερμαντήρα νερού χρησιμοποιώντας κερι παραφίνης ως υλικό PCM. Το πλεονέκτημα του συστήματος αυτού εντοπίζεται στο γεγονός ότι το θερμό νερό χρήσης είναι διαθέσιμο για περισσότερο χρονικό διάστημα, ακόμα και πέρα από την περίοδο θέρμανσης. Πρόσφατα, οι Chaabane et al. [17] μελέτησαν υπολογιστικά τη θερμική συμπεριφορά ενός συστήματος ICSWH με κυλινδρικό δοχείο αποθήκευσης με τη χρήση και χωρίς τη χρήση υλικών αλλαγής φάσης, κατάλληλα τοποθετημένου εντός μιας κατοπτρικής διάταξης γεωμετρίας CPC. Η συνδυασμένη χρήση του μερικού νεκού και των υλικών αλλαγής φάσης προτάθηκε αρχικά από τον DeBeijer [18]. Στην εργασία αυτή, προτείνεται μια διάταξη που περιλαμβάνει δύο ομόκεντρα κυλινδρικά δοχεία, στο διάκενο των οποίων διατηρείται νερό σε χαμηλή πίεση. Το νερό κατά τη θέρμανσή του αλλάζει φάση, δημιουργούνται ατμοί και μέσω συμπύκνωσης μεταφέρουν τη θερμότητα στο εσωτερικό δοχείο και κατ' επέκταση στο νερό χρήσης. Ο εξατμιστής (evaporator) βρίσκεται στην εσωτερική πλευρά της συλλεκτικής-απορροφητικής επιφάνειας και ο συμπυκνωτής (condenser) βρίσκεται στην εξωτερική επιφάνεια του εσωτερικού δοχείου αποθήκευσης του νερού χρήσης. Οι Pugsley et al. [19] ανέπτυξαν ένα παρόμοιο λειτουργικά υβριδικό PVT-ICSWH σύστημα το οποίο έχει τη δυνατότητα να εντάσσεται στο κέλυφος του κτηρίου επιτυγχάνοντας υψηλές τιμές θερμικής και ηλεκτρικής απόδοσης, 60 και 12%, αντίστοιχα. Οι Rhee et al. [20] μέτρησαν πειραματικά τη θερμοκρασιακή διαστρωμάτωση του θερμού νερού αποθήκευσης χρησιμοποιώντας ένα διπλό σωλήνα που λειτουργεί ως θερμική δίοδος. Πρόσφατα, οι Smyth et al. [21] μελέτησαν μια βελτιωμένη συσκευή ICSWH σε κατακόρυφη διάταξη, της ίδιας βασικής αρχής λειτουργίας, μέσω θερμικής δίοδου η οποία παρουσιάζει υψηλές τιμές θερμικής απόδοσης.

Στις εργασίες των Souliotis et al. [22] και Souliotis et al. [23] μελετήθηκε εναλλακτική σχεδίαση μιας συσκευής που βασίζεται στη χρήση της θερμικής δίοδου ως μηχανισμό θέρμανσης σε συνδυασμό με τη συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας, μέσω σύνθετης καμπύλης κατοπτρικής διάταξης. Στην πρώτη εκ των δύο εργασιών [22] μελετήθηκε θεωρητικά η οπτική συμπεριφορά της συσκευής, όπου αναλύθηκαν τα αποτελέσματα από την ανομοιόμορφη κατανομή της απορροφούμενης ηλιακής ακτινοβολίας στην εξωτερική επιφάνεια του απορροφητή. Υπολογίστηκε αριθμητικά και θεωρητικά η οπτική απόδοση της συσκευής και παρουσιάστηκαν τα πρώτα αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών. Στην εργασία που ακολούθησε [23] παρουσιάστηκαν εκτενή αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών όπου μελετήθηκε, μεταξύ άλλων, η επίδραση της αρχικής πίεσης, εντός του διάκενου μεταξύ των ομόκεντρων κυλινδρικών δοχείων, στην ανύψωση της θερμοκρασίας του νερού χρήσης. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται αναλυτικά η σχεδίαση και η λειτουργία της εν λόγω συσκευής.

Παράλληλα αναλύονται τα αποτελέσματα της οπτικής μελέτης αλλά και το σύνολο των πειραματικών δοκιμών. Προτείνονται βελτιώσεις καθώς και τα μελλοντικά βήματα ανάπτυξης μιας ολοκληρωμένης λύσης αποθήκευσης νερού χρήσης με χαμηλό κόστος και υψηλή απόδοση.

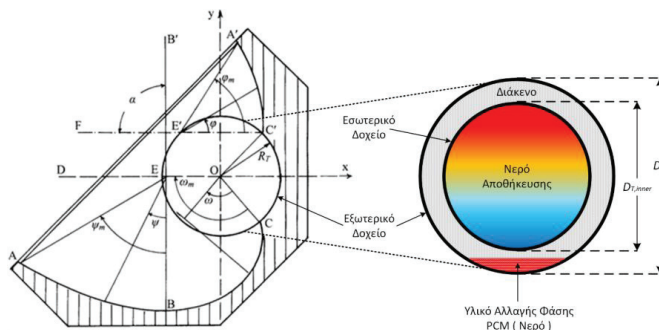
## 2. ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ICSWH

### 2.1. Γενικά χαρακτηριστικά της σχεδίασης των ηλιακών συσκευών ICSWH

Το κυρίαρχο λειτουργικό χαρακτηριστικό των ηλιακών συσκευών ICSWH είναι ότι ενσωματώνουν τον απορροφητή και το δοχείο αποθήκευσης σε ενιαία μονάδα. Η αναγκαστική έκθεση του δοχείου αποθήκευσης στις εξωτερικές συνθήκες επιφέρει υψηλές θερμικές απώλειες των συσκευών αυτού του τύπου προς το περιβάλλον. Η διατήρηση της αποθηκευμένης θερμότητας αποτελεί βασικό κριτήριο για την αποτελεσματική χρήση τους. Επιπλέον, η απαίτηση για άμεση θερμοκρασιακή απόκριση των συσκευών (θερμοκρασία του νερού αποθήκευσης), στη διάρκεια της ημερήσιας λειτουργίας τους, αποτελεί επιπλέον κριτήριο για την αποδοτική τους λειτουργία. Αυτά τα δύο χαρακτηριστικά καθορίζουν μια σειρά από παραμέτρους που λαμβάνονται υπόψη κατά τη σχεδίαση των συσκευών ICSWH. Από τα αποτελέσματα των έως τώρα ερευνητικών εργασιών και λαμβάνοντας υπόψη τα δύο παραπάνω αναφερθέντα κριτήρια, συμπεραίνεται ότι είναι αναγκαία η συνδυασμένη χρήση καμπύλων κατοπτρικών διατάξεων και μεθόδων ελαχιστοποίησης των συνολικών διαστάσεων των συσκευών [1, 2].

### 2.2. Γεωμετρία και περιγραφή της λειτουργίας της ηλιακής συσκευής ICSWH

Η σχεδίαση της ηλιακής συσκευής ICSWH λαμβάνει υπόψη την ανάγκη για έντονη θερμοκρασιακή διαστρωμάτωση του νερού αποθήκευσης. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με την απαίτηση για περιορισμό των διαστάσεων της, οδηγεί στη σχεδίαση μιας διάταξης με οριζόντια προσαρμογή του δοχείου αποθήκευσης, με ταυτόχρονη χρήση καμπύλου κατόπτρου. Η συσκευή ICSWH συνδυάζει δύο ομόκεντρα κυλινδρικά δοχεία, οριζόντια τοποθετημένα εντός μιας ασύμμετρα τμημένης καμπύλης κατοπτρικής διάταξης γεωμετρίας CPC. Η γεωμετρία του κατόπτρου στοχεύει στην μεγιστοποίηση της συγκέντρωσης της απορροφούμενης ηλιακής ακτινοβολίας στα ανώτερα αλλά και στα κατώτερα τμήματα της απορροφητικής επιφάνειας. Η συγκεκριμένη γεωμετρία έχει προταθεί από τους Tripanagnostopoulos and Souliotis [8], όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 1. Στόχος της είναι ο περιορισμός των θερμικών απωλειών από μετάδοση με μεταφορά. Το δοχείο αποθήκευσης, η τομή του οποίου παρουσιάζεται επίσης στην εικόνα 1, αποτελείται από δύο ομόκεντρα κυλινδρικά δοχεία: το εξωτερικό κυλινδρικό δοχείο που λειτουργεί ως απορροφητής και το εσωτερικό δοχείο που λειτουργεί ως δοχείο αποθήκευσης του νερού χρήσης. Το διάκενο μεταξύ των δοχείων βρίσκεται υπό μερικό κενό και περιέχει μια μικρή ποσότητα νερού (4 kg), το οποίο λειτουργεί ως υλικό αλλαγής φάσης. Κατά τη απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας, το εξωτερικό δοχείο θερμαίνεται και μέσω συναγωγής θερμαίνεται η ποσότητα του νερού στο διάκενο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ατμού και ακολούθως, μέσω συμπύκνωσής του στην εξωτερική επιφάνεια του εσωτερικού κυλινδρικού δοχείου, μεταφέρεται η θερμότητα που τελικά αποθηκεύεται στο νερό χρήσης. Με τη διάταξη αυτή τελικά δημιουργείται ένας μηχανισμός θερμικής διόδου, από το εξωτερικό (απορροφητής) προς το εσωτερικό δοχείο (αποθήκη).



Εικόνα 1: Τομή της συγκεντρωτικής διάταξης της ηλιακής συσκευής ICSWH [8]. Γεωμετρικά στοιχεία της σχεδίασης, παράμετροι και βασική αρχή λειτουργίας της.

Σύμφωνα με τη γεωμετρία της υπό μελέτη συσκευής, η γωνία  $\alpha$  ( $\alpha=90^\circ$ ), η οποία διαμορφώνεται από τους άξονες  $BB'$  και  $FE'C'$ , καθορίζει τη γωνία υποδοχής της εισερχόμενης ηλιακής. Το πλάτος ανοίγματος της συσκευής ισούται προς  $W_a = [AA']$ , ενώ  $R_T$  και  $D_T$  είναι αντίστοιχα η ακτίνα και η διάμετρος του δοχείου αποθήκευσης. Η γωνία  $\omega$  καθορίζει το κατοπτρικό τμήμα (BC) γεωμετρίας involute (ανελιγμένο κύκλου). Οι γωνίες  $\psi$  και  $\varphi$  καθορίζουν τα παραβολικά κατοπτρικά τμήματα (AB) και (C'A') αντίστοιχα. Οι μέγιστες τιμές των γωνιών καθορίζουν τελικά τις διαστάσεις της σύνθετης κατοπτρικής διάταξης, όπου  $\omega_m = 135^\circ$ , και (r)angles)  $\psi_m = 58.24^\circ$  &  $\varphi_m = 57.95^\circ$ . Οι εστιακές αποστάσεις για τα παραβολικά καμπύλα κατοπτρικά τμήματα ανέρχονται σε  $f_1 = [BE] = 3 \cdot \pi \cdot R_T/4$  για το τμήμα (AB) και  $f_2 = [C'E'] = \sqrt{2} \cdot R_T$  για το τμήμα (C'A'). Οι εξισώσεις των καμπύλων κατοπτρικών τμημάτων, λαμβάνονται σύμφωνα με το υποδεικνυόμενο σύστημα συντεταγμένων της εικόνας 1:

Παραβολικό Τμήμα (AB):

$$\left. \begin{aligned} x &= -R_T \cdot \left[ 1 + \left( \frac{3 \cdot \pi}{2} \right) \cdot \frac{\sin \psi}{(1 + \cos \psi)} \right] \\ y &= -R_T \cdot \left( \frac{3 \cdot \pi}{2} \right) \cdot \frac{\cos \psi}{(1 + \cos \psi)} \end{aligned} \right\}, \quad 0^\circ \leq \psi \leq \psi_m = 58.25^\circ \quad (1)$$

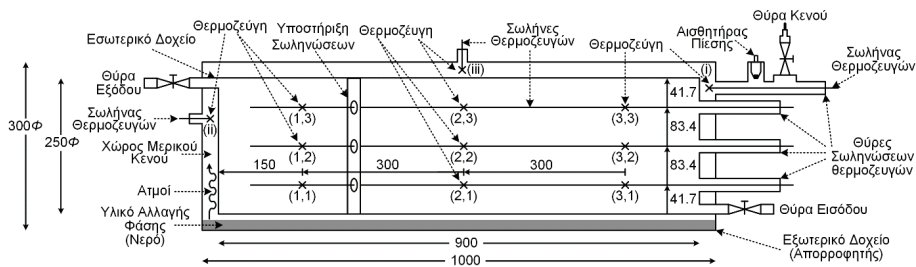
Involute Τμήμα (BC):

$$\left. \begin{aligned} x &= -R_T \cdot \left[ \sin \left( \omega - \frac{\pi}{4} \right) - \omega \cdot \cos \left( \omega - \frac{\pi}{4} \right) \right] \\ y &= -R_T \cdot \left[ \cos \left( \omega - \frac{\pi}{4} \right) + \omega \cdot \sin \left( \omega - \frac{\pi}{4} \right) \right] \end{aligned} \right\}, \quad 0^\circ \leq \omega \leq \omega_m = 135^\circ \quad (2)$$

Παραβολικό Τμήμα (C'A'):

$$\left. \begin{aligned} x &= R_T \cdot \left[ \frac{\sqrt{2}}{2} - 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{\cos \varphi}{(1 + \cos \varphi)} \right] \\ y &= R_T \cdot \left[ \frac{\sqrt{2}}{2} + 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{\sin \varphi}{(1 + \cos \varphi)} \right] \end{aligned} \right\}, \quad 0^\circ \leq \varphi \leq \varphi_m = 57.95^\circ \quad (3)$$

Το μη φωτιζόμενο τμήμα της απορροφητικής επιφάνειας (CC') είναι θερμικά μονωμένο με πολυουρεθάνη θερμικής αγωγιμότητας  $k = 0.05 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  και πάχους  $d = 0.05 \text{ m}$  ( $k/d = 1 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1}$ ). Η ηλιακή συσκευή τοποθετείται με κλίση  $45^\circ$  προς το οριζόντιο επίπεδο και στην επιφάνεια ανοίγματος τοποθετείται αρχικά ένα και κατόπιν δύο διάφανα γυάλινα καλύμματα (Pilkington Optiwhite™) πάχους 4 mm το καθένα, που παρουσιάζουν υψηλές τιμές διαπερατότητας (συνολική διαπερατότητα  $\tau = 0.90$ , σε κάθετη πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας για το κάθε κάλυμμα). Η απορροφητική επιφάνεια (εξωτερικό δοχείο) καλύπτεται με επιλεκτική επίστρωση, για τον περιορισμό των θερμικών απωλειών λόγω ακτινοβολίας, με συντελεστή απορρόφησης (απορροφητικότητα)  $\alpha_r = 0.97$  και συντελεστή εκπομπής (εκπεμπιμότητα)  $\varepsilon_r = 0.11$  (MAXORB, Electrochemicals Ltd). [24]. Η ανακλαστική επιφάνεια (aluminized mylar) των καμπύλων κατοπτρικών τμημάτων παρουσιάζει μέσο συντελεστή ανάκλασης, για το σύνολο των γωνιών πρόσπτωσης,  $\rho_r = 0.85$ .



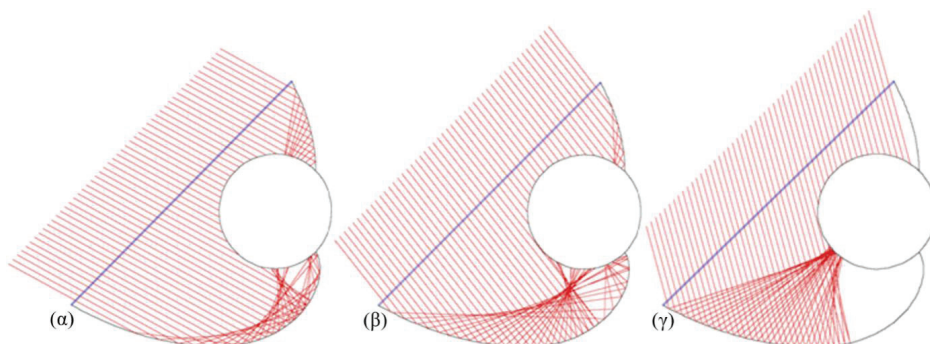
Εικόνα 2: Τομή της εμπρόσθιας όψης των ομόκεντρων κυλινδρικών δοχείων της ηλιακής συσκευής ICSWH. Περιγραφή, διαστάσεις και λεπτομέρειες της κατασκευής, χωροθέτηση των αισθητήρων μέτρησης της θερμοκρασίας ατμών και νερού χρήσης και της συνολικής πίεσης του διάκενου.

Η τομή της εμπρόσθιας όψης των δύο ομόκεντρων δοχείων της ηλιακής συσκευής παρουσιάζεται στην εικόνα 2. Το διπλό δοχείο αποτελείται από δύο ομόκεντρα κυλινδρικά δοχεία, κατασκευασμένα από ανοξείδωτο χάλυβα. Το διάκενο μεταξύ των δοχείων βρίσκεται υπό μερικό κενό και περιέχει νερό, το οποίο λειτουργεί ως υλικό αλλαγής φάσης (Phase Change Material, PCM). Η διάταξη των δύο

κυλινδρικών δοχείων τοποθετείται οριζόντια και προσανατολίζεται στον άξονα Ανατολή-Δύση. Το εσωτερικό δοχείο, το οποίο περιέχει το αποθηκευμένο νερό χρήσης έχει όγκο  $V_{T,inner} = 44.18$  l και το νερό εντός του διακένου καταλαμβάνει όγκο  $V_{T,annulus} = 4$ l. Ο συνολικός όγκος του νερού λαμβάνεται ίσος προς  $V_T = 48.18$  l, ενώ η συνολική μάζα των δύο δοχείων (εσωτερικό και εξωτερικό) ισούται προς  $M_T = 29.4$  kg. Το 75% της απορροφητικής επιφάνειας (εξωτερικό δοχείο) είναι εκτεθειμένο στις εισερχόμενες ηλιακές ακτίνες και το υπόλοιπο ποσοστό είναι θερμικά μονωμένο. Το εμβαδό της απορροφητικής επιφάνειας, (CEC'), ισούται προς  $A_r = 0.707$  m<sup>2</sup> και το συνολικό εμβαδό του ανοίγματος της συσκευής, (AA'), ισούται προς  $A_a = 0.827$  m<sup>2</sup>, δίνοντας ένα γεωμετρικό λόγο συγκέντρωσης (Concentration Ratio)  $CR = 1.17$ . Το πηλίκο του όγκου του αποθηκευμένου νερού χρήσης προς την επιφάνεια ανοίγματος καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την θερμοκρασιακή απόκριση της ηλιακής συσκευής και ισούται προς  $V_{T,inner} / A_a = 53.42$  l·m<sup>-2</sup>.

### 3. ΟΠΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΣΥΛΕΥΗΣ ICSWH

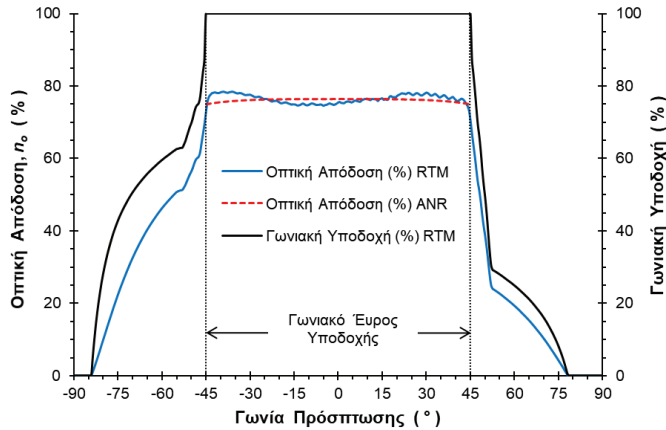
Η οπτική ανάλυση της ηλιακής συσκευής ICSWH πραγματοποιήθηκε με δύο μεθόδους. Η πρώτη αφορά την υπολογιστική μέθοδο ανάλυσης πορείας ακτίνων (RayTracing Method, RTM) και η δεύτερη τη θεωρητική μέθοδο του μέσου αριθμού ανακλάσεων (Average Number of Reflections, RTM). Η οπτική μελέτη μέσω της εφαρμογής της μεθόδου RTM σε δύο διαστάσεις έχει ευρέως εφαρμοστεί στην οπτική ανάλυση θερμικών συλλεκτών αλλά και συστημάτων ICSWH, που ενσωματώνουν κατοπτρικές διατάξεις. Χαρακτηριστικές εργασίες θεωρούνται αυτές των Zacharopoulos et al. [25] και Souliotis και Tzirapagnostopoulos [9], όπου αναλύονται σε λεπτομέρειες τα βήματα και η διαδικασία ανάπτυξης των υπολογιστικών μοντέλων ανάλυσης πορείας ακτίνων. Η διαδικασία ακολουθεί ένα σχετικά μεγάλο αριθμό διαδρομών από ακτίνες που ομοιόμορφα κατανέμονται στην επιφάνεια ανοίγματος της συσκευής. Παράμετρος, που διαφοροποιεί τον αριθμό των ακτίνων αλλά και της διαδρομής τους εντός του κατοπτρικού συστήματος, είναι η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας σε σχέση με την επιφάνεια ανοίγματος. Κατά τη διαδικασία μιας τέτοιας μελέτης, η ανάλυση, αναφορικά με τις ανακλάσεις στις κατοπτρικές επιφάνειες, λαμβάνονται είτε ως πλήρως κατοπτρικές (specular) είτε κατά ένα ποσοστό ως κατοπτρικές και ένα ποσοστό ως διάχυτες (diffuse), διαφοροποιώντας σημαντικά τον υπολογιστικό χρόνο προσομοίωσης. Σύμφωνα με την υπολογιστική μέθοδο RTM αναλύθηκε η οπτική συμπεριφορά της συσκευής ICSWH και ελήφθησαν αποτελέσματα κατανομής της απορροφούμενης ηλιακής ακτινοβολίας στην εξωτερική κυλινδρική επιφάνεια. Στην εικόνα 3 παρουσιάζονται χαρακτηριστικά αποτελέσματα της ανάλυσης της πορείας ακτίνων κατά την προσομοίωση για πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας κατά το χειμερινό (α) και θερινό ηλιοστάσιο (γ) αλλά και την ισημερία (β). Τα αποτελέσματα ελήφθησαν, θεωρώντας ότι η συσκευή τοποθετείται σε νότιο προσανατολισμό και σε κλίση 45°, σύμφωνα με τη γεωμετρική ανάλυση που προηγήθηκε. Από τα αποτελέσματα διαπιστώνεται ότι η κατανομή της ακτινοβολίας στον απορροφητή παρουσιάζει ανομοιομορφία, γεγονός που σε συνδυασμό με την ασύμμετρη καμπύλη κατοπτρική διάταξη, καθίσταται κρίσιμος παράγοντας αναφορικά με τη θερμική της απόκριση στη διάρκεια της ημερησίας λειτουργίας της [9].



Εικόνα 3: Διαγράμματα ανάλυσης της πορείας ηλιακών ακτίνων (RayTracing) της συγκεντρωτικής διάταξης για το χειμερινό ηλιοστάσιο (α), την ισημερία (β) και το θερινό ηλιοστάσιο (γ).

Λαμβάνοντας τα αποτελέσματα από την οπτική ανάλυση της συγκεντρωτικής διάταξης υπολογίστηκε η οπτική της απόδοση, δηλαδή το ποσοστό της ακτινοβολίας που λαμβάνεται στον απορροφητή σε

σχέση με την προσπίπτουσα. Τα αποτελέσματα ελήφθησαν συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια ανοίγματος της συσκευής. Η μεταβολή της οπτικής απόδοσης αλλά και της «γωνιακής υποδοχής» (Angular Acceptance) παρουσιάζονται στα διαγράμματα της εικόνας 4. Ο όρος «γωνιακή υποδοχή» είναι αδόκιμος και εκφράζει τη μέγιστη τιμή της απορροφούμενης ακτινοβολίας στον απορροφητή, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη η διαπερατότητα του διαφανούς καλύμματος, η ανακλαστικότητα των κατοπτρικών διατάξεων αλλά και η απορροφητικότητα του απορροφητή. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι τιμές της οπτικής απόδοσης παρουσιάζουν μια μικρή διακύμανση (75 – 78 %) όταν η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας είναι εντός της γωνίας υποδοχής,  $\alpha$ . Καθώς η γωνία πρόσπτωσης αυξάνει πέρα της γωνίας υποδοχής, η οπτική απόδοση παρουσιάζει σημαντικά χαμηλότερες τιμές. Αυτό οφείλεται στο ότι σημαντικό ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας δεν απορροφάται και έτσι οι ανακλώμενες ακτίνες οδηγούνται εκτός εστίας και τελικά εκτός της κατοπτρικής διάταξης της συσκευής. Οι διακυμάνσεις στις τιμές της οπτικής απόδοσης παρουσιάζονται στο διάγραμμα με ασύμμετρο τρόπο, ως αποτέλεσμα της αντίστοιχης ασύμμετρης γεωμετρίας της συσκευής.



Εικόνα 4: Διαγράμματα μεταβολής της οπτικής απόδοσης και της «γωνιακής υποδοχής» της ηλιακής συσκευής, συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας.

Στην εικόνα 5, επίσης, παρουσιάζονται αποτελέσματα μεταβολής της οπτικής απόδοσης της συσκευής, υπολογισμένης μέσω της μεθόδου ANR. Η μέθοδος του μέσου αριθμού ανακλάσεων προτάθηκε από τον Rabl [26] το 1977, ως μια τεχνική υπολογισμού της οπτικής απόδοσης των συγκεντρωτικών συσκευών, σύμφωνα με την οποία λαμβάνεται υπόψη ο μέσος αριθμός ανακλάσεων της ηλιακής ακτινοβολίας μέχρι τη τελική απορρόφηση της από το δέκτη. Η βασική θεώρηση συνίσταται στο ότι το ποσοστό της ακτινοβολίας που δύναται να απορροφηθεί εξαρτάται από την ανακλαστικότητα της κατοπτρικής επιφάνειας. Αυτό σημαίνει ότι η οπτική απόδοση του συγκεντρωτικού μέσου λαμβάνεται ως ένας συντελεστής διαπερατότητας, κατά τη διέλευση της ηλιακής ακτινοβολίας μέσω αυτού και προσεγγιστικά εκφράζεται ως  $\tau \approx \rho^{<N>}$ . Η ποσότητα  $<N>$  εκφράζει το μέσο αριθμό ανακλάσεων του συνόλου των ηλιακών ακτίνων που απορροφούνται από το δέκτη της συσκευής, όταν αυτές προσπίπτουν με γωνία που βρίσκεται εντός της γωνίας υποδοχής της κατοπτρικής διάταξης. Το πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι ο υπολογισμός της οπτικής απόδοσης πραγματοποιείται αναλυτικά δίχως την ανάγκη ανάπτυξης υπολογιστικών μοντέλων πορείας ακτίνων, τα οποία παρόλο που παρουσιάζουν μεγάλη ακρίβεια, είναι δύσχερα, αναφορικά με τη δυνατότητα άμεσης παραμετροποίησης της κατοπτρικής διάταξης. Στην περίπτωση αυτή, η οπτική απόδοση,  $n_0$  μιας συγκεντρωτικής ηλιακής συσκευής εκφράζεται μέσω της σχέσης:

$$n_0 = \tau_r(\theta) \cdot \alpha_r \cdot \rho_r^{<N>} \cdot \gamma \quad (4)$$

Ο παράγοντας  $\tau_r(\theta)$  αντιστοιχεί στον ολικό συντελεστή διαπερατότητας της ηλιακής ακτινοβολίας η οποία διέρχεται μέσω του διαφανούς καλύμματος της συσκευής. Η τιμή του συντελεστή εξαρτάται από τη γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας,  $\theta$ . Οι παράγοντες  $\alpha_r$  και  $\rho_r$  εκφράζουν αντίστοιχα την απορροφητικότητα της επιφάνειας του απορροφητή και την ανακλαστικότητα της κατοπτρικής επιφάνειας, οι τιμές των οποίων θεωρούνται ότι είναι ανεξάρτητες της γωνίας πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας, στην επιφάνεια ανοίγματος της συσκευής. Ο συντελεστής  $\gamma$  είναι ένας

διορθωτικός παράγοντας που καθορίζει το ποσοστό της συλλεγόμενης διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας από τη συσκευή. Η τιμή του εξαρτάται από τη γωνία υποδοχής της ηλιακής ακτινοβολίας από το κάτοπτρο, που πρακτικά σημαίνει ότι εξαρτάται από το γεωμετρικό λόγο συγκέντρωσης (CR) της κατοπτρικής διάταξης.

Ο μέσος αριθμός ανακλάσεων,  $\langle N \rangle$  τελικά καθορίζεται με βάση τη σχέση:

$$\langle N \rangle = \frac{A_m}{A_r} \cdot E_{m-r} \quad (6)$$

$A_m$  και  $A_r$  είναι τα εμβαδά της ανακλαστικής και απορροφητικής επιφάνειας της συσκευής και  $E_{m-r}$  ο παράγοντας ανταλλαγής θερμικής ακτινοβολίας. Εφαρμόζοντας κατάλληλη άλγεβρα, ο μέσος αριθμός ανακλάσεων,  $\langle N \rangle$  εκφράζεται τελικά ως:

$$\langle N \rangle = \frac{1}{4} \cdot \left[ \frac{3\pi}{8} + Z(\psi_m) + \frac{4\sqrt{2}}{3\pi} \cdot Z(\varphi_m) \right] \quad (7)$$

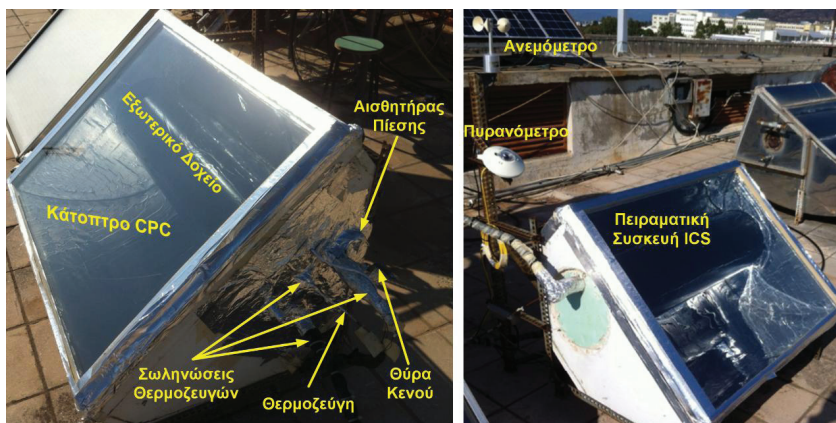
Όπου:

$$Z(\delta) = \frac{\sqrt{2} \cdot [1 - \cos \delta]^{\frac{1}{2}} - 1 + \cos \delta}{1 + \cos \delta} + \ln \frac{\sin \delta + \sqrt{2} \cdot [1 - \cos \delta]^{\frac{1}{2}}}{1 + \cos \delta} \quad (8)$$

Στην εξίσωση (7) οι γωνίες  $\psi_m$  και  $\varphi_m$  είναι αντίστοιχα οι μέγιστες γωνίες (rimangles) των παραβολικών κατοπτρικών τμημάτων (AB) και (C'A'), όπως φαίνονται στην εικόνα 1. Αντικαθιστώντας τις τιμές των μεγίστων γωνιών  $58.24^\circ$  και  $57.95^\circ$ , ο μέσος αριθμός ανακλάσεων τελικά υπολογίζεται ως  $\langle N \rangle = 0.6376$ . Η οπτική απόδοση,  $\eta_o$  καθορίζεται μέσω της εξίσωσης (4) αντικαθιστώντας τη συνολική διαπερατότητα του διαφανούς καλύμματος και την ανακλαστικότητα της κατοπτρικής διάταξης. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα μεταβολής της οπτικής απόδοσης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας (εικόνα 4) για τις μεθόδους RTM και ANR διαπιστώνεται πλήρης σύμπτωση.

#### 4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΣΥΛΕΥΗΣ ICSWH

Για την πειραματική αξιολόγηση της συσκευής χρησιμοποιήθηκαν ένα πυρανόμετρο CMP6 (Kipp & Zonen) με ημερησία αβεβαιότητα  $< 5\%$  για τη μέτρηση της συνολικής προσπίπτουσας ηλιακής ισχύος ( $W \cdot m^{-2}$ ) και ένα ανεμόμετρο A100LK (Windspeed Limited / Vector Instruments) με αβεβαιότητα  $\pm 0.1 m \cdot s^{-1}$  για τη μέτρηση της ταχύτητας του πνέοντος ανέμου ( $m \cdot s^{-1}$ ). Για τη μέτρηση των θερμοκρασιών του νερού αποθήκευσης, της θερμοκρασίας των ατμών εντός του διακένου αλλά και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, χρησιμοποιήθηκαν θερμοζεύγη τύπου T (χαλκού – κοσταντάνης, Cu-CuNi) με αβεβαιότητα μέτρησης  $\pm 1^\circ C$ . Η συνολική πίεση των ατμών εντός του διάκενου μεταξύ των κυλινδρικών δοχείων μετρήθηκε μέσω κατάλληλου αισθητήρα (pressure transducer sensor) PMP 4311 (General Electric Measurement & Control), με αβεβαιότητα μέτρησης  $\pm 2.325\%$ . Τα δεδομένα από τις πειραματικές δοκιμές αποθηκεύτηκαν σε ένα CR1000 data logger (Campbell Scientific Inc.).



Εικόνα 5: Εγκατάσταση της ηλιακής συσκευής στον πειραματικό χώρο δοκιμών. Λεπτομέρειες της κατασκευής και των οργάνων πειραματικής μελέτης.

#### 4.1. Μέθοδος των πειραματικών δοκιμών της ηλιακής συσκευής ICSWH

Η ηλιακή συσκευή ICSWH μελετήθηκε πειραματικά σε εξωτερικές συνθήκες, με κύριο σκοπό τον καθορισμό της θερμοκρασιακής απόκρισης αλλά και θερμοκρασιακής διαστρωμάτωσης του νερού αποθήκευσης. Με βάση τα αποτελέσματα αυτά υπολογίστηκαν τόσο η μέση ημερήσια θερμική απόδοση,  $\eta_D$ , όσο και ο συντελεστής νυκτερινών θερμικών απωλειών,  $U_S$ , της συσκευής. Η θερμοκρασιακή διαστρωμάτωση είναι σημαντική παράμετρος που σχετίζεται με πρακτικά οφέλη της ηλιακής συσκευής. Κατά την ημερήσια λειτουργία της, η θερμοκρασιακή διαστρωμάτωση σχετίζεται με την ανομοιόμορφη κατανομή της απορροφούμενης ηλιακής ακτινοβολίας στον απορροφητή αλλά και με τη διαδικασία εξάτμισης του νερού (PCM) εντός του διακένου. Για τον ακριβή καθορισμό της διακύμανσης της θερμοκρασίας του νερού εντός του δοχείου αποθήκευσης (εσωτερικό δοχείο), ένα σύνολο από 9 θερμοζεύγη τοποθετήθηκαν εντός του δοχείου, όπως υποδεικνύεται στην εικόνα 2. Αυτά τοποθετήθηκαν σε τρία επίπεδα και κατά μήκος του δοχείου αποθήκευσης (επίπεδο 1 (1,1), (1,2), (1,3), επίπεδο 2: (2,1), (2,2), (2,3) και επίπεδο 3: (3,1), (3,2), (3,3)). Εντός του διακένου τοποθετήθηκαν τρία θερμοζεύγη στις θέσεις όπως υποδεικνύονται στην εικόνα 2 (θέσεις (i), (ii) και (iii)). Στην εικόνα 5 παρουσιάζεται η συσκευή, εγκατεστημένη στον πειραματικό χώρο δοκιμών, όπου μεταξύ άλλων υποδεικνύονται λεπτομέρειες της διάταξης και των οργάνων μέτρησης των μετεωρολογικών συνθηκών. Σύμφωνα με τις θερμοκρασίες μέτρησης του νερού εντός του εσωτερικού δοχείου αποθήκευσης, η μέση θερμοκρασία του νερού υπολογίζεται ως:

$$T_{w,m} = \frac{1}{9} \cdot \left[ \sum_{j=1}^3 \left( \sum_{i=1}^3 T_{i,j} \right) \right] \quad (9)$$

Αντίστοιχα,

η μέση τιμή της θερμοκρασίας των ατμών εντός του διακένου μεταξύ των κυλινδρικών δοχείων αποθήκευσης υπολογίζεται ως:

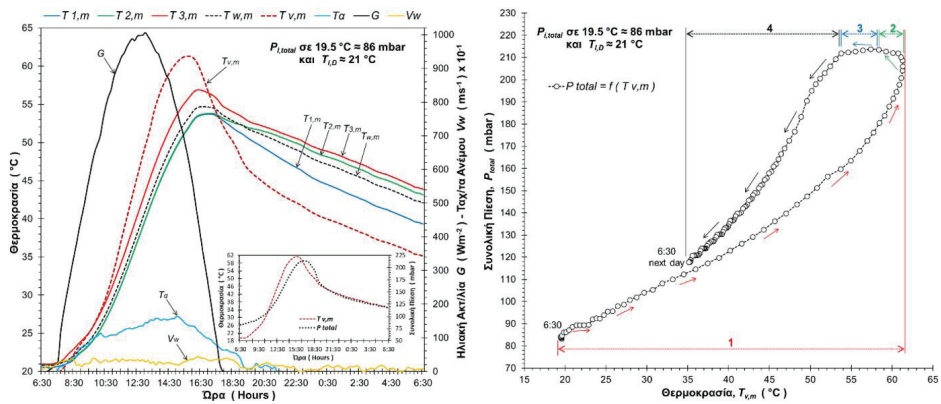
$$T_{v,m} = \frac{1}{3} \cdot \sum_{i=1}^{iii} T_{v,j} = \frac{1}{3} \cdot (T_{v,i} + T_{v,ii} + T_{v,iii}) \quad (10)$$

Η πειραματική μεθοδολογία για τον υπολογισμό της μέσης ημερήσιας απόδοσης,  $\eta_D$ , και του συντελεστή νυκτερινών θερμικών απωλειών,  $U_S$  έχει παρουσιαστεί αναλυτικά σε προηγούμενες δημοσιευμένες εργασίες των συγγραφέων [5-11]. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονιστεί ότι η μεθοδολογία για τον υπολογισμό της μέσης ημερήσιας απόδοσης παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις κατά την εφαρμογή της σε ετήσια βάση. Για το λόγο αυτό η μεθοδολογία έχει εφαρμοστεί για πολύ συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και τα αποτελέσματα που ελήφθησαν χρησιμοποιούνται συγκριτικά.

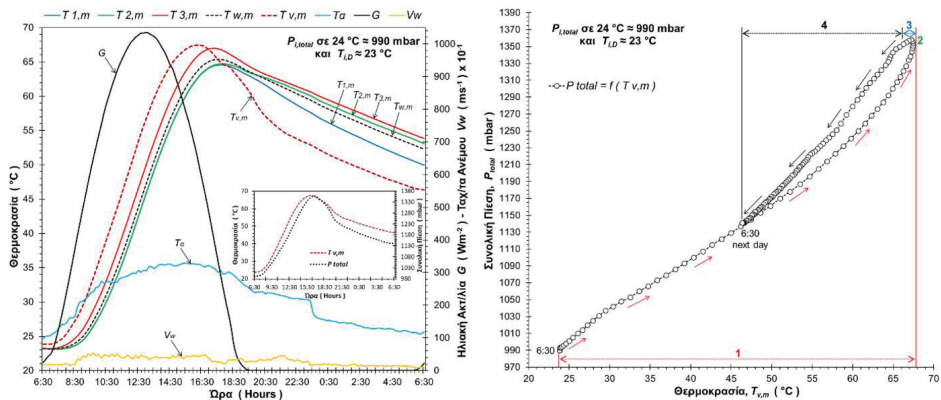
#### 4.2. Αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών της ηλιακής συσκευής ICSWH

Οι πειραματικές δοκιμές της ηλιακής συσκευής πραγματοποιήθηκαν για τρία έτη (2014 έως 2016) κατά τη θερινή περίοδο μεταξύ Ιουνίου και Ιουλίου. Με δεδομένο ότι η ηλιακή συσκευή τοποθετήθηκε σε εξωτερικό πειραματικό χώρο δοκιμών, για τη λήψη των πειραματικών αποτελεσμάτων εξασφαλίστηκαν παρόμοιες συνθήκες λειτουργίας (πυκνότητα ηλιακής ισχύος, ταχύτητα πνέοντος ανέμου, θερμοκρασία περιβάλλοντος και αρχικές θερμοκρασίες αποθηκευμένου νερού χρήσης) με σκοπό τη συγκριτική λειτουργία της. Η βασική παράμετρος που καθόρισε την πειραματική διαδικασία ήταν η αρχική πίεση εντός του διακένου μεταξύ των ομόκεντρων κυλινδρικών δοχείων. Η πίεση καθορίζει τη θερμοκρασία εξάτμισης του υλικού αλλαγής φάσης (νερό) που βρίσκεται στο διάκενο, το οποίο είναι και το απαραίτητο μέσο για την ύπαρξη της θερμικής διόδου μεταξύ των δύο ομόκεντρων κυλινδρικών δοχείων. Οι αρχικές τιμές της πίεσης ελήφθησαν στη χαμηλότερη δυνατή θερμοκρασία ατμών, η οποία πρακτικά συνέπιπτε με την αρχική θερμοκρασία εκκίνησης του νερού στο εσωτερικό δοχείο αποθήκευσης, κατά την 24ωρη λειτουργία της συσκευής. Οι αρχικές πιέσεις και θερμοκρασίες ατμών στο διάκενο ήταν:  $86 \pm 2$  mbar ( $19.5 \pm 1^\circ\text{C}$ ),  $140 \pm 3$  mbar ( $26.0 \pm 1^\circ\text{C}$ ),  $245 \pm 6$  mbar ( $24.0 \pm 1^\circ\text{C}$ ),  $340 \pm 8$  mbar ( $25.0 \pm 1^\circ\text{C}$ ),  $490 \pm 11$  mbar, ( $23.0 \pm 1^\circ\text{C}$ ),  $670 \pm 16$  mbar ( $22.0 \pm 1^\circ\text{C}$ ),  $790 \pm 18$  mbar ( $20.0 \pm 1^\circ\text{C}$ ) και  $990 \pm 23$  mbar ( $24.0 \pm 1^\circ\text{C}$ ). Χαρακτηριστικά αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών κατά την 24ωρη λειτουργία της συσκευής παρουσιάζονται στα διαγράμματα μεταβολής των μετρούμενων παραμέτρων στις εικόνες 6 και 7. Στην εικόνα 6 τα διαγράμματα μεταβολής της θερμοκρασίας του νερού αποθήκευσης, της θερμοκρασίας των ατμών αλλά και της συνολικής πίεσης συναρτήσει του χρόνου, λαμβάνονται για τη χαμηλότερη δυνατή αρχική πίεση  $86 \pm 2$  mbar ( $19.5 \pm 1^\circ\text{C}$ ) την πρώτη μέρα λειτουργίας της συσκευής, ενώ τα αντίστοιχα διαγράμματα της εικόνας 7 λαμβάνονται για τη μέγιστη δυνατή πίεση  $990 \pm 23$  mbar ( $24.0 \pm 1^\circ\text{C}$ ), επίσης την πρώτη μέρα λειτουργίας. Επιλέχθηκαν αυτές οι δύο χαρακτηριστικές περιπτώσεις με σκοπό τη σαφή διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων. Σύμφωνα με τα διαγράμματα μεταβολής (αριστερή πλευρά των εικόνας 6 και 7), είναι προφανές ότι στην περίπτωση της μέγιστης δυνατής αρχικής πίεσης ατμών η θερμοκρασιακή αύξηση αλλά και η διαστρωμάτωση του νερού χρήσης είναι εντονότερη κατά το πέρασμα

της ημερήσιας λειτουργίας της συσκευής, συγκριτικά με την εικόνα των αποτελεσμάτων για την περίπτωση της ελάχιστης δυνατής πίεσης ατμών. Από την άλλη μεριά, η πτώση της θερμοκρασίας στη διάρκεια της νυκτερινής λειτουργίας της συσκευής, στην περίπτωση της χαμηλής πίεσης, είναι μικρότερη συγκριτικά από την αντίστοιχη πτώση της θερμοκρασίας του αποθηκευμένου νερού, στην περίπτωση της μέγιστης δυνατής πίεσης των ατμών. Στα διαγράμματα (δεξιά πλευρά των εικόνων 6 και 7) παρουσιάζονται οι μεταβολές της συνολικής πίεσης ατμών, συναρτήσει της θερμοκρασίας. Τα διαγράμματα P-T-traths, όπως αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία, λαμβάνονται για συνθήκες που παρουσιάζουν έντονη μετάβαση, καθώς το σύστημα δε βρίσκεται σε κατάσταση θερμοκικής ισορροπίας σε όλη τη διάρκεια λειτουργίας της συσκευής. Διαπιστώνεται η ύπαρξη 4 περιοχών στη διάρκεια της 24ωρης λειτουργίας της συσκευής, που περιγράφουν τον μηχανισμό θέρμανσης-αποθέρμανσης, όπως υποδηλώνονται στα διαγράμματα (περιοχές 1, 2, 3 και 4). Οι μεταβολές σχετίζονται με τη διαδικασία εξάτμισης του υλικού αλλαγής φάσης και τελικά της συμπύκνωσης των ατμών του στην εξωτερική επιφάνεια του εσωτερικού δοχείου αποθήκευσης. Οι περιοχές αυτές εμφανίζουν μεγαλύτερη σαφήνεια όταν η αρχική πίεση των ατμών είναι η χαμηλότερη δυνατή, ενώ καθώς η πίεση λαμβάνει μέγιστη τιμή, οι περιοχές 2 και 3 πρακτικά απουσιάζουν. Για τιμές αρχικής πίεσης ατμών που λαμβάνουν ενδιάμεσες τιμές, σε σχέση με τις προαναφερθείσες περιπτώσεις, τα αποτελέσματα παρουσιάζουν αναλογία.



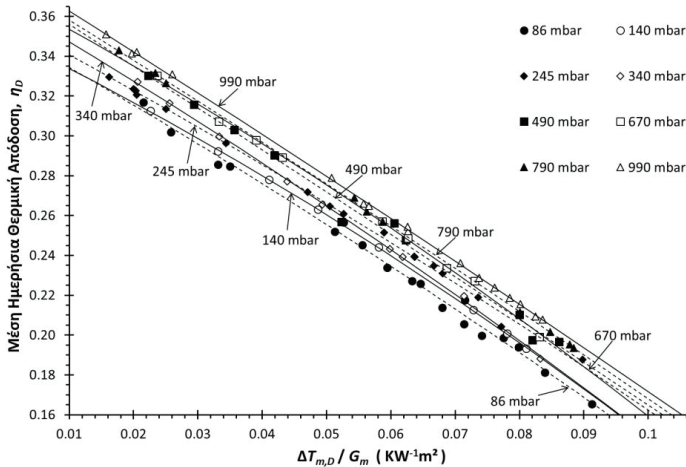
Εικόνα 6: Διαγράμματα μεταβολής των παραμέτρων πειραματικής μελέτης της ηλιακής συσκευής για αρχική πίεση 86 mbar, σε θερμοκρασία 21 °C, στη διάρκεια 24 ωρης λειτουργίας της.



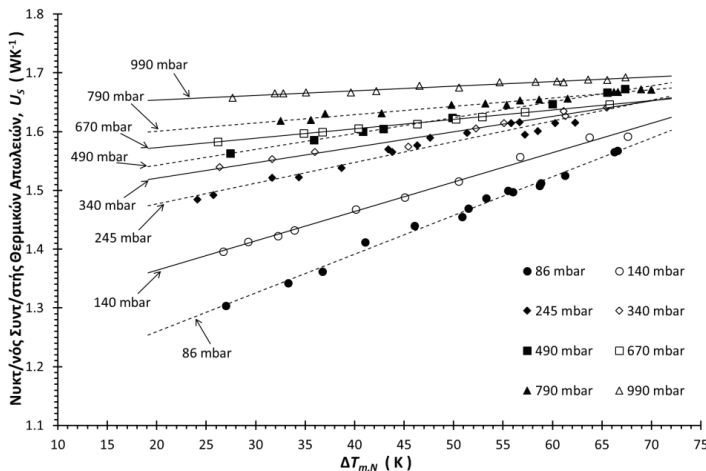
Εικόνα 7: Διαγράμματα μεταβολής των παραμέτρων πειραματικής μελέτης της ηλιακής συσκευής για αρχική πίεση 990 mbar, σε θερμοκρασία 23 °C, στη διάρκεια 24 ωρης λειτουργίας της.

Λαμβάνοντας ικανά αποτελέσματα, όπως περιεγράψαν παραπάνω, για όλες τις περιπτώσεις αρχικής πίεσης ατμών, υπολογίστηκαν αντίστοιχα οι τιμές της μέσης ημερήσιας απόδοσης,  $\eta_D$  και του συντελεστή νυκτερινών θερμικών απωλειών,  $U_{S7}$  της συσκευής. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών

για τις δύο χαρακτηριστικές αυτές παραμέτρους παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στα διαγράμματα μεταβολής τους συναρτήσει των αντίστοιχων συνθηκών λειτουργίας στις εικόνες 8 και 9.



Εικόνα 8: Διαγράμματα μεταβολής της μέσης ημερήσιας απόδοσης της ηλιακής συσκευής ICSWH, για διαφορετικές τιμές αρχικής συνολικής πίεσης, συναρτήσει των συνθηκών λειτουργίας.



Εικόνα 9: Διαγράμματα μεταβολής του συντελεστή νυκτερινών θερμικών απωλειών της ηλιακής συσκευής ICSWH, για διαφορετικές τιμές αρχικής συνολικής πίεσης, συναρτήσει των συνθηκών λειτουργίας.

Η εικόνα 8 περιλαμβάνει τη μεταβολή της μέσης ημερήσιας απόδοσης της συσκευής ICSWH συναρτήσει των συνθηκών λειτουργίας της ( $\Delta T_{m,D}/G_m$ ) για κάθε μία από τις αρχικές πιέσεις ατμών. Η παράμετρος  $\Delta T_{m,D}/G_m$  είναι ένα χαρακτηριστικό μέγεθος και ενσωματώνει τις συνθήκες αρχικής και τελικής ημερήσιας θερμοκρασίας του νερού αποθήκευσης, τη μέση ημερήσια θερμοκρασία περιβάλλοντος και τη μέση ημερήσια πυκνότητα ηλιακής ισχύος. Στην εικόνα 9 περιλαμβάνονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα της μεταβολής του συντελεστή νυκτερινών θερμικών απωλειών της συσκευής ICSWH συναρτήσει των συνθηκών λειτουργίας της ( $\Delta T_{m,N}$ ). Η παράμετρος ( $\Delta T_{m,N}$ ) είναι αντίστοιχα ένα χαρακτηριστικό μέγεθος και ενσωματώνει τις συνθήκες για την αρχική νυκτερινή θερμοκρασία του νερού αποθήκευσης και τη μέση θερμοκρασία περιβάλλοντός στη διάρκεια την νυκτερινής λειτουργίας. Τα αποτελέσματα αναφορικά με την ημερήσια λειτουργία δείχνουν με

σαφήνεια ότι όταν η αρχική πίεση ατμών λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της, η θερμική απόδοση του συστήματος είναι μεγαλύτερη σε όλο το εύρος λειτουργίας της συσκευής. Ωστόσο, οι διαφορές για τις ενδιάμεσες, αλλά και τη χαμηλότερη πίεση δεν είναι σημαντικές. Στον αντίποδα βρίσκονται τα αποτελέσματα για τις νυκτερινές θερμικές απώλειες, όπου δείχνουν ότι η χαμηλότερη πίεση επιδρά αποτελεσματικά στον περιορισμό τους. Λαμβάνοντας υπόψη συνολικά τα αποτελέσματα για τη θερμική απόδοση και τις θερμικές απώλειες, η αρχική πίεση των 670 ±16 mbar (22.0 ± 1°C) χαρακτηρίζεται βέλτιστη. Η ανάγκη για περαιτέρω μελέτη μιας τέτοιας διάταξης είναι επιτακτική, καθώς η βελτιστοποίηση της γεωμετρίας της καμπύλης κατοπτρικής διάταξης είναι δυνατόν να επιφέρει εντονότερη ανομοιομορφία της απορροφούμενης ηλιακής ακτινοβολίας και τελικά αποτελεσματικότερη θέρμανση του εξωτερικού δοχείου. Επιπλέον, η αναζήτηση υλικών αλλαγής φάσης σε μορφή υδατικών διαλυμάτων (αζεοτροπικά μίγματα) με στόχο την εντατικοποίηση του μηχανισμού της θερμικής διόδου (εξάτμιση-συμπύκνωση) χαρακτηρίζεται εξίσου σημαντική.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η εργασία πραγματοποιείται το σχεδιασμό, την ανάπτυξη και τη μελέτη μιας συσκευής ICSWH (Integrated Collector Storage Water Heater). Η καινοτομία της συσκευής εντοπίζεται στη συνδυασμένη χρήση καμπύλων κατοπτρικών διατάξεων σύνθετης γεωμετρίας, υλικών αλλαγής φάσης αλλά και χρήσης μερικού κενού. Τα αποτελέσματα της οπτικής ανάλυσης έδειξαν ότι η γεωμετρία της διάταξης παίζει σημαντικό ρόλο στην κατανομή της ακτινοβολίας στην απορροφητική επιφάνεια και αυτή με τη σειρά της στο μηχανισμό θέρμανσης του υλικού αλλαγής φάσης. Από τις εκτεταμένες πειραματικές δοκιμές σε συνθήκες λειτουργίας εξωτερικού περιβάλλοντος διαπιστώθηκε ότι η αρχική πίεση των ατμών είναι η σημαντικότερη των παραμέτρων που λαμβάνουν χώρα κατά τη λειτουργία της συσκευής. Τόσο η βελτιστοποίηση της γεωμετρικής διάταξης της συσκευής όσο και η χρήση προηγμένων υλικών αλλαγής φάσης θα επιφέρουν σημαντική βελτίωση της θερμικής της συμπεριφοράς. Το αντικείμενο που πραγματεύεται η παρούσα εργασία πρόσφατα εντάχθηκε σε χρηματοδοτούμενο ερευνητικό πρόγραμμα.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ο Δρ. Σουλιώτης ευχαριστεί τη Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ) για την οικονομική στήριξη στα πλαίσια της Επώνυμης Έδρας ΔΕΗ με γνωστικό αντικείμενο: «Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και Διαχείριση Ενεργειακών Πόρων».

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Singh R, Lazarus I. J, Souliotis M. "Recent developments in integrated collector storage (ICS) solar water heaters: A review". *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 2016; 54: 270–298.
- [2] Souliotis M, Singh R, Papaefthimiou S, Lazarus IJ, Andriosopoulos K. "Integrated Collector Storage Solar Water Heaters: Survey and Recent developments". *Energy Systems* 2016; 7: 49–72.
- [3] Smyth M, Mc Garrigle P, Eames PC, Norton B. "Experimental Comparison of Alternative Convection Suppression Arrangements for Concentrating Integral Collector Storage Solar Water Heaters". *Solar Energy* 2005; 78: 223-233.
- [4] Henderson D, Junaidi H, Muneer T, Grassie T, Currie J. "Experimental and CFD investigation of an ICSSWH at various inclinations". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2007; 11: 1087-1116.
- [5] Tripanagnostopoulos Y, Souliotis M. "ICS solar systems with two water tanks". *Renewable Energy* 2006; 31: 1698-1717.
- [6] Tripanagnostopoulos Y, Souliotis M, Nousia Th. "CPC Type Integrated Collector Storage Systems". *Solar Energy* 2002; 72: 327-350.
- [7] Souliotis M, Tripanagnostopoulos Y. "Experimental Study of CPC type ICS solar systems". *Solar Energy* 2004; 76: 389-408.
- [8] Tripanagnostopoulos Y, Souliotis M. "Integrated Collector Storage Solar Systems with Asymmetric CPC Reflectors". *Renewable Energy* 2004; 29: 223-248.

- [9] Souliotis M, Tripanagnostopoulos Y. "Study of the distribution of the absorbed solar radiation on the performance of a CPC type ICS water heater". *Renewable Energy* 2008; 33: 846-858.
- [10] Tripanagnostopoulos Y, Souliotis M. "ICS solar systems with horizontal cylindrical storage tank and reflector of CPC or involute geometry". *Renewable Energy* 2004; 29: 13–38.
- [11] Tripanagnostopoulos Y, Souliotis M. "ICS solar systems with horizontal (E–W) and vertical (N–S) cylindrical water storage tank". *Renewable Energy* 2004; 29: 73–96.
- [12] Helal O, Chaouachi S, Gabsi S. "Design and thermal performance of an ICS solar water heater based on three parabolic sections". *Renewable Energy* 2011; 85: 2421-2432.
- [13] Hailot D, Py X, Goetz V, Benabdelkarim M. "Storage composites for the optimisation of solar water heating systems". *Chemical Engineering Research and Design* 2008; 86: 612-617.
- [14] Eams P. C, Griffiths P. W. "Thermal behaviour of integrated solar collector/storage unit with 65°C phase change material". *Energy Conversion and Management* 2006; 47: 3611-3618.
- [15] Griffiths P. W, Huang M. J, Smyth M. "Improving the heat retention of integrated collector/storage solar water heaters using Phase Change Materials Slurries". *International Journal of Ambient Energy* 2007; 28: 89-98.
- [16] Al-Hinti I, Al-Ghandoor A, Maaly A, Abu Naqera I, Al-Khateeb Z, Al-Sheikh O. "Experimental investigation on the use of water-phase change material storage in conventional solar water heating systems". *Energy Conversion and Management* 2010; 51: 1735-1740.
- [17] Chaabane M, Mhiri H, Bournot P. "Thermal performance of an integrated collector storage solar water heater (ICSSWH) with phase change materials (PCM)". *Energy Conversion and Management* 2014; 78: 897–903.
- [18] De Beijer H. A. "Product development in solar water heating". *Renewable Energy* 15, 1998, pp. 201-204.
- [19] Pugsley A, Smyth M, Mondol J, Zacharopoulos A, Mattia L. "Experimental characterisation of a flat panel integrated collector-storage solar water heater featuring a photovoltaic absorber and a planar liquid-vapour thermal diode". *EuroSun 2016; Spain*, 11–14 October 2016.
- [20] Rhee J, Campbell A, Mariadass A, Morhous B. "Temperature stratification from thermal diodes in solar hot water storage tank". *Solar Energy* 2010; 84: 507–511.
- [21] Smyth M, Quinlan P, Mondol J. D, Zacharopoulos A, McLamon D, Pugsley A. "The experimental evaluation and improvements of a novel thermal diode pre-heat solar water heater under simulated solar conditions". *Renewable Energy* 2018, in press.
- [22] Souliotis M, Quinlan P, Tripanagnostopoulos Y, Smyth M, Zacharopoulos A, Ramirez M, Yianoulis P. "Heat retaining integrated collector storage system with asymmetric CPC reflector". *Solar Energy* 2011; 85: 2474-2487.
- [23] Souliotis M, Papaefthimiou S, Caouris Y.G, Zacharopoulos A, Quinlan P, Smyth M. "Integrated collector storage solar water heater under partial vacuum". *Energy*, Volume 139, pp. 991-1002, (2017).
- [24] N.M. Nahar. "Year round performance and potential of a natural circulation type of solar water heater in India". *Energy and Buildings*, Volume 35, pp. 239-247.
- [25] Zacharopoulos A., Eames P.C., Norton B. "Optical analysis of a compound parabolic concentrator with four different absorber-envelope configurations, using a ray-trace technique". In *Proc. Int. Conf. WREC IV 1996; 1892–1895, Denver, USA*.
- [26] A. Rabl, "Radiation transfer through specular passages – a simple approximation". *J. Heat Mass Transfer* 20, 323–330 (1977).

## ΘΕΡΜΙΚΑ ΟΦΕΛΗ ΑΠΟ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ ΑΕΡΟΣ

Παύλος Τουμπουλίδης<sup>1\*</sup>, Αργυρώ Δημούδη<sup>1</sup>, Πάνος Κοσμόπουλος<sup>2</sup>, Σταμάτης Ζώρας<sup>1</sup>

<sup>1\*</sup> Εργαστήριο Περιβαλλοντικού και Ενεργειακού Σχεδιασμού Κτιρίων και Οικισμών, Δ.Π.Θ.

<sup>2</sup> K-eco Projects co, τ. Διευθυντής Εργαστηρίου Περιβαλλοντικού και Ενεργειακού Σχεδιασμού Κτιρίων και Οικισμών, Δ.Π.Θ.  
e-mail: ptoumprou@env.duth.gr

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τις τελευταίες δεκαετίες φαίνεται να υπάρχει ένας σαφής στόχος που αφορά την μείωση των ενεργειακών αναγκών στον κτιριακό τομέα. Ο παραπάνω στόχος μπορεί να επιτευχθεί τόσο μέσω της μετατροπής του υπάρχοντος κτιριακού αποθέματος σε κτίρια μηδενικής ή σχεδόν μηδενικής ενέργειας όσο και μέσω της κατασκευής νέων κτιρίων που θα πληρούν τα χαρακτηριστικά κτιρίων μηδενικής ή σχεδόν μηδενικής ενέργειας. Για την μετατροπή ή κατασκευή ενός κτιρίου σε κτίριο μηδενικής ή σχεδόν μηδενικής ενέργειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικά παθητικά, ενεργητικά και υβριδικά συστήματα και διατάξεις. Ένα αντίστοιχο σύστημα είναι το σύστημα Ηλιακού Συλλέκτη Αέρος. Το παραπάνω σύστημα εγκαταστάθηκε στον Πρότυπο Πειραματικό Οικίσκο ZED-KIM (Zero Energy Demand – Kimmeria), του Εργαστηρίου Περιβαλλοντικού και Ενεργειακού Σχεδιασμού Κτιρίων και Οικισμών, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, ο οποίος βρίσκεται στην Πανεπιστημιούπολη των Κιμμεριών της Πολυτεχνικής Σχολής του Δημοκριτείου Πανεπιστημίου Θράκης. Στην παρούσα εργασία γίνεται παρουσίαση του συστήματος του Ηλιακού Συλλέκτη Αέρος καθώς και διερεύνηση της θερμικής του απόδοσης και της δυνατότητας συμβολής στην κάλυψη των θερμικών φορτίων κτιρίου. Στο παραπάνω σύστημα έχουν προσαρμοστεί όργανα παρακολούθησης και καταγραφής της θερμικής του λειτουργίας με σκοπό την εξαγωγή και ανάλυση των πειραματικών δεδομένων του. Στην παρούσα εργασία θα παρουσιαστούν και θα αναλυθούν τα αποτελέσματα από την επεξεργασία δεδομένων μετρήσεων για το διάστημα Οκτώβριος 2016- Απρίλιος 2017. Βάσει των παραπάνω αποτελεσμάτων εξαγεται το συμπέρασμα ότι ακόμα και με χαρακτηριστικά ακραίες καιρικές συνθήκες που επικρατούν στη Βόρεια Ελλάδα κατά το διάστημα των μετρήσεων, η χρήση ενός συστήματος Ηλιακού Συλλέκτη Αέρος μπορεί να συμβάλει επικουρικά στην κάλυψη του θερμικού φορτίου ενός κτιρίου και σε συνδυασμό με άλλα παθητικά και ενεργητικά συστήματα και διατάξεις μπορεί να οδηγήσει σε κτίρια τουλάχιστον σχεδόν μηδενικής ενέργειας.

**Λέξεις Κλειδιά:** Υβριδικά συστήματα, Ηλιακός συλλέκτης αέρος, Θερμική απόδοση

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν προκύψει αυξανόμενες ανησυχίες για τις περιβαλλοντικές επιδράσεις των εκπομπών αερίων στην ατμόσφαιρα, που προέρχονται από την χρήση των ορυκτών καυσίμων, τα οποία αποτελούν το κύριο μέσο για κάθε μορφή θέρμανσης και ψύξης.

Το γεγονός ότι τα ορυκτά καύσιμα υποβαθμίζουν πλέον «απειλητικά», το φυσικό περιβάλλον με τα παράγωγά τους, σε συνδυασμό με το ότι είναι πεπερασμένα, οδήγησε πολλές κυβερνητικές υπηρεσίες και διεθνείς οργανισμούς να εκπονήσουν μελέτες προς αναζήτηση και εκμετάλλευση άλλων ενεργειακών πηγών, με φόντο την πολυφερνή πλέον βιώσιμη ανάπτυξη.

Η γενική τάση προς τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Α.Π.Ε.), οι οποίες είναι «καθαρές», ανεξάντλητες και δεν χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα, αποτελεί μια ευνοϊκή ενεργειακή επιλογή η οποία τα τελευταία χρόνια αρχίζει να στηρίζεται από όλες τις χώρες. Η κύρια πρόκληση της χρήσης Α.Π.Ε. είναι να εξελιχθούν σε ανταγωνιστικές μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας, με υψηλά επίπεδα χρήσης και αξιοπιστίας, κάτι το οποίο φαίνεται εφικτό μέσα από την εξέλιξη της έρευνας και κατ' επέκταση της τεχνολογίας τους.

Σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης τα κράτη μέλη εγκρίνουν εθνικά σχέδια δράσης, προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος του 20-20-20 έως το 2020, έτσι ώστε να επιτευχθεί 20% μεγαλύτερη χρήση των Α.Π.Ε., 20% αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας και 20% μείωση των αερίων θερμοκηπίου σε σύγκριση με το 1990.

Επίσης, ο τομέας που εμφανίζει τη μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας στην Ελλάδα αλλά και στην Ευρωπαϊκή Ένωση, είναι ο κτιριακός. Οι συνολικές απαιτήσεις των κτιρίων σε ενέργεια ανέρχονται στο 40% [1] της συνολικής ενεργειακής ζήτησης. Επιπλέον 60% της ενέργειας που καταναλώνουν τα κτίρια προορίζεται για τις ανάγκες θέρμανσης τους [2].

Από τα παραπάνω καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι αν θέλουμε να βαδίσουμε στο δρόμο της βιώσιμης ανάπτυξης, ζωτικής σημασίας είναι η μελέτη τρόπων με τους οποίους οι ενεργειακές απαιτήσεις των κτιρίων εφ' ενός θα μειωθούν σημαντικά και αφετέρου για την κάλυψη τους θα χρησιμοποιηθούν διαφορετικά παθητικά και ενεργητικά συστήματα και διατάξεις που στηρίζονται στις Α.Π.Ε.

Έτσι ο κτιριακός τομέας θα αποτελείται από κτίρια μηδενικής ή σχεδόν μηδενικής ενέργειας, πράγμα το οποίο θα έχει πολλαπλά κοινωνικά, οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη.

## 2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Στην παρούσα ενότητα γίνεται αρχικά γίνεται περιγραφή του πειραματικού οικίσκου στον οποίο είναι εγκατεστημένο το σύστημα ηλιακού συλλέκτη αέρος το οποίο μελετήθηκε. Στην συνέχεια γίνεται περιγραφή των τεχνικών χαρακτηριστικών του συστήματος καθώς και του τρόπου λειτουργίας του. Έπειτα παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη καθώς και το διάστημα μετρήσεων. Τέλος, αναλύεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την διεξαγωγή των μετρήσεων καθώς και το θεωρητικό υπόβαθρο πάνω στο οποίο βασίζονται τα αποτελέσματα της εργασίας.

### 2.1. Περιγραφή ZED-KIM (Zero Energy Demand–Kimmeria)

Ο οικίσκος ZED-KIM, αναπτύχθηκε και λειτουργεί από το Εργαστήριο Περιβαλλοντικού και Ενεργειακού Σχεδιασμού Κτιρίων και Οικισμών του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος. Ο οικίσκος βρίσκεται στην Πανεπιστημιούπολη των Κιμμερίων της Πολυτεχνικής Σχολής του Δημοκριτείου Πανεπιστημίου Θράκης, 4 χιλιόμετρα ανατολικά της πόλης της Ξάνθης. Αποτελεί μια προσομοίωση ενός μέσου νοικοκυριού σε κλίμακα 1:5 καθώς έχει ορθογώνια κάτοψη συνολικού εμβαδού 20 m<sup>2</sup> και ύψος 2,6m. Επιπλέον έχει κατασκευαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να συμμορφώνεται με τις αρχές του Περιβαλλοντικού Σχεδιασμού [3], πιο συγκεκριμένα έχει νότιο προσανατολισμό με αξιμούθιο απόκλισης από το νότο  $\gamma = 0^\circ$ . Διαθέτει δύο παράθυρα, ένα στη νότια και ένα στην ανατολική του όψη, τα οποία και επιτρέπουν στην ηλιακή ακτινοβολία να εισέρχεται προς αύξηση του ενεργειακού κέρδους, σε αντίθεση με την βόρεια και δυτική του όψη, στις οποίες η τυχόν ύπαρξη παραθύρου θα δημιουργούσε ενεργειακές απώλειες. Επίσης αξίζει να σημειωθεί ότι το πιλοτικό αυτό σπίτι είναι πολύ καλά μονωμένο και η οροφή του παρέχει επιπρόσθετη θερμική και ηχητική μόνωση. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των δομικών στοιχείων του οικίσκου παρουσιάζονται στον πίνακα 1.

Πίνακας 1 Τεχνικά χαρακτηριστικά οικίσκου ZED-KIM

Δομικό Στοιχείο	Χαρακτηριστικά
Φέρων Οργανισμός	Μεταλλικοί Κοιλοδοκοί
Τοιχοποιία	Θερμομονωτικά Πανέλα πολυουρεθάνης 40mm
Δάπεδο	Γαλβάνιζε Τραπεζοειδής λαμαρίνες-Διογκωμένη Πολυστερίνη 50mm – Ξυλόπλακα OSB 10mm
Ψευδοροφή	Θερμομονωτικά Πανέλα πολυουρεθάνης 30mm
Στέγη	Τραπεζοειδής λαμαρίνες Γαλβαλουμίνιου με επίστρωση υαλοβάμβακα 30 mm
Ανοίγματα	1 Πόρτα Αλουμινίου/ 2 Παράθυρα με διπλά υαλοστάσια (4mm/6mm/4mm)

Η οροφή η οποία έχει κλίση  $42^\circ$  και θεωρείται η καταλληλότερη γωνία κλίσης ως προς το οριζόντιο επίπεδο  $\beta$  για την πόλη της Ξάνθης, προς εκμετάλλευση των μέγιστων επιπέδων έντασης ηλιακής ακτινοβολίας, κατά τη διάρκεια του ηλιακού έτους [4,5]. Έτσι φωτοβολταϊκά πάνελ συνολικής ισχύος 1.020 W είναι εγκατεστημένα σε αυτή. Εκτός από την προαναφερόμενη φωτοβολταϊκή συστοιχία, δίπλα στον οικίσκο έχει εγκατασταθεί ακόμη μια συστοιχία φωτοβολταϊκών πάνελ σε ηλιοτρόπιο δύο αξόνων (tracker) συνολικής ισχύος 1.100 W. Στην δυτική πλευρά του κτηρίου είναι εγκατεστημένη ανεμογεννήτρια ισχύος 900 W, η οποία σε συνδυασμό με τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες βοηθάει ουσιαστικά στην ενεργειακή παραγωγή κατά τη διάρκεια εποχικών διακυμάνσεων [6]. Με όλα τα παραπάνω ενεργητικά συστήματα η συνολική ισχύς των εγκατεστημένων Α.Π.Ε ξεπερνάει τα 3 kW. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι στον ZED-KIM υπάρχει εγκατεστημένο πλήρες σύστημα παρακολούθησης και καταγραφής μετεωρολογικών δεδομένων το οποίο αποτελείται από ανεμόμετρο, ανεμοδείκτη, βροχόμετρο, αισθητήρα μέτρησης θερμοκρασίας, υγρασίας, βαρομετρικής πίεσης, δύο πυρανόμετρα μέτρησης έντασης ολικής ηλιακής ακτινοβολίας και ένα πυρανόμετρο το οποίο συνοδεύεται από στεφάνη σκίασης προς μέτρηση της έντασης της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας. Η γενική του άποψη του παρουσιάζεται στην εικόνα 1.



Εικόνα 1 Γενική άποψη οικίσκου ZED-KIM

Τέλος στην νότια όψη του οικίσκου, είναι εγκατεστημένο το σύστημα ηλιακού συλλέκτη αέρος το οποίο φαίνεται στην εικόνα 2 και αποτελεί και το αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας.



Εικόνα 2 Ηλιακός Συλλέκτης Αέρος

## 2.2. Περιγραφή Ηλιακού Συλλέκτη Αέρος

### 2.2.1. Τεχνικά Χαρακτηριστικά ηλιακού συλλέκτη αέρος

Ο ηλιακός συλλέκτης αέρος που χρησιμοποιήθηκε είναι υβριδικός ηλιακός συλλέκτης μονής ροής. Το εμβαδόν της συνολικής επιφάνειας του είναι  $1,08\text{m}^2$  εκ των οποίων  $0,97\text{m}^2$  αποτελούν την

απορροφητική επιφάνεια. Η απορροφητική επιφάνεια του συλλέκτη είναι κατασκευασμένη από αλουμίνιο πάχους 0,4mm και έχει επιστρωση οξειδίων του τιτανίου( $TiO_2$ ) μπλε χρώματος η οποία συμβάλει ουσιαστικά στην βελτίωση της απόδοσης του συλλέκτη. Το κάλυμμα του συλλέκτη είναι από χυτό ακρυλικό φύλλο πάχους 3mm με συντελεστή διαπερατότητας 92%. Το πλαίσιο είναι κατασκευασμένο από αλουμίνιο, με αποτέλεσμα η κατασκευή να έχει βάρος 20kg, ενώ ιδιαίτερη προσοχή έχει δοθεί τόσο στην στεγανοποίηση των επιμέρους υλικών όσο και στην μόνωση του συστήματος με χρήση 20mm πετροβάμβακα στην πίσω πλευρά του και 20mm υαλοβάμβακα στα πλευρικά τμήματα. Τέλος στο κάτω μέρος του συστήματος υπάρχει ένα μικρό φωτοβολταϊκό πάνελ ,ισχύος 10W, στο οποίο είναι εγκατεστημένος ένας μικρός ανεμιστήρα χαμηλής κατανάλωσης.

Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι για πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του συλλέκτη  $1000W/m^2$  η μέγιστη υπολογισμένη ισχύς είναι 700W με μέγιστη ροή αέρα  $100m^3/h$  και μέγιστη θερμοκρασία απορροφητικής επιφάνειας:  $155^\circ C$  [7].

### 2.2.2. Τρόπος λειτουργίας του συστήματος ηλιακού συλλέκτη αέρος

Το σύστημα ηλιακού συλλέκτη αέρος οδηγείται μέσω ρυθμιζόμενων αεραγωγών, διαμέτρου 10cm, στο εσωτερικό του οικίσκου όπως φαίνεται στην εικόνα 3.

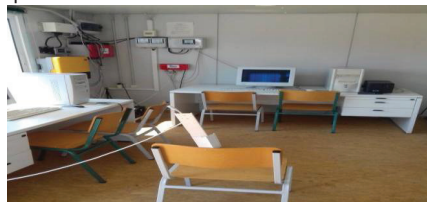


Εικόνα 3 Σύνδεση Ηλιακού Συλλέκτη-Οικίσκου

Την χειμερινή περίοδο με τους αεραγωγούς ανοικτούς το σύστημα απάγει τον πιο ψυχρό αέρα που υπάρχει μέσα στον οικίσκο και αφού θερμανθεί από την απορροφητική επιφάνεια του συλλέκτη τότε επανεισάγεται μέσα στο χώρο σε υψηλότερη θερμοκρασία. Έτσι επιτυγχάνεται τόσο η θέρμανση του χώρου όσο και η αφύγρανση του. Αντίθετα το καλοκαίρι οι αεραγωγοί κλείνουν και δεν επιτρέπουν την λειτουργία του συλλέκτη. Σε μεταβατικές περιόδους όπως για παράδειγμα την άνοιξη εφόσον καθίσταται αναγκαία η ύπαρξη φρέσκου αέρα ταυτόχρονα με τη θέρμανση, η θυρίδα εισαγωγής μπορεί να ρυθμιστεί σε όποιο ποσοστό κριθεί αναγκαίο από 0 έως 100%. Σημαντικό είναι να τονιστεί το γεγονός ότι στην θυρίδα εισαγωγής υπάρχει φίλτρο το οποίο καθαρίζει τον αέρα από σκόνη και αιωρούμενα σωματίδια. Επίσης οι αεραγωγοί είναι μονωμένοι με υαλοβάμβακα 5cm για να περιοριστούν οι θερμικές απώλειες κατά την μεταφορά από το συλλέκτη στο εσωτερικό του οικίσκου. Τέλος όπως φάνηκε στην εικόνα 3 στο κάτω μέρος του συστήματος υπάρχει ένα μικρό φωτοβολταϊκό πάνελ ,ισχύος 10W, στο οποίο είναι εγκατεστημένο ένας μικρός ανεμιστήρα χαμηλής κατανάλωσης. Έτσι όταν έχει ηλιοφάνεια, συμβάλει στην ταχύτερη εναλλαγή του αέρα με αποτέλεσμα την αποδοτικότερη λειτουργία του συστήματος. Στο υπό μελέτη σύστημα και συγκεκριμένα στο κέντρο των δύο αεραγωγών έχουν τοποθετηθεί αισθητήρες μέτρησης θερμοκρασίας, υγρασίας και ταχύτητας αέρα ενώ στο κέντρο του οικίσκου, σε ύψος καθήμενου ατόμου, έχει τοποθετηθεί αισθητήρας μέτρησης θερμοκρασίας και υγρασίας. Οι αισθητήρες συνδέονται με ένα καταγραφικό σύστημα, το οποίο καταγράφει τα δεδομένα και από τον μετεωρολογικό σταθμό. Τέλος το καταγραφικό σύστημα συνδέεται με ηλεκτρονικό υπολογιστή για την παρακολούθηση και αποθήκευση των μετρήσεων. Όλη η πειραματική διάταξη αποτυπώνεται στις εικόνες 4α και 4β.



Εικόνα 4α Αισθητήρες μέτρησης στον Ηλιακό Συλλέκτη



Εικόνα 4β Αισθητήρας μέτρησης στο κέντρο του οικίσκου

### 2.3. Περίοδος μετρήσεων πειραματικής διάταξης

Η περίοδος μέτρησης του συστήματος ορίζεται από τις 15 Οκτωβρίου του 2016 μέχρι τις 30 Απριλίου του 2017. Η επιλογή του συγκεκριμένου διαστήματος μετρήσεων έγινε με βάση τον κανονισμό ενεργειακής απόδοσης κτιρίων Κ.Εν.Α.Κ. ο οποίος ορίζει το παραπάνω διάστημα ως την περίοδο θέρμανσης για την κλιματική ζώνη Γ που ανήκει η Ξάνθη.

### 2.4. Ενεργειακή απόδοση ηλιακού συλλέκτη αέρα

Η ωφέλιμη θερμική ισχύς που αποδίδει ένας ηλιακός συλλέκτης αέρα σύμφωνα μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση 1[8].

$$Q_u = m C_p (T_o - T_i) \quad (1)$$

Όπου  $Q_u$  η ωφέλιμη θερμική ισχύς του συλλέκτη σε kW,  $m$  η παροχή αέρα σε kg/s,  $C_p$  η ειδική θερμοχωρητικότητα σε kJ/Kg\*K ενώ  $T_o$  και  $T_i$  η θερμοκρασία σε K στην έξοδο και στην είσοδο του συστήματος αντίστοιχα.

Στο σημείο αυτό γίνονται οι εξής βασικές παραδοχές, ότι ο συλλέκτης λειτουργεί σε μόνιμη κατάσταση, η ροή αέρα είναι μονοδιάστατη και υπάρχει διατήρηση της μάζας. Επίσης όσον αφορά τις απώλειες του συλλέκτη προς το περιβάλλον μπορούμε να πούμε ότι εμπεριέχονται στην εξίσωση καθώς οι θερμοκρασίες που μετρώνται είναι πειραματικές. Με βάση τα παραπάνω και γνωρίζοντας τις θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου του αέρα από τον συλλέκτη μπορεί να υπολογιστεί η ωφέλιμη θερμική ισχύς λαμβάνοντας συντελεστή ειδικής θερμοχωρητικότητας ίσο με 1,005 kJ/Kg\*K και υπολογίζοντας την παροχή αέρα από την σχέση 2.

$$m = \rho V D \quad (2)$$

Όπου  $m$  η παροχή αέρα σε kg/s,  $\rho$  η πυκνότητα του αέρα σε Kg/m<sup>3</sup>,  $V$  η μέση ταχύτητα του ρευστού κάθετα στην διατομή της εισόδου σε m/s και  $D$  το εμβαδό της διατομής της εισόδου του συλλέκτη σε m<sup>2</sup>.

Μία σημαντική παρατήρηση που πρέπει να γίνει είναι ότι επειδή η πυκνότητα του αέρα μεταβάλλεται συνεχώς με την θερμοκρασία στους υπολογισμούς ισχύος που έγιναν για κάθε ώρα λειτουργίας του συλλέκτη λαμβάνονταν η αντίστοιχη τιμή έτσι ώστε να είναι όσο το δυνατόν ακριβέστεροι. Εφόσον υπολογιστεί η ισχύς του συστήματος εύκολα υπολογίζεται και η παραγωγή θερμικής ενέργειας που προσφέρει στο χώρο. Αυτό γίνεται αν πολλαπλασιαστεί η τιμή της ισχύος με την χρονική διάρκεια στην οποία επικρατεί.

Τέλος για τον υπολογισμό της απόδοσης του συστήματος ηλιακού συλλέκτη αέρα προτείνεται η σχέση 3.

$$n = \frac{E}{H_r A_c} \quad (3)$$

Όπου  $n$  η απόδοση του συλλέκτη,  $E$  η ημερήσια παραγόμενη ενέργεια του ηλιακού συλλέκτη αέρα σε kWh,  $H_r$  η ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε κεκλιμένο επίπεδο (kWh/m<sup>2</sup>) και συγκεκριμένα στην επιφάνεια του συλλέκτη και  $A_c$  η ενεργή επιφάνεια του ή αλλιώς η απορροφητική του επιφάνεια σε m<sup>2</sup>.

## 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η παρουσίαση, ανάλυση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων γίνεται αρχικά για μία ενδεικτική ημέρα της περιόδου μελέτης. Ακολουθεί η παρουσίαση, ανάλυση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων σε μηνιαία βάση ενώ τέλος γίνεται παρουσίαση ανάλυση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων για όλο το διάστημα για των μετρήσεων δηλαδή από τις 15 Οκτωβρίου του 2016 μέχρι και τις 30 Απριλίου 2017. Τα αποτελέσματα αφορούν τόσο την παρουσίαση των μετρήσεων όσο και των μεγεθών που προκύπτουν

από αυτές. Πιο αναλυτικά θα αναφερθούμε στις διαφορές τόσο στην τιμή όσο και στην διακύμανση μεταξύ εξωτερικής θερμοκρασίας και υγρασίας σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές στο κέντρο του οικίσκου. Στην διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της εισόδου και της εξόδου του ηλιακού συλλέκτη και στον ρυθμό που το σύστημα παρέχει θερμό αέρα στο χώρο κατά τις ώρες λειτουργίας του. Ενώ τέλος στην υπολογιζόμενη, με τους τύπους που περιγράφηκαν στην μεθοδολογία, απόδοση του συστήματος ηλιακού συλλέκτη αέρα, στην ισχύ του και την ενέργεια που παράγει κατά το αντίστοιχο διάστημα.

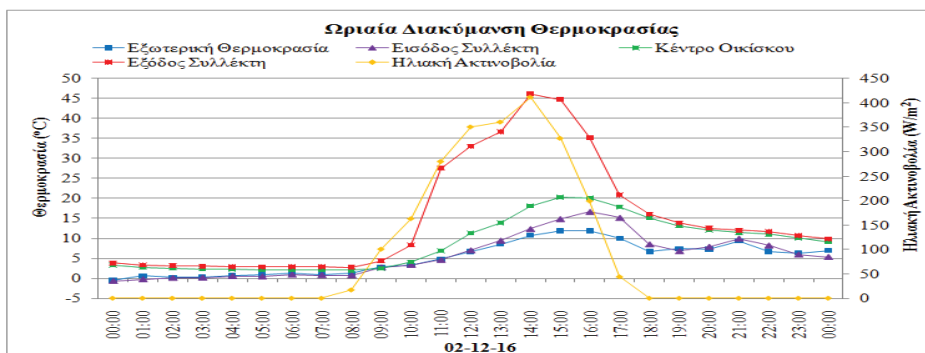
### 3.1. Αποτελέσματα ενδεικτικής ημέρας

Μια ενδεικτική ημέρα λειτουργίας του ηλιακού συλλέκτη αέρα για την περίοδο μελέτης μπορεί να χαρακτηριστεί η 2<sup>η</sup> Δεκεμβρίου καθώς ο συνδυασμός των τιμών της θερμοκρασίας, της υγρασίας καθώς και της ηλιακής ακτινοβολίας πλησιάζει τον μέσο όρο των τιμών του μήνα αλλά και της συνολικής περιόδου μέτρησης εν γένει. Η μέση ωριαία μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας και της υγρασίας για την συγκεκριμένη ημέρα παρουσιάζεται στον πίνακα 2.

Πίνακας 2 Ωριαίες Τιμές Θερμοκρασία-Υγρασία-Ηλιακής Ακτινοβολίας στις 2-12-16

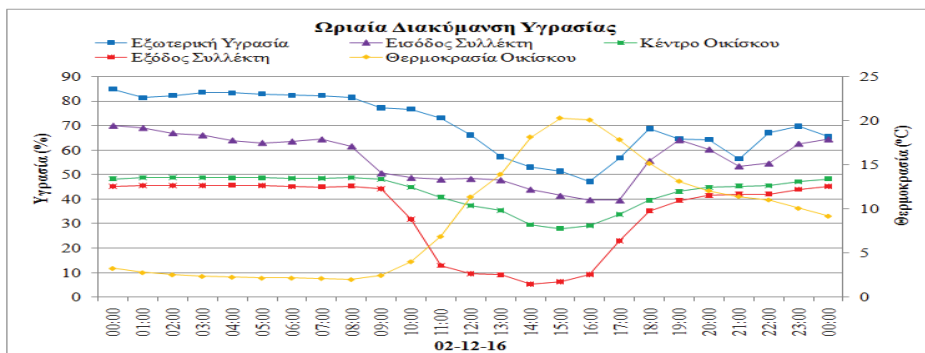
Ωρα	Ηλιακή Ακτινοβολία (W/m <sup>2</sup> )	Εξωτερική Θερμοκρασία (°C)/ Υγρασία (%)		Θερμοκρασία Εισόδου (°C)/ Υγρασία (%)		Θερμοκρασία Οικίσκου (°C)/ Υγρασία (%)		Θερμοκρασία Εξόδου (°C)/ Υγρασία (%)	
00:00	0	-0,5	85	-0,7	70	3,3	48	3,8	45
01:00	0	0,6	81	-0,2	69	2,8	49	3,4	46
02:00	0	0,2	82	0,1	67	2,6	49	3,2	46
03:00	0	0,3	84	0,2	66	2,4	49	3,0	46
04:00	0	0,7	83	0,6	64	2,3	49	2,9	46
05:00	0	0,9	83	0,5	63	2,2	49	2,8	46
06:00	0	1,3	82	0,9	64	2,2	49	2,9	45
07:00	0	1,0	82	0,8	64	2,2	48	2,9	45
08:00	18	1,2	82	0,8	62	2,0	49	2,8	45
09:00	101	2,8	77	2,8	51	2,5	48	4,4	44
10:00	163	3,2	77	3,4	49	4,0	45	8,4	32
11:00	280	4,8	73	4,6	48	6,9	41	27,6	13
12:00	351	6,7	66	7,0	48	11,4	37	33,0	10
13:00	361	8,5	57	9,5	48	13,9	35	36,7	9
14:00	412	10,8	53	12,4	44	18,1	30	46,2	5
15:00	328	11,9	51	14,9	41	20,3	28	44,8	6
16:00	199	11,9	47	16,7	40	20,1	29	35,2	9
17:00	44	10,0	57	15,2	40	17,8	34	20,9	23
18:00	0	6,7	69	8,6	56	15,1	40	16,1	35
19:00	0	7,4	65	6,8	64	13,1	43	13,9	39
20:00	0	7,3	64	7,9	60	12,1	45	12,6	41
21:00	0	9,4	56	10,0	53	11,4	45	12,0	42
22:00	0	6,7	67	8,3	55	11,0	45	11,7	42
23:00	0	6,4	70	6,0	63	10,1	47	10,7	44
00:00	0	7,0	65	5,4	64	9,2	48	9,8	45

Η απεικόνιση των μετρήσεων της μέσης ωριαίας μεταβολής της θερμοκρασίας συναρτήσει της ηλιακής ακτινοβολίας του πίνακα 2 γίνεται στο γράφημα 1



Γράφημα 1 Μέση ωριαία μεταβολή της θερμοκρασίας και της ηλιακής ακτινοβολίας

Τόσο από τον πίνακα 2 όσο και από το γράφημα 1 παρατηρείται ότι η ελάχιστη θερμοκρασία κέντρο του οικίσκου σημειώνεται στις οχτώ το πρωί και η τιμή της είναι  $2,0^{\circ}\text{C}$  αντίθετα με την ελάχιστη τιμή περιβάλλοντος που σημειώνεται στις δύο το πρωί και είναι  $0,2^{\circ}\text{C}$ . Το γεγονός αυτό μας δείχνει ότι πέρα από τη θερμική αδράνεια του οικίσκου, ο ηλιακός συλλέκτης έχει σημαντική συμβολή στη διατήρηση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας. Η μέγιστη τιμή της θερμοκρασίας στην έξοδο του συλλέκτη που είναι  $46,2^{\circ}\text{C}$  και σημειώνεται στις δύο το μεσημέρι, την ίδια ώρα με την μέγιστη τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας που είναι  $412\text{W}/\text{m}^2$ . Αντίστοιχα η μέγιστη τιμή στο κέντρο του οικίσκου σημειώνεται στις τρεις το μεσημέρι και έχει τιμή  $20,3^{\circ}\text{C}$  δηλαδή έχει μία χρονική υστέρηση μίας ώρας από την ώρα που σημειώνεται η μέγιστη θερμοκρασία στην έξοδο του συλλέκτη. Η μέση ωριαία μεταβολή της υγρασίας συναρτήσε της θερμοκρασίας στο κέντρο του οικίσκου γίνεται στο γράφημα 2.



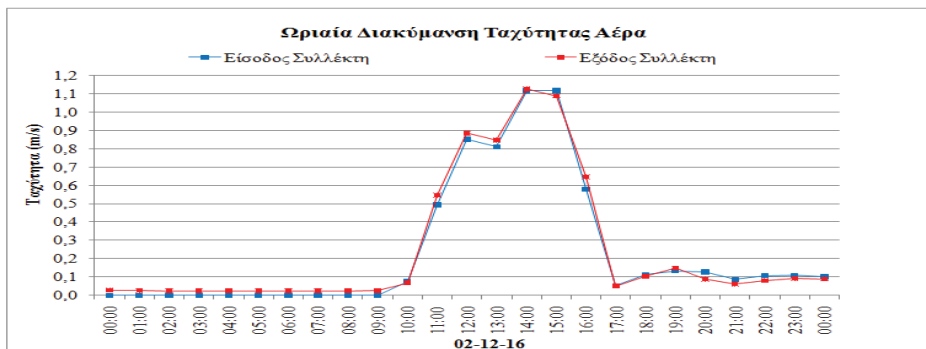
Γράφημα 2 Μέση ωριαία μεταβολή της υγρασίας και της θερμοκρασίας

Από το γράφημα 2 και τον πίνακα 2 φαίνεται ότι η διακύμανση της υγρασίας στο κέντρο του οικίσκου για την συγκεκριμένη ημέρα κυμαίνεται μεταξύ 28%-49%, με μέσο όρο 43%. Ενώ η μέση μείωση μεταξύ εξωτερικής υγρασίας με της υγρασίας στο κέντρο του οικίσκου είναι 27 εκατοστιαίες μονάδες. Συνεχίζοντας την ωριαία ανάλυση της 25<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου τόσο μέσα από τις τιμές που εμφανίζονται στον πίνακα 2 όσο και από τα γραφήματα 1 και 2 παρατηρούμε ότι η ημέρα χωρίζεται σύμφωνα με την λειτουργία του ηλιακού συλλέκτη σε 3 χρονικές περιόδους. Η πρώτη περίοδος είναι πριν την έναρξη λειτουργίας του συλλέκτη, η δεύτερη κατά την διάρκεια λειτουργίας του και η τρίτη μετά το πέρας της λειτουργίας του. Η περίοδος που έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι η δεύτερη καθώς κυρίως σε αυτή προκύπτουν τα θερμικά και κατ' επέκταση ενεργειακά οφέλη του υπό μελέτη συστήματος. Για την συγκεκριμένη περίοδο της 25<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου παρατηρούμε ότι η μέση αύξηση της θερμοκρασίας μεταξύ εισόδου και εξόδου του ηλιακού συλλέκτη είναι  $17,8^{\circ}\text{C}$ , και με μέση ένταση ηλιακής ακτινοβολίας  $224\text{W}/\text{m}^2$ . Κλείνοντας την ωριαία ανάλυση της 25<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου στον πίνακα 3 παρουσιάζονται οι τιμές της ταχύτητας στην είσοδο και στην έξοδο του συστήματος.

Πίνακας 3 Ωριαίες Ταχύτητες Αέρα στις 2-12-16

Ώρα	Ταχύτητα Εισόδου(m/s)	Ταχύτητα Εξόδου(m/s)
00:00	0,0	0,0
01:00	0,0	0,0
02:00	0,0	0,0
03:00	0,0	0,0
04:00	0,0	0,0
05:00	0,0	0,0
06:00	0,0	0,0
07:00	0,0	0,0
08:00	0,0	0,0
09:00	0,0	0,0
10:00	0,1	0,1
11:00	0,5	0,5
12:00	0,9	0,9
13:00	0,8	0,8
14:00	1,1	1,1
15:00	1,1	1,1
16:00	0,6	0,6
17:00	0,1	0,1
18:00	0,1	0,1
19:00	0,1	0,1
20:00	0,1	0,1
21:00	0,1	0,1
22:00	0,1	0,1
23:00	0,1	0,1
00:00	0,1	0,1

Η απεικόνιση της μέσης ωριαίας ταχύτητας αέρα του ηλιακού συλλέκτη στην είσοδο και στην έξοδο του γίνεται στο γράφημα 3.



Γράφημα 3 Μέση ωριαία μεταβολή της ταχύτητας

Η μέγιστη τιμή της ταχύτητα αέρα που εισέρχεται στο συλλέκτη είναι 1,1 m/s την ώρα που η διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας εισόδου και εξόδου έχει την μέγιστη τιμή της 33,7°C πράγμα το οποίο είναι αναμενόμενο καθώς την συγκεκριμένη στιγμή το φαινόμενο φυσικού ελκυσμού μεγιστοποιείται. Ταυτόχρονα λόγω της υψηλής έντασης ηλιακής ακτινοβολίας την ίδια ώρα ο μικρός ανεμιστήρας

συμβάλει στην μεγιστοποίηση της ταχύτητας. Επιπρόσθετα για την περίοδο λειτουργίας του συστήματος, σύμφωνα με τις ταχύτητες αέρα που παρουσιάστηκαν στον πίνακα 3, η μέση παροχή αέρα είναι  $15\text{m}^3/\text{h}$ . Τέλος η μέση ισχύς που αποδίδει ο συλλέκτης καθώς και η συνολική παραγωγή ενέργειας του για την συγκεκριμένη ημέρα είναι 136W και 1,4kWh αντίστοιχα.

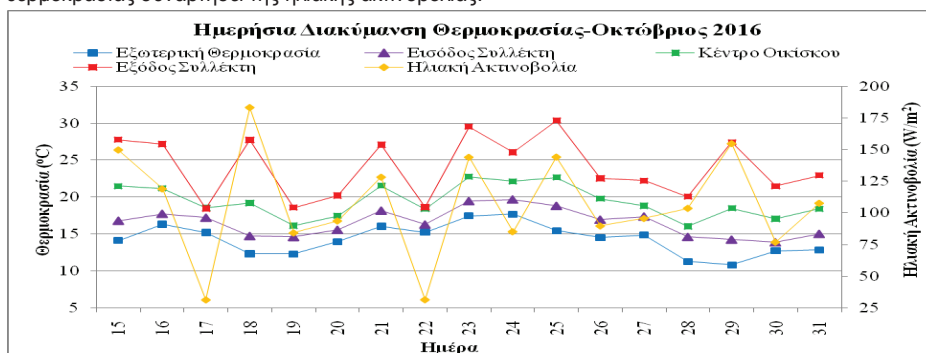
### 3.2. Μηνιαία Αποτελέσματα

Η μέση ημερήσια μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας και της υγρασίας από τις 15 μέχρις τις 31 Οκτωβρίου του 2016, παρουσιάζεται στον πίνακα 4.

Πίνακας 4 Μέσες Ημερήσιες Τιμές Θερμοκρασίας-Υγρασίας-Ηλιακής Ακτινοβολίας Οκτώβριος 2016

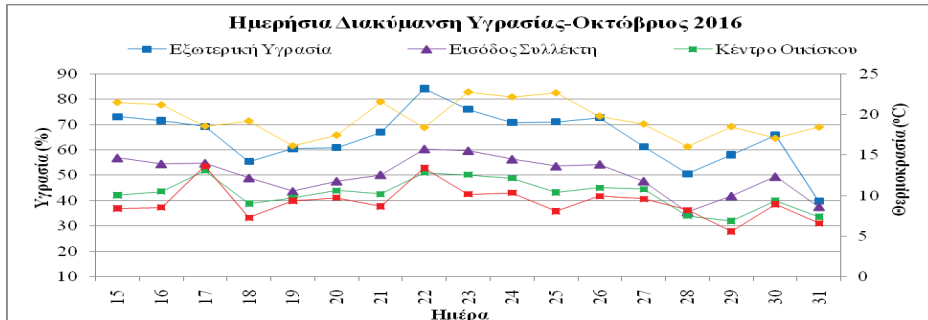
Ημέρα	Ηλιακή Ακτινοβολία ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	Εξωτερική Θερμοκρασία ( $^{\circ}\text{C}$ )/ Υγρασία (%)		Θερμοκρασία Εισόδου ( $^{\circ}\text{C}$ )/ Υγρασία (%)		Θερμοκρασία Οικίσκου ( $^{\circ}\text{C}$ )/ Υγρασία (%)		Θερμοκρασία Εξόδου ( $^{\circ}\text{C}$ )/ Υγρασία (%)	
		$^{\circ}\text{C}$	%	$^{\circ}\text{C}$	%	$^{\circ}\text{C}$	%	$^{\circ}\text{C}$	%
15/10	150	14,1	73	16,8	57	21,5	42	27,8	37
16/10	119	16,3	72	17,7	55	21,2	44	27,2	37
17/10	32	15,2	69	17,2	55	18,6	52	18,4	54
18/10	183	12,3	55	14,8	49	19,2	39	27,7	33
19/10	84	12,3	61	14,6	44	16,1	41	18,6	40
20/10	94	14,0	61	15,6	48	17,5	44	20,2	41
21/10	128	16,0	67	18,2	50	21,6	43	27,1	38
22/10	32	15,2	84	16,3	60	18,4	51	18,6	53
23/10	144	17,5	76	19,5	60	22,8	50	29,5	43
24/10	85	17,7	71	19,7	56	22,1	49	26,1	43
25/10	144	15,4	71	18,8	54	22,6	43	30,3	36
26/10	90	14,5	73	17,0	54	19,8	45	22,5	42
27/10	96	14,9	61	17,4	48	18,8	45	22,2	41
28/10	104	11,3	51	14,6	36	16,0	34	20,1	36
29/10	155	10,8	58	14,3	42	18,5	32	27,4	28
30/10	77	12,7	66	13,9	49	17,1	40	21,5	39
31/10	108	12,9	40	15,0	38	18,4	34	22,9	31

Από τον παραπάνω πίνακα εξάγεται το γράφημα 4 όπου απεικονίζεται η μέση ημερήσια μεταβολή της θερμοκρασίας συναρτήσει της ηλιακής ακτινοβολίας.



Γράφημα 4 Μέση ημερήσια μεταβολή της θερμοκρασίας και της ηλιακής ακτινοβολίας

Αντίστοιχα η μέση ημερήσια μεταβολή της υγρασίας συναρτήσει της θερμοκρασίας στο κέντρο του οικίσκου απεικονίζεται στο γράφημα 5.



Γράφημα 5 Μέση ημερήσια μεταβολή της υγρασίας και της θερμοκρασίας

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα η ελάχιστη διαφορά μεταξύ των θερμοκρασιών στο κέντρο του οικίσκου και στο εξωτερικό του σημειώνεται στις 22/10 και είναι 3,2°C με την θερμοκρασίες 18,4°C και 15,2°C αντίστοιχα. Αντίθετα στις 29/10 σημειώνεται η μέγιστη διαφορά μεταξύ των δύο θερμοκρασιών, με την θερμοκρασία στο κέντρο του οικίσκου να είναι 18,5°C ενώ στο εξωτερικό του 10,8°C και την διαφορά να αγγίζει τους 7,7°C. Τέλος η μέση διαφορά είναι 5,1°C με τη μέση ημερήσια θερμοκρασία στο κέντρο του οικίσκου να διαμορφώνεται στους 19,4°C. Από το γράφημα 4 παρατηρείται ότι οι τιμές θερμοκρασίας στο κέντρο του οικίσκου για το διάστημα 15-10-16 έως 30-10-16 κυμαίνονται μεταξύ 16,1°C με 22,8°C και είναι σημαντικά αυξημένες σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές της θερμοκρασίας στο εξωτερικό του οικίσκου που κυμαίνονται μεταξύ 10,8°C με 17,7°C. Αντίστοιχα αποτελέσματα με αυτά της θερμοκρασίας εξάγονται και για την μεταβολή της υγρασίας της οποίας η ελάχιστη διαφορά σημειώνεται στις 31/10 και είναι 6% με την υγρασία στο κέντρο του οικίσκου να είναι 34% και στο εξωτερικό του 40%. Η μέγιστη διαφορά σημειώνεται στις 22/10 και είναι της τάξεως του 33 εκατοστιαίων μονάδων με την υγρασία στα δύο σημεία μέτρησης να είναι 51% και 84% αντίστοιχα. Επιπρόσθετα η μέση διαφορά μεταξύ των τιμών υγρασίας στο κέντρο του οικίσκου σε σχέση με την τιμή στο εξωτερικό περιβάλλον είναι 22% με την μέση ημερήσια υγρασία στο κέντρο του οικίσκου να πλησιάζει το 50%. Τέλος οι τιμές υγρασίας στο κέντρο του οικίσκου κυμαίνονται σε αρκετά πιο χαμηλά επίπεδα σε σχέση με τις τιμές υγρασίας στο εξωτερικό του. Συγκεκριμένα οι τιμές στο κέντρο του κυμαίνονται μεταξύ 32% με 52% ενώ οι τιμές στο εξωτερικό του κυμαίνονται μεταξύ 40% με 84%. Επιπρόσθετα από την μελέτη κάθε ημέρας του Οκτωβρίου, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι στις ημέρες που το σύστημα ηλιακού συλλέκτη αέρος λειτουργεί σε ικανοποιητικό βαθμό η ελάχιστη θερμοκρασία στον κέντρο του οικίσκου σημειώνεται αρκετές ώρες μετά την ελάχιστη θερμοκρασία στο εξωτερικό του, πράγμα που συμβαίνει στις περισσότερες ημέρες. Επίσης η μέγιστη θερμοκρασία εξόδου από το συλλέκτη στις περισσότερες περιπτώσεις συμπίπτει χρονικά με την ώρα που σημειώνεται και η μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία, πράγμα αναμενόμενο καθώς το σύστημα βασίζεται στην προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία. Επιπλέον σε φυσιολογικές συνθήκες λειτουργίας του συστήματος η μέγιστη θερμοκρασία στο κέντρο του οικίσκου στην πλειονότητα των περιπτώσεων υστερεί χρονικά κατά μία ώρα σε σχέση με την μέγιστη θερμοκρασία στην έξοδο του συστήματος. Για τον μήνα Οκτώβριο η μέση ημερήσια παροχή αέρα είναι 13 m<sup>3</sup>/h, η μέση ημερήσια ισχύς είναι 130W και η μέση ημερήσια αποδιδόμενη ενέργεια είναι 0,9kWh. Τέλος η απόδοση του συλλέκτη, καθορίζεται από την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια του καθώς και από την ενέργεια που παράγει εφόσον αναχθεί σε 1m<sup>2</sup> της επιφάνειας του. Με βάση τα παραπάνω το ποσοστό απόδοσης του συλλέκτη, μαζί με τις τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε αυτόν καθώς και τις τιμές της παραγόμενης ενέργειας ανηγμένη σε 1 m<sup>2</sup> φαίνονται στον πίνακα 5.

Πίνακας 5 Μέση τιμή Ηλιακής Ακτινοβολίας-Παραγόμενη Ενέργεια-Ποσοστό Απόδοσης του Ηλιακού Συλλέκτη Οκτώβριος 2016

Ημέρα	Ηλιακή Ακτινοβολία (kWh/m <sup>2</sup> )	Παραγόμενη Ενέργεια(kWh/m <sup>2</sup> )	Απόδοση (%)
15/10	4,0	1,7	42
16/10	2,6	1,0	38

Πίνακας 5 Μέση τιμή Ηλιακής Ακτινοβολίας-Παραγόμενη Ενέργεια-Ποσοστό Απόδοσης του Ηλιακού Συλλέκτη Οκτώβριος 2016 (Συνέχεια)

Ημέρα	Ηλιακή Ακτινοβολία (kWh/m <sup>2</sup> )	Παραγόμενη Ενέργεια(kWh/ m <sup>2</sup> )*	Απόδοση (%)
17/10	0,5	0,0	0
18/10	6,0	2,3	38
19/10	1,5	0,4	23
20/10	1,9	0,1	3
21/10	3,4	1,5	43
22/10	0,5	0,0	0
23/10	4,5	1,5	34
24/10	1,7	0,6	35
25/10	4,7	1,9	40
26/10	1,9	0,2	12
28/10	2,2	0,2	12
27/10	2,6	0,6	24
29/10	5,8	2,5	43
30/10	1,5	0,8	55
31/10	3,0	0,9	30

\* Οι τιμές αφορούν την ανηγμένη παραγωγή ενέργειας σε 1 m<sup>2</sup> επιφάνειας συλλέκτη

Από τον παραπάνω πίνακα φαίνεται ότι η μέγιστη απόδοση με ποσοστό 55% για τον μήνα Οκτώβριο σημειώνεται στις 30/10 ενώ στις 17/10 και 22/10 η απόδοση είναι μηδενική καθώς πολύ μικρή ποσότητα ηλιακής ακτινοβολίας, μόλις 0,5kWh/m<sup>2</sup>, προσπίπτει στο συλλέκτη. Τέλος η μέση απόδοση για τον Οκτώβριο είναι 28%.

### 3.3. Αποτελέσματα περιόδου μετρήσεων

Η μηνιαία μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας και της υγρασίας για όλη την περίοδο από 15 Οκτωβρίου του 2016 μέχρι 30 Απριλίου του 2017 παρουσιάζεται στον πίνακα 6.

Πίνακας 6 Μέσες Μηνιαίες Τιμές Θερμοκρασίας-Υγρασίας-Ηλιακής Ακτινοβολίας Οκτώβριος 2016-Απρίλιος 2017

Μήνας	Ηλιακή Ακτινοβολία (W/m <sup>2</sup> )	Εξωτερική Θερμοκρασία (°C)/ Υγρασία (%)		Θερμοκρασία Εισόδου (°C)/ Υγρασία (%)		Θερμοκρασία Οικίσκου (°C)/ Υγρασία (%)		Θερμοκρασία Εξόδου (°C)/ Υγρασία (%)	
		°C	%	°C	%	°C	%	°C	%
Οκτώβριος	107	14,3	65	16,6	50	19,4	43	24,0	39
Νοέμβριος	88	12,2	76	14,3	56	16,9	47	21,8	40
Δεκέμβριος	87	4,9	58	7,1	45	10,0	36	15,4	29
Ιανουάριος	72	2,7	69	5,4	55	7,1	47	10,9	41
Φεβρουάριος	120	7,5	75	10,2	58	12,9	46	17,9	39
Μάρτιος	150	11,6	71	14,1	59	16,7	48	21,1	41
Απρίλιος	199	13,3	68	16,2	54	18,9	43	23,3	37

Από τον πίνακα 6 φαίνεται ότι η θερμοκρασία του οικίσκου σε σχέση με την εξωτερική θερμοκρασία είναι αυξημένη, για όλους τους μήνες, κατά περίπου 5°C. Η μέγιστη διαφορά σημειώνεται τον Απρίλιο και είναι 5,6°C και η ελάχιστη τον Ιανουάριο, στο οποίο επικράτησαν εξαιρετικά δυσμενής καιρικές συνθήκες, και είναι 4,4°C. Αντίστοιχα η διαφορά της υγρασίας δείχνει μία σχετικά σταθερή μείωση κατά 25 εκατοστιαίες μονάδες. Επίσης παρατηρούμε ότι τόσο η θερμοκρασία όσο και η υγρασία στο

χώρο διατηρούνται σε επίπεδα συνθηκών άνεσης για τους 4 μήνες της περιόδου μελέτης με τις τιμές θερμοκρασίας και υγρασίας να είναι 18°C και 45% αντίστοιχα. Για τους υπόλοιπους 3 μήνες οι τιμές θερμοκρασίας και υγρασίας θεωρούνται ικανοποιητικές ιδιαίτερα αν λάβουμε υπόψη το γεγονός ότι ο χώρος θερμαίνεται αποκλειστικά και μόνο από τον ηλιακό συλλέκτη αέρος. Οι μέσες μηνιαίες τιμές για την ηλιακή ακτινοβολία, την διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ εισόδου και εξόδου του και την παροχή αέρα κατά την περίοδο λειτουργίας του συστήματος παρουσιάζονται στον πίνακα 7 που ακολουθεί ενώ στην τελευταία στήλη του φαίνεται η συνολική παραγόμενη ενέργεια σε μηνιαία βάση.

*Πίνακας 7 Μέσες Μηνιαίες Τιμές κατά την περίοδο λειτουργίας του Ηλιακού Συλλέκτη – Συνολική Μηνιαία Ενεργειακή Απόδοση Οκτώβριος 2016-Απρίλιος 2017*

Μήνας	Ηλιακή Ακτινοβολία (W/m <sup>2</sup> )	Αύξηση Θερμοκρασίας Είσοδος-Εξόδου (°C)	Παροχή Αέρα (m <sup>3</sup> /h)	Μέγιστη Θερμοκρασία Εξόδου (°C)	Συνολική Ενέργεια (kWh)
Οκτώβριος	332	18,7	13	48,7	15,7
Νοέμβριος	271	16,3	15	42,3	30,4
Δεκέμβριος	260	19,0	19	41,0	41,3
Ιανουάριος	217	13,1	13	28,9	26,3
Φεβρουάριος	329	15,7	16	39,0	32,2
Μάρτιος	374	12,7	15	39,3	31,0
Απρίλιος	481	12,5	14	41,0	24,9

Από τον πίνακα 7 διαπιστώνουμε ότι η μέγιστη θερμοκρασία στην έξοδο του συλλέκτη με εξαίρεση τον Ιανουάριο, όπου έχει την χαμηλότερη τιμή των 28,9 °C, είναι περίπου 40°C ενώ τον Οκτώβριο πλησιάζει τους 50 °C. Σε αυτό το σημείο διαπιστώνουμε ότι ενώ τον Απρίλιο σημειώνεται η μέγιστη μέση τιμή ηλιακής ακτινοβολίας παρόλα αυτά η μέγιστη θερμοκρασία παραμένει κοντά στα επίπεδα που παρατηρήθηκε και στους υπόλοιπους μήνες. Αυτό συμβαίνει καθώς το ύψος του ήλιου αυξάνεται και έτσι η ακτινοβολία που προσπίπτει στο συλλέκτη είναι σε μέσο όρο σχεδόν ίση, και σε κάποιες περιπτώσεις λιγότερη, σε σχέση με αυτή των προηγούμενων μηνών. Τέλος η μέση απόδοση σε μηνιαίο επίπεδο καθώς και οι τιμές που την καθορίζουν σε μηνιαίο επίπεδο παρουσιάζονται στον πίνακα 8.

*Πίνακας 8 Μέσες τιμές Ηλιακής Ακτινοβολίας-Παραγόμενης Ενέργειας- Απόδοσης κατά την περίοδο λειτουργίας του Ηλιακού Συλλέκτη Οκτώβριος 2016-Απρίλιος 2017*

Μήνας	Ηλιακή Ακτινοβολία (kWh/m <sup>2</sup> )	Παραγόμενη Ενέργεια(kWh/ m <sup>2</sup> )*	Απόδοση (%)
Οκτώβριος	2,8	0,9	28
Νοέμβριος	3,1	1,0	28
Δεκέμβριος	4,0	1,4	31
Ιανουάριος	2,7	0,9	20
Φεβρουάριος	3,7	1,2	25
Μάρτιος	2,9	1,0	26
Απρίλιος	2,9	0,9	25

\* Οι τιμές αφορούν την ανηγμένη παραγωγή ενέργειας σε 1 m<sup>2</sup> επιφάνειας συλλέκτη

Από τον παραπάνω πίνακα φαίνεται ότι η μέγιστη απόδοση με ποσοστό 31% για την περίοδο μελέτης σημειώνεται τον Δεκέμβριο ενώ η ελάχιστη με ποσοστό 20% τον Ιανουάριο. Επίσης η μέση απόδοση για την συγκεκριμένη περίοδο είναι 26%. Τα αποτελέσματα αυτά είναι αναμενόμενα καθώς τον Δεκέμβριο τόσο η γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας όσο και οι τιμές της έντασης της ήταν σε ικανοποιητικά επίπεδα. Στον αντίποδα τον Ιανουάριο επικράτησαν ιδιαίτερα ακραίες καιρικές συνθήκες οι οποίες επηρέασαν σε μεγάλο βαθμό την απόδοση του συστήματος. Επιπλέον αξιοσημείωτη είναι και η απόδοση που παρατηρείται τον Απρίλιο καθώς ενώ η ένταση της ακτινοβολίας είναι μεγάλη λόγω της γωνίας πρόσπτωσης η απόδοση του συστήματος είναι σχετικά χαμηλή. Τέλος από τον πίνακα 7 φαίνεται ότι η παραγόμενη θερμική ενέργεια του συστήματος δεν μπορεί να εξαιρεθεί από τους κανόνες που ισχύουν και για τις προηγούμενες τιμές. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι ότι μόνο στις

15 ημέρες του Οκτωβρίου παράγονται 15,7kWh πόσο το οποίο αντιστοιχεί στο 60% της παραγωγής ενέργειας ολόκληρου του Απριλίου. Η συνολική παραγόμενη κατά το διάστημα θέρμανσης ενέργεια ανέρχεται σε 202kWh. Κάνοντας αναγωγή σε 1m<sup>2</sup> ενεργής επιφάνειας συλλέκτη διαπιστώνεται ότι παράγονται 208kWh ανά τετραγωνικό μέτρο συλλέκτη. Με την παραδοχή ότι με την αύξηση των τετραγωνικών μέτρων εγκατεστημένου συστήματος ηλιακού συλλέκτη αέρος η παραγωγή ενέργειας παραμένει σταθερή, κάτι που δεν μπορεί να θεωρηθεί εκτός πραγματικότητας καθώς ενδεχόμενες απώλειες λόγω κατασκευαστικών ή άλλων αστοχιών μπορούν να ισοσταθμιστούν από την εγκατάσταση τόσο ενός λίγο μεγαλύτερου ανεμιστήρα χαμηλής κατανάλωσης που λειτουργεί με ενέργεια που παράγεται από φωτοβολταϊκά όσο και από τη χρήση μεγαλύτερων αεραγωγών, μπορούμε να υπολογίσουμε ότι για δέκα τετραγωνικά μέτρα εγκατεστημένου συστήματος η παραγόμενη ενέργεια ανέρχεται στις 2080kWh ετησίως. Επιπλέον ένα μέσο νοικοκυριό 100m<sup>2</sup> για την Γ κλιματική ζώνη καταναλώνει ετησίως για θέρμανση 17616kWh[9]. Από τα πόσα παραγόμενης και καταναλισκόμενης ενέργειας συμπεραίνουμε ότι ένα σύστημα ηλιακού συλλέκτη αέρος 10m<sup>2</sup> μπορεί να καλύψει το 12% των ετήσιων αναγκών για θέρμανση ενός μέσου νοικοκυριού 100m<sup>2</sup> για την Γ ζώνη.

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα πλαίσια αυτής της έρευνας αποδείχτηκε ότι το σύστημα Ηλιακού Συλλέκτη Αέρος με τις υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσει διατηρεί ζεστό τον οικίσκο από την αρχή μέχρι το τέλος της ημέρας πράγμα που επιφέρει μεγάλη θερμικά οφέλη τόσο κατά την ώρα λειτουργίας του όσο και αν λάβουμε υπόψη το γεγονός ότι η θερμοκρασία στην αρχή της επόμενης ημέρας είναι σημαντικά υψηλότερη από την εξωτερική με αποτέλεσμα να χρειάζεται μικρότερο πόσο ενέργειας για θέρμανση. Ταυτόχρονα η υγρασία παραμένει σε φυσιολογικά επίπεδα εξασφαλίζοντας έναν άνετο χώρο διαβίωσης.

Τα αποτελέσματα τα οποία εξήχθησαν από το πιλοτικό στίπι μας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι με την κατάλληλη μόνωση, ακόμα και σε δυσμενείς κλιματολογικές συνθήκες όπως είναι αυτές που επικράτησαν την περίοδο των μετρήσεων, η συμβολή του ηλιακού συλλέκτη αέρος είναι ουσιαστική και με τη χρήση του μπορεί να επιτευχθεί εξοικονόμηση ενέργειας στον πιο ενεργοβόρο τομέα μίας κατοικίας που είναι ο τομέας της θέρμανσης.

Τέλος η απλότητα της κατασκευής του συστήματος καθιστά την τοποθέτηση του ως ήπια επέμβαση στο κτιριακό κέλυφος ενώ το κόστος συντήρησης του είναι μηδενικό με αποτέλεσμα να πετυχαίνεται γρήγορη οικονομική απόσβεση.

#### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Cohereno (2013), "nZEB criteria for typical single-family home renovations in various countries", Lead partner: BPIE.
- [2] ΕΛΣΤΑΤ. (2013). Ελληνική Στατιστική Αρχή . Ανάκτηση Απρίλιος 12, 2017, από <http://www.statistics.gr/>.
- [3] Kosmopoulos P. and Galanos D. (2006) "The use of renewable energy source in houses (ZED-KIM)", The 3rd Conference on Passive and Low Energy Architecture, Geneva, Switzerland, 6-8 September.
- [4] Kosmopoulos, P., 2000, "Environmental Psychology", University Studio Press.
- [5] Hussein, H.M.S., Ahmad, G.E., and El-Ghetany H.H., 2004, "Performance evaluation of photovoltaic modules at different tilt angles and orientations", Energy Conversion and Management, 45, pp. 2441–2452.
- [6] Νίκου Α.,(2010) Διπλωματική Εργασία "Διερεύνηση ενεργειακής απόδοσης Οικίσκου ZED-KIM για εφαρμογή σε κτίρια", Ξάνθη. Δ.Π.Θ.-Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος
- [7] Duffie John A., Beckman William A.,(1991). Solar engineering of thermal processes, John Wiley and Sons inc
- [8] Sole. (2017). "Ηλιακή θέρμανση με αεροσυλλέκτης". Ανάκτηση Ιούνιος 27, 2017, από Sole: <https://www.eurostar-solar.com/solar-air-conditioning-gr.html>
- [9] Drousa, K. G., Kontoyiannidis, S., Dascalaki, E.G. Balaras, C.A. (2016) "Mapping the energy performance of hellenic residential buildings from EPC (energy performance certificate) data". Energy, σσ. 284-295



## ΣΤΙΓΜΙΑΙΑ ΑΠΟΔΟΣΗ ΚΥΛΙΝΔΡΟΠΑΡΑΒΟΛΙΚΟΥ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΥ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ

**Ε. Μαθιουλάκης, Η. Παπανικολάου και Β. Μπελεσιώτης**

Εργαστήριο Ηλιακών & άλλων Ενεργειακών Συστημάτων, ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος»,  
15341 Αγία Παρασκευή Αττικής, e-mail : math@ipta.demokritos.gr

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η συνολική απόδοση ενός κυλινδροπαραβολικού ηλιακού συλλέκτη (Parabolic Trough Collectors - PTC) εξαρτάται τόσο από την οπτική απόδοση, δηλαδή από την απευθείας ηλιακή ακτινοβολία που απορροφάται από τον δέκτη, όσο και από τις θερμικές απώλειες από τον δέκτη προς το περιβάλλον. Είναι επομένως συνάρτηση μιας σειράς κατασκευαστικών και λειτουργικών παραμέτρων, η ακριβής μορφή της οποίας είναι διαφορετική από την γνωστή εξίσωση στιγμιαίας απόδοσης του επίπεδου θερμικού ηλιακού συλλέκτη.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας διερευνάται θεωρητικά και πειραματικά η μεταβολή της στιγμιαίας απόδοσης ενός τυπικού συλλέκτη PTC γραμμικής εστίασης σε διαφορετικές συνθήκες ηλιοφάνειας, θερμοκρασίας του θερμικού φορέα, θερμοκρασίας περιβάλλοντος και παροχής. Επιχειρείται επιπλέον η συσχέτιση με τα γεωμετρικά στοιχεία και τις οπτικές ιδιότητες του συλλέκτη και η συνακόλουθη διατύπωση της εξίσωσης στιγμιαίας απόδοσης.

Τα αποτελέσματα της διερεύνησης μπορούν να αξιοποιηθούν τόσο στα πλαίσια μιας διαδικασίας δοκιμών για τον χαρακτηρισμό του συλλέκτη, όσο και για την παραμετρική διερεύνηση της απόδοσής του με βάση τις εκάστοτε σχεδιαστικές επιλογές. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της αναμενόμενης ενεργειακής απολαβής από εγκαταστάσεις στις οποίες έχει ενσωματωθεί ένας συλλέκτης γνωστών χαρακτηριστικών απόδοσης.

**Λέξεις Κλειδιά:** Θερμική Ηλιακή Ενέργεια, Συλλέκτης PTC, Απόδοση

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο ηλιακός συλλέκτης τύπου PTC είναι μία από τις πλέον ώριμες τεχνολογίες συγκεντρωτικών διατάξεων για την αξιοποίηση της θερμικής ηλιακής ενέργειας, κυρίως σε εφαρμογές μεσαίων θερμοκρασιών. Για τα λόγο αυτό άλλωστε η τεχνολογία αυτή κυριαρχεί τα τελευταία χρόνια στις εφαρμογές συγκεντρωτικών θερμικών ηλιακών, τόσο σε εγκατεστημένη ισχύ όσο και σε μερίδιο αγοράς [1]. Σε τεχνολογικό και ερευνητικό επίπεδο, οι συλλέκτες PTC έχουν επίσης τύχει εκτεταμένης διερεύνησης, με αποτέλεσμα ένα μεγάλο αριθμό σχετικών δημοσιεύσεων. Μεταξύ των πλέον πρόσφατων, ενδεικτικά αναφέρονται μια συνοπτική ανασκόπηση των σχετικών εφαρμογών [2], μια συνεκτική παρουσίαση στο θεωρητικό υπόβαθρο των εμπλεκόμενων τεχνολογιών με αναφορά στους μηχανισμούς μεταφοράς θερμότητας και στις τεχνολογικές προκλήσεις [3], ή ακόμα ένας σημαντικός αριθμός εργασιών με αναφορά στην οπτική και θερμοϋδραυλική βελτιστοποίηση των συναφών διατάξεων και διεργασιών [4-7].

Η ενσωμάτωση των συλλεκτών PTC σε εγκαταστάσεις πραγματικής κλίμακας θέτει όμως μετ' επιτάσεως το ζήτημα της εκτίμησης των ενεργειακών τους επιδόσεων στις προβλεπόμενες συνθήκες λειτουργίας, ως προϋπόθεση για τη ρεαλιστική αποτίμηση της τεχνικοοικονομικής βιωσιμότητας των εναλλακτικών τεχνολογικών και επενδυτικών επιλογών που οφείλει να εξετάσει ο μελετητής. Η συνήθης πρακτική στον τομέα της αξιοποίησης των ηλιοθερμικών τεχνολογιών, συνίσταται α) στην εύρεση μιας χαρακτηριστικής εξίσωσης για καθένα από τα υποσυστήματα της εγκατάστασης, (δεξαμενή, συλλέκτη κλπ), β) στο συνδυασμό των εξισώσεων αυτών σε ένα λιγότερο ή περισσότερο πολύπλοκο μοντέλο της συνολικής διεργασίας, και γ) στην προσομοίωση της διεργασίας σε τυπικές κλιματικές συνθήκες και για τα επιθυμητά προφίλ χρήσης. Αυτό ισχύει προφανώς και για το συλλέκτη, ο οποίος αποτελεί και την καρδιά μιας ηλιοθερμικής εγκατάστασης. Στην περίπτωση του επίπεδου ηλιακού συλλέκτη, τα παραπάνω συνιστούν κοινή πρακτική, υποστηριζόμενη από τη διενέργεια δοκιμών σύμφωνα με διεθνή πρότυπα, στη βάση των οποίων επιχειρείται ο προσδιορισμός των συντελεστών μιας σχετικά απλής σχέσης, συντελεστές που αποτελούν και την ενεργειακή «ταυτότητα» του κάθε συλλέκτη. Η προσέγγιση αυτή διευκολύνεται από την ύπαρξη μιας επαρκώς τεκμηριωμένης και ευρέως αποδεκτής εξίσωσης, της εξίσωσης Hottel-Whillier-Bliss.

Η περίπτωση των συλλεκτών PTC θέτει ορισμένα ζητήματα, οι απαντήσεις στα οποία δεν έχουν μέχρι τώρα το ίδιο βαθμό αποδοχής, ώστε να ενσωματωθούν σε μια κοινά αποδεκτή και προτυποτεχνικά επιβεβαιωμένη πρακτική. Η διερεύνηση των ζητημάτων αυτών επικεντρώνεται στη μελέτη της φαινομενολογίας του συλλέκτη με σκοπό τη διατύπωση κατάλληλων προσεγγίσεων μοντελοποίησης και την πειραματική τους επικύρωση [8-11]. Στην κατεύθυνση αυτή επιχειρεί να συμβάλει και η παρούσα εργασία, στα πλαίσια της οποίας παρουσιάζονται αρχικά τα αποτελέσματα μιας εκτεταμένης πειραματικής διερεύνησης, η οποία περιορίζεται στην παρούσα φάση στη χρήση ως θερμικού φορέα του νερού, δηλαδή για θερμοκρασίες έως 100 °C. Στη συνέχεια διατυπώνεται μια προσέγγιση μοντελοποίησης και επιχειρείται η επικύρωσή της στη βάση των πειραματικών αποτελεσμάτων.

## 2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

Για τις ανάγκες της πειραματικής διερεύνησης αξιοποιήθηκε ένας τυπικός συλλέκτης PTC, τοποθετημένος στον περιβάλλοντα χώρο του Εργαστηρίου Ηλιακών & άλλων Ενεργειακών Συστημάτων του ΕΚΕΦΕ» ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ» (Φωτ.1).

Πρόκειται για ένα συλλέκτη δύο βαθμών ελευθερίας, με δυνατότητα παρακολούθησης τόσο του αζιμούθιου όσο και του ύψους του ηλίου. Στην εστία του συλλέκτη έχουν τοποθετηθεί ως δέκτες δύο σωλήνες κενού συνδεδεμένοι σε σειρά. Καθένας από τους σωλήνες αποτελείται από ένα εξωτερικό διαφανή σωλήνα από βοροπιρρικό γυαλί και έναν ομοαξονικό εσωτερικό ανοξειδωτο σωλήνα, η εξωτερική επιφάνεια του οποίου έχει υποστεί κατάλληλη επεξεργασία για την απόκτηση επιλεκτικών οπτικών ιδιοτήτων. Ο στεγανός χώρος ανάμεσα στους δύο ομοαξονικούς σωλήνες είναι κενός από αέρα, αν και σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκε επίσης πανομοιότυπος σωλήνας ο οποίος είχε χάσει το κενό του. Για τις ανάγκες της παρούσας διερεύνησης, η συλλεγόμενη θερμότητα οδηγείται σε ηλιακή δεξαμενή χωρητικότητας 500 lt, με τη κυκλοφορία του θερμικού φορέα να ελέγχεται από κατάλληλο διαφορικό θερμοστάτη. Ως ανακλαστική επιφάνεια χρησιμοποιήθηκε αλουμίνιο με επιφανειακή επεξεργασία MIRO-SUN της Alanod. Τα βασικά χαρακτηριστικά του συλλέκτη φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί.



Φωτογραφία 1. Ο συλλέκτης PTC

Πίνακας 1. Βασικά χαρακτηριστικά συλλέκτη PTC

Άνοιγμα παραβολικού κατόπτρου, $W$	1.7 m
Εστιακή απόσταση κατόπτρου, $p$	0.386 m
Συνολικό μήκος κατόπτρου, $L_c$	5 m
Αριθμός σωλήνων σε σειρά	2
Συνολικό μήκος κάθε σωλήνα, $L_t$	2 m
Μήκος ενεργούς (γυάλινης) επιφάνειας σωλήνα, $L$	1.865 m
Εσωτερική διάμετρος εξωτερικού γυάλινου σωλήνα, $d_{ci}$	0.097 m
Εξωτερική διάμετρος εξωτερικού γυάλινου σωλήνα, $d_{co}$	0.1 m
Εσωτερική διάμετρος εσωτερικού μεταλλικού σωλήνα, $d_{fi}$	0.0384m
Εξωτερική διάμετρος εσωτερικού μεταλλικού σωλήνα, $d_{fo}$	0.042 m
Απορροφητικότητα εξωτερικής επιφάνειας εσωτερικού σωλήνα (θερμική ακτινοβολία), $\epsilon_c$	0.1
Απορροφητικότητα γυαλιού εξωτερικού σωλήνα (θερμική ακτινοβολία), $\epsilon_r$	0.88
Μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας σωλήνων	300°C

Η εστίαση της ηλιακής ακτινοβολίας επιτυγχάνεται με την περιστροφή της διάταξης, με τρόπο ώστε ο άξονας της παραβολής που είναι κάθετος στο άνοιγμα του συλλέκτη να κατευθύνεται συνεχώς προς τον ήλιο. Αυτό επιτυγχάνεται με α) τη χρήση κατάλληλου αλγόριθμου υπολογισμού της θέσης του ήλιου σε κάθε χρονική στιγμή, β) τη μέτρηση της ακριβούς θέσης του κατόπτρου με τη βοήθεια ποτενσιομετρικών αισθητήρων θέσης και γ) τη συνεχή διόρθωση της θέσης του κατόπτρου με τη βοήθεια σερβοκινητήρων, με τρόπο που το αζιμούθιο και η κλίση του να ταυτίζονται με το αζιμούθιο και το ύψος του ηλίου αντίστοιχα.

Ως θερμικός φορέας χρησιμοποιήθηκε το νερό και, για το λόγο αυτό, το θερμοκρασιακό επίπεδο λειτουργίας του συλλέκτη επιλέχθηκε να μην υπερβεί τους 100 °C.

Χρησιμοποιήθηκαν κατάλληλα διακριβωμένα αισθητήρια για τη μέτρηση, μεταξύ άλλων, της απευθείας ακτινοβολίας ( $G_D$ ) με τη βοήθεια πυρηλιομέτρου, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος ( $T_a$ ), της θερμοκρασίας στην είσοδο και στην έξοδο της συστοιχίας των σωλήνων ( $T_{in}$  και  $T_{out}$  αντίστοιχα), της θερμοκρασίας του θερμικού φορέα στο ενδιαμέσο σημείο σύνδεσης των δύο σωλήνων μεταξύ τους ( $T_m$ ), της θερμοκρασίας στην δεξαμενή ( $T_s$ ) και της παροχής του θερμικού φορέα ( $m$ ).

Στα πλαίσια της παρούσας διερεύνησης οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν ακολουθώντας δύο βασικά πειραματικά σενάρια. Το πρώτο περιελάμβανε μετρήσεις απόδοσης του συλλέκτη με ενεργοποιημένη την εστίαση και σε συνθήκες ικανοποιητικής ηλιοφάνειας. Το δεύτερο σενάριο αφορούσε μετρήσεις των θερμικών απωλειών σε συνθήκες απουσίας της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, κυρίως της βραδινές ώρες, με την κυκλοφορία του θερμικού φορέα ενεργοποιημένη.

Διερευνήθηκε επίσης η επίπτωση της ύπαρξης ή όχι του κενού στην απόδοση του συλλέκτη, συγκρίνοντας την απόδοση και τις θερμικές απώλειες δύο πανομοιότυπων σωλήνων, ο ένας από τους οποίους είχε απολέσει το κενό.

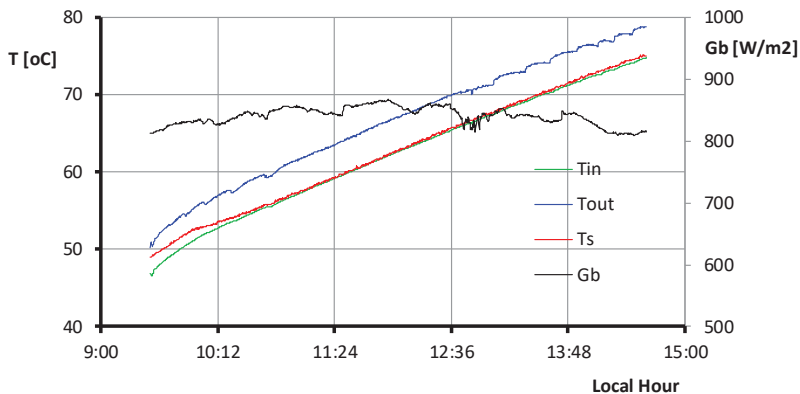
### 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗΣ

#### 3.1. Απόδοση

Για την διερεύνηση της επίδρασης της θερμοκρασίας στην απόδοση, πραγματοποιήθηκαν ολόημερες μετρήσεις για σημαντικό αριθμό ημερών και για διαφορετικές τιμές της μέσης θερμοκρασίας του συλλέκτη, με την παροχή να διατηρείται σχετικά σταθερή και ίση με περίπου 660 l/h. Στο σχήμα 1 φαίνεται η μεταβολή της απευθείας ακτινοβολίας και των θερμοκρασιών στην είσοδο και στην έξοδο του συλλέκτη, καθώς και στην ηλιακή δεξαμενή, για μια τυπική ημέρα μετρήσεων.

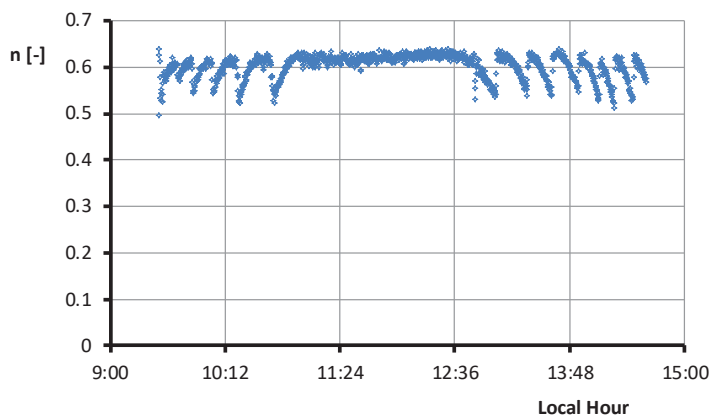
Στο διάγραμμα του σχήματος 2 φαίνεται η μεταβολή, για την ίδια τυπική ημέρα, της απόδοσης του συλλέκτη καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων. Σημειώνεται ότι η απόδοση,  $\eta$ , του συλλέκτη υπολογίζεται ως ο λόγος της αποδιδόμενης θερμότητας προς την απευθείας ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στην ενεργό επιφάνεια του συλλέκτη:

$$\eta = \frac{m c_p (T_{out} - T_{in})}{2 G_b W L} \quad (1)$$



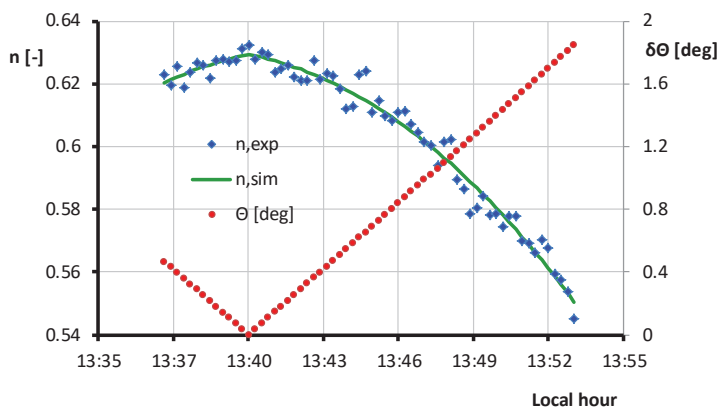
Σχήμα 1. Μεταβολή των θερμοκρασιών στην είσοδο του συλλέκτη ( $T_{in}$ ), στην έξοδο του συλλέκτη ( $T_{out}$ ), στη δεξαμενή ( $T_s$ ), καθώς και της απευθείας ηλιακής ακτινοβολίας, κατά τη διάρκεια μιας τυπικής ημέρας.

Μια καταρχήν παρατήρηση που μπορεί να γίνει στο διάγραμμα του σχήματος 2, αφορά την παρουσία μοτίβων έντονης αυξομειώσεως της απόδοσης. Η ύπαρξη αυτών των περιοδικών μοτίβων, η οποία χαρακτηρίζει όλες τις ημέρες μέτρησης και περιορίζεται στις πρωινές και απογευματινές ώρες, δεν σχετίζεται με σφάλματα διασποράς των μετρήσεων, όπως θα μπορούσε να υποθεθεί σε πρώτη προσέγγιση. Η συστηματική διερεύνηση της χρονικής κατανομής των μεταβολών της απόδοσης σε συνδυασμό με την δραστηριότητα της διάταξης tracking, έδειξε ότι η αρχή και το τέλος του κάθε μοτίβου ταυτίζεται με την αλλαγή θέσης του κατόπτρου. Πιο συγκεκριμένα, το τεχνικά ελάχιστο δυνατό βήμα μεταβολής της κλίσης του συγκεκριμένου κατόπτρου (περίπου 1.8 deg) δεν είναι αρκούντως μικρό ώστε να διασφαλίζει με ακρίβεια την συνεχή παρακολούθηση του μεταβαλλόμενου ύψους του ηλίου. Για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα γύρω από το ηλιακό μεσημέρι η μεταβολή του ύψους του ηλίου είναι αργή και δεν εμφανίζεται μεταβολή της απόδοσης. Τις υπόλοιπες όμως ώρες, η γρηγορότερη μεταβολή του ύψους του ηλίου χωρίς αντίστοιχη μεταβολή της κλίσης του κατόπτρου, έχει ως συνέπεια την υποβάθμιση της ακρίβειας της εστίασης λόγω της ύπαρξης γωνιών πρόσπτωσης διαφορετικών του μηδενός.



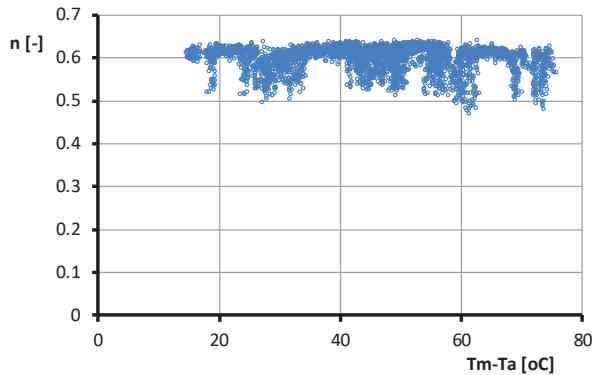
Σχήμα 2. Μεταβολή της απόδοσης,  $n$ , του συλλέκτη κατά τη διάρκεια μιας τυπικής ημέρας

Στο σχήμα 3 φαίνεται, για ένα συγκεκριμένο μοτίβο μεταβολής της απόδοσης, η ταυτόχρονη μεταβολή της γωνίας πρόσπτωσης, υπολογιζόμενη ως η διαφορά της κλίσης που θα έπρεπε να έχει ιδεατά το κάτοπτρο από την κλίση που έχει στην πράξη λόγω της ασυνεχούς του μετακίνησης. Η συσχέτιση άλλωστε των δύο καμπυλών επιτρέπει την εύρεση της σχέσης που περιγράφει τη μεταβολή του συντελεστή γωνίας πρόσπτωσης (IAM) από τη γωνιακή απόκλιση του συλλέκτη από την ιδεατά επιθυμητή θέση του. Όπως διαπιστώνεται από το διάγραμμα, μια πολυωνυμική σχέση 2<sup>ου</sup> βαθμού οδηγεί, σε μια ικανοποιητική προσέγγιση της πραγματικής ( $n_{exp}$ ) από την υπολογιζόμενη απόδοση ( $n_{sim}$ ). Η φαινομενική επομένως ανωμαλία στις τιμές της απόδοσης μπορεί να αξιοποιηθεί για τον υπολογισμό του συντελεστή γωνίας πρόσπτωσης. Ο συντελεστής αυτός συνιστά χαρακτηριστικό του κατόπτρου και πληροφορία απαραίτητη για την αξιόπιστη μοντελοποίηση της διάταξης.

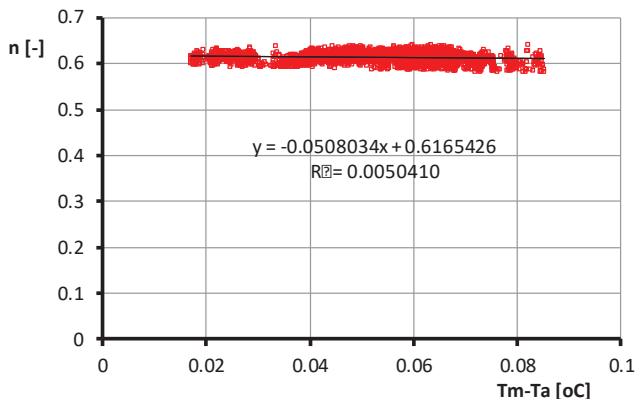


Σχήμα 3. Επίδραση της απόκλισης στην εστίαση αζιμούθιου στην απόδοση του συλλέκτη και συντελεστής γωνίας πρόσπτωσης

Η μεταβολή της απόδοσης με το θερμοκρασιακό επίπεδο λειτουργίας του συλλέκτη φαίνεται στο σχήμα 4, για το σύνολο των πειραματικών μετρήσεων που κατεγράφησαν (περίπου 4500 σημεία). Για την αποτελεσματικότερη ωστόσο διερεύνηση της μεταβολής αυτής, επιλέχθηκαν τελικά μόνο τα περίπου 3500 σημεία τα οποία είναι απαλλαγμένα από προβλήματα ατελούς εστίασης (σχήμα 5). Στην πράξη τα σημεία του διαγράμματος αυτού αντιπροσωπεύουν τις τιμές της μέγιστης απόδοσης του συλλέκτη σε κάθε σημείο λειτουργίας του.



Σχήμα 4. Απόδοση του συλλέκτη σε συνάρτηση της διαφοράς της μέσης θερμοκρασίας του από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος



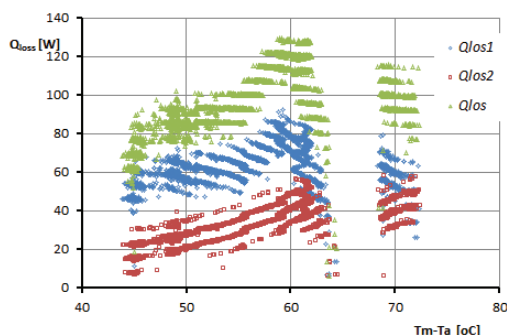
Σχήμα 5. Απόδοση του συλλέκτη σε συνάρτηση της διαφοράς της μέσης θερμοκρασίας του από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, για τα σημεία αποτελεσματικής εστίασης.

Το σημαντικότερο συμπέρασμα που προκύπτει από την ανάλυση των δεδομένων απόδοσης συνίσταται στην σχεδόν σταθερή απόδοση του συλλέκτη σε όλο το θερμοκρασιακό εύρος που διερευνήθηκε. Στην κατεύθυνση αυτή μπορούν να γίνουν οι παρακάτω παρατηρήσεις:

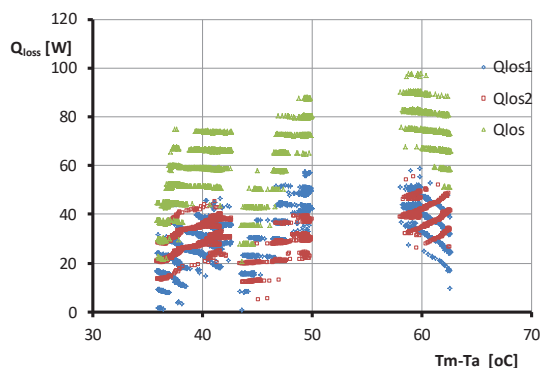
- Παρά τη φαινομενική της σταθερότητα, η απόδοση εμφανίζει μια μικρή πτωτική τάση με την αύξηση της θερμοκρασίας του θερμικού φορέα. Η πτωτική αυτή τάση είναι ενδεικτική της μικρής αλλά υπαρκτής αύξησης των απωλειών με την αύξηση της θερμοκρασιακής διαφοράς  $T_m - T_a$ .
- Η μικρή επίδραση του θερμοκρασιακού επιπέδου λειτουργίας του συλλέκτη στις θερμικές απώλειες προς το περιβάλλον είναι αναμενόμενη για συλλέκτες τύπου PTC, και ειδικά στην περίπτωση συνδυασμού τους με σωλήνες κενού, τουλάχιστον για την περιοχή των σχετικά χαμηλών θερμοκρασιών (μέχρι 100°C).
- Στη πραγματικότητα, ο συντελεστής απόδοσης καθορίζεται σχεδόν εξ ολοκλήρου από την οπτική απόδοση του συλλέκτη και σε πολύ μικρότερο βαθμό από τις θερμικές απώλειες. Όπως θα φανεί και από τα ποσοτικά στοιχεία που συζητούνται στις επόμενες ενότητες, η θερμική ισχύς του συλλέκτη βρίσκεται στα επίπεδα των 3.5 kW ενώ οι θερμικές απώλειες είναι της τάξης των μερικών δεκάδων wats, είναι δηλαδή τάξης μεγέθους περίπου 1-3%.

### 3.2. Θερμικές απώλειες

Δεδομένου ότι η χαμηλή μεταβλητότητα της απόδοσης με την θερμοκρασιακή διαφορά  $T_m - T_a$  δεν επιτρέπει την αξιόπιστη ποσοτική προσέγγιση των θερμικών απωλειών σε συνθήκες απουσίας έκθεσης στον ήλιο, ακολουθήθηκε μια διαφορετική προσέγγιση βασισμένη στην μέτρησή τους σε συνθήκες απουσίας της ηλιακής ακτινοβολίας. Το σενάριο μετρήσεων προέβλεπε τη μέτρηση των απωλειών θερμότητας,  $Q_{loss}$ , από την είσοδο έως και την έξοδο του συλλέκτη, για την ίδια παροχή του θερμικού φορέα, κυρίως κατά τη διάρκεια της νύχτας. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων για ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιακών διαφορών φαίνονται στα σχήματα 6 και 7, τόσο για το συνολικό συλλέκτη, όσο και για τους δύο σωλήνες ξεχωριστά.



Σχήμα 6. Θερμικές απώλειες  $Q_{los1}$  στον 1<sup>ο</sup> σωλήνα (με κενό),  $Q_{los2}$  στον δεύτερο σωλήνα και συνολικές στον συλλέκτη  $Q_{los}$ , ως συνάρτηση της διαφοράς θερμοκρασίας  $T_m - T_a$ .



Σχήμα 7. Θερμικές απώλειες  $Q_{los1}$  και  $Q_{los2}$  στους δύο σωλήνες με κενό, καθώς και συνολικές απώλειες  $Q_{los}$  στον συλλέκτη, ως συνάρτηση της διαφοράς θερμοκρασίας  $T_m - T_a$ .

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων τα ακόλουθα σημεία συζήτησης:

- Τα αποτελέσματα χαρακτηρίζονται από μεγάλη διασπορά, η οποία δεν διευκολύνει απολύτως την εξαγωγή ασφαλών ποσοτικών συμπερασμάτων. Η διασπορά όμως αυτή μπορεί να χαρακτηριστεί ως φυσιολογική εάν παρθεί υπόψη ότι προκύπτουν από μετρήσεις που εξαντλούν τις μετρολογικές δυνατότητες του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού, δεδομένου ότι αφορούν διαφορές θερμοκρασίας της τάξης των μερικών εκατοστών του βαθμού. Από την άποψη αυτή, η ανάλυση των μετρήσεων είναι αξιοποιήσιμη σε ποιοτικό και όχι σε ποσοτικό επίπεδο.
- Επιβεβαιώνεται ότι οι θερμικές απώλειες είναι πολύ μικρές σε σχέση με τη θερμική ισχύ του συλλέκτη, της τάξης των μερικών δεκάδων wats.
- Οι απώλειες του σωλήνα κενού είναι της τάξης των 20-50 W, ενώ αυτές του σωλήνα που έχει χάσει το κενό είναι περίπου διπλάσιες.

- Υπάρχει, όπως αναμένεται, μία γενικά αυξητική τάση με τη διαφορά θερμοκρασία η οποία όμως δεν είναι ιδιαίτερα εμφανής στη συγκεκριμένη περιοχή θερμοκρασιών.
- Η απουσία του κενού οδηγεί εύλογα σε σαφώς μεγαλύτερες θερμικές απώλειες, οι οποίες όμως εξακολουθούν να είναι πολύ μικρές σε σχέση με την ανακτώμενη θερμότητα.

### 3.3. Υπολογισμός απόδοσης και προέκταση σε υψηλότερες θερμοκρασίες

Για τους υπολογισμούς που ακολουθούν υιοθετούνται οι παρακάτω υποθέσεις:

- Η μεταβολή της θερμοκρασίας διαμέσου των τοιχωμάτων των σωλήνων είναι αμελητέα.
- Ο υπολογισμός των θερμικών ροών που ανταλλάσσονται μεταξύ του ρευστού, των σωλήνων και του περιβάλλοντος υπολογίζονται συνολικά για όλο το μήκος του συλλέκτη, θεωρώντας μια μέση θερμοκρασία τόσο για το ρευστό όσο και για τους σωλήνες.

Η θερμική ισχύς,  $Q_s$ , που προσπίπτει, μετά από την ανάκλαση της απευθείας ακτινοβολίας,  $G_b$ , στην αξιοποιήσιμη επιφάνεια,  $A_c$ , των σωλήνων είναι:

$$Q_s = G_b A_c \quad (2)$$

Θεωρώντας μια ολική οπτική απόδοση  $n_{opt}$  του συλλέκτη, η θερμική ισχύς,  $Q_{abc}$ , που απορροφάται από τον εσωτερικό σωλήνα γράφεται:

$$Q_{abc} = n_{opt} Q_s \quad (3)$$

Η θερμότητα που απορροφάται επιμερίζεται σε αυτήν,  $Q_u$ , που μεταφέρεται στο ρευστό και στις απώλειες προς το περιβάλλον,  $Q_{loss}$ . Η θερμότητα  $Q_u$  μεταφέρεται από την εσωτερική επιφάνεια του απορροφητή στο ρευστό και έχει ως συνέπεια τη αύξηση της θερμοκρασίας του από  $T_{in}$  σε  $T_{out}$ , οπότε ισχύουν οι σχέσεις:

$$Q_u = m C_p (T_{out} - T_{in}) \quad (4)$$

$$Q_u = h_{r \rightarrow f} A_{ri} (T_r - T_f) \quad (5)$$

όπου  $A_{ri}$  είναι η εσωτερική επιφάνεια του μεταλλικού σωλήνα – απορροφητή. Για τον υπολογισμό του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας,  $h_{r \rightarrow f}$ , μπορεί να χρησιμοποιηθεί η εξίσωση Dittus-Boelter[12]:

$$h_{r \rightarrow f} = \frac{\mu N u}{D_{ri}} = \frac{\mu}{D_{ri}} 0.023 R_e^{0.8} P_r^{0.4} \quad (6)$$

Οι θερμικές απώλειες μεταφέρονται από την εξωτερική πλευρά του εσωτερικού μεταλλικού σωλήνα στην εσωτερική επιφάνεια του εξωτερικού γυάλινου σωλήνα και στη συνέχεια στο περιβάλλον. Ισχύει τότε η εξίσωση (7) για τη μεταφορά θερμότητας από τον εσωτερικό σωλήνα, θερμοκρασίας  $T_r$ , στον εξωτερικό, θερμοκρασίας  $T_c$ , και η εξίσωση (8) για τις απώλειες προς το περιβάλλον:

$$Q_{loss} = \varepsilon_{eff} \sigma A_{ro} (T_r^4 - T_c^4) + h_{r \rightarrow c} (T_r - T_c) A_{ro} \quad (7)$$

$$Q_{loss} = \varepsilon_c \sigma A_{co} (T_c^4 - T_a^4) + A_{co} h_{c \rightarrow a} (T_c - T_a) \quad (8)$$

Η ενεργός εκπεμπιμότητα  $\varepsilon_{eff}$  υπολογίζεται από τη σχέση [13]:

$$\varepsilon_{eff} = \left( \frac{1}{\varepsilon_r} + \frac{1 - \varepsilon_c A_{ro}}{\varepsilon_c A_{ri}} \right)^{-1} \quad (9)$$

Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας προς το περιβάλλον,  $h_{c \rightarrow a}$ , μπορεί να θεωρηθεί σταθερός και ίσος με  $10 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ , δεδομένου άλλωστε της μικρής επίδρασης που έχει στο τελικό αποτέλεσμα. Στην περίπτωση του σωλήνα κενού, ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή,  $h_{r \rightarrow c}$ , στην εξίσωση (6) θεωρείται μηδενικός, ενώ στην περίπτωση που δεν υπάρχει κενό αλλά αέρας ανάμεσα στους δύο σωλήνες, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση [10]:

$$h_{r \rightarrow c} = \frac{2k_{eff} (T_r - T_c)}{D_{ro} \ln(D_{ci}/D_{ro})} \quad (10)$$

Η ενεργός αγωγιμότητα υπολογίζεται από την αγωγιμότητα,  $k$ , του αέρα με βάση τη σχέση:

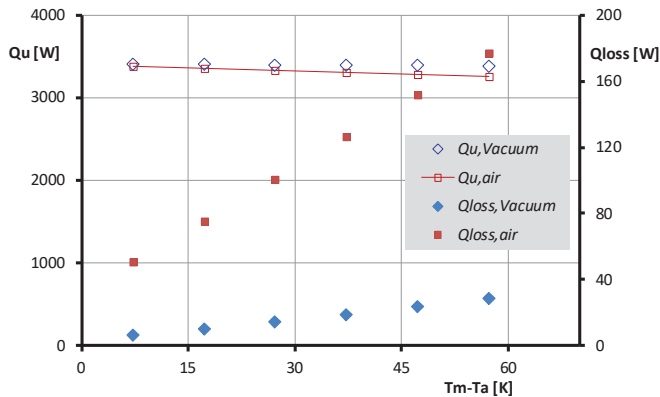
$$k_{eff} = 0,386 k \left( \frac{p_r}{0,861 + p_r} \right)^{0,25} R_a^{0,25} \quad (11)$$

Για τον υπολογισμό του αδιάστατου αριθμού Rayleigh χρησιμοποιείται το χαρακτηριστικό μήκος,  $L_c$ :

$$L_c = \frac{4(\ln(D_{ci}/D_{ro}))^{4/3}}{(D_{ci}^{-3/5} + D_{ro}^{-3/5})^{5/3}} \quad (12)$$

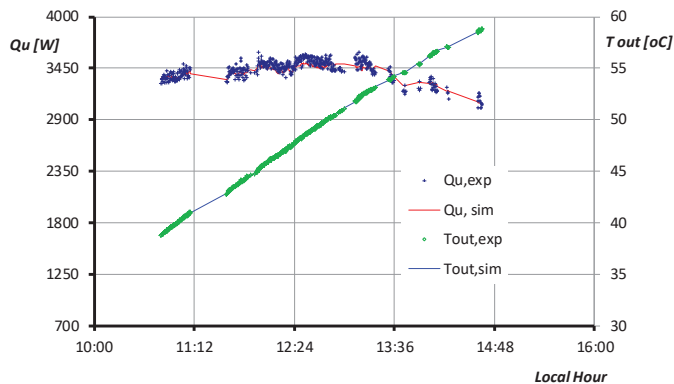
Για ένα δεδομένο συλλέκτη (γνωστές διαστάσεις σωλήνων και οπτικές ιδιότητες υλικών) και για συγκεκριμένες συνθήκες (απευθείας ακτινοβολία, θερμοκρασία περιβάλλοντος, παροχή ρευστού και θερμοκρασία στην είσοδο του συλλέκτη, οι σχέσεις (1) έως (11) συνιστούν ένα σύστημα μη-γραμμικών εξισώσεων. Η επίλυση του συστήματος αυτού είναι εφικτή μόνο με επαναληπτικές μεθόδους, πολύ περισσότερο στο βαθμό που επιλέγεται ο υπολογισμός των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του νερού και του αέρα ως συνάρτηση της θερμοκρασίας.

Στο διάγραμμα που ακολουθεί φαίνονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν για τον συγκεκριμένο συλλέκτη, θεωρώντας  $G_b = 850 \text{ Wm}^{-2}$  και  $T_a = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ , δηλαδή συνθήκες αντιπροσωπευτικές των πειραματικών που παρουσιάστηκαν πιο πάνω.



Σχήμα 8. Μεταβολή της ανακτώμενης θερμικής ισχύος και των θερμικών απωλειών για σωλήνες κενού και σωλήνες χωρίς ενδιάμεσο κενό.

Ο υπολογισμός έγινε για σωλήνες κενού ( $Q_{u,Vacuum}$ ,  $Q_{loss,Vacuum}$ ) και για σωλήνες χωρίς ενδιάμεσο κενό ( $Q_{u,air}$ ,  $Q_{loss,air}$ ). Εύκολα παρατηρείται η συμβατότητα με τα πειραματικά αποτελέσματα, τόσο όσο αφορά το μέγεθος των θερμικών ροών, όσο την γενική τάση μεταβολής τους με το θερμοκρασιακό επίπεδο λειτουργίας του συλλέκτη.



Σχήμα 9. Συγκριτική παρουσίαση πειραματικών τιμών και προσομοίωσης για την ανακτώμενη θερμική ισχύ ( $Q_u$ ) και τη θερμοκρασία στην έξοδο του συλλέκτη ( $T_{out}$ ).

Η δυνατότητα του μοντέλου που συγκροτείται από τις σχέσεις (1) έως (11) να προβλέπει αξιόπιστα τη συμπεριφορά του συλλέκτη φαίνεται και στο διάγραμμα του σχήματος 9, όπου εμφανίζονται συγκριτικά οι πειραματικές και υπολογιζόμενες τιμές για την ανακτώμενη θερμική ισχύ,  $Q_u$ , και τη θερμοκρασία στην έξοδο του συλλέκτη,  $T_{out}$ , για μια τυπική ημέρα λειτουργίας (4 Οκτωβρίου 2017). Για τον υπολογισμό των προσομοιωμένων τιμών  $T_{out,sim}$  και  $Q_{u,sim}$ , χρησιμοποιήθηκαν οι πειραματικά καταγεγραμμένες τιμές ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, της παροχής θερμικού φορέα και της θερμοκρασίας στην είσοδο του συλλέκτη.

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα πλαίσια της παρούσας διερεύνησης επιχειρήθηκε η ποσοτική αποτίμηση της στιγμιαίας απόδοσης ενός θερμικού ηλιακού συλλέκτη PTC δύο βαθμών ελευθερίας με σωλήνες κενού στην εστία του και με νερό ως θερμικό φορέα. Τόσο η πειραματική διερεύνηση όσο και οι θεωρητικοί υπολογισμοί επιβεβαίωσαν ότι οι θερμικές απώλειες είναι εξαιρετικά περιορισμένες σε σχέση με την ανακτώμενη χρήσιμη θερμική ισχύ. Διαπιστώθηκε επίσης ότι οι απώλειες αυτές παραμένουν περιορισμένες, αν και μεγαλύτερες, ακόμα και στην περίπτωση που υπάρξει απώλεια του κενού στο σωλήνα - δέκτη. Καθοριστικά επιδρά στην απόδοση του συλλέκτη η οπτική του απόδοση, η οποία είναι συνάρτηση των οπτικών ιδιοτήτων των χρησιμοποιούμενων υλικών, τόσο για τους ανακλαστήρες όσο και για τον δέκτη. Σημαντική είναι επίσης η επίδραση της ακρίβειας της εστίασης του συλλέκτη, δεδομένου ότι αποκλίσεις ακόμα και της τάξης του ενός βαθμού οδηγούν σε αξιοσημείωτη υποβάθμιση των επιδόσεών του. Σε κάθε περίπτωση, η επίδραση αυτή συνιστά χαρακτηριστικό του κάθε συλλέκτη το οποίο είναι δυνατό να προσδιοριστεί πειραματικά στα πλαίσια μιας διαδικασίας δοκιμών, ώστε να μπορέσει να αξιοποιηθεί για τον υπολογισμό του αναμενόμενου ενεργειακού οφέλους σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

#### ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του έργου με τίτλο «Ερευνητική υποδομή συγκεντρωτικών ηλιακών για παραγωγή και αποθήκευση ενέργειας μεσαίων θερμοκρασιών», με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και του Ευρωπαϊκού Ταμείου Περιφερειακής Ανάπτυξης, Επιχειρησιακό Πρόγραμμα «Επιχειρηματικότητα - Ανταγωνιστικότητα - Καινοτομία», Δράση «Ενίσχυση των Υποδομών Έρευνας και Καινοτομίας».

#### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] REN21, 2017, RENEWABLES 2017 - GLOBAL STATUS REPORT, Paris.
- [2] V.K. Jebasingh, G.M. Joselin Herbert, 2017, "A review of solar parabolic trough collector", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 54, pp. 1085-1091.
- [3] Wang Fuqiang, Cheng Ziming, Tan Jianyu, Yuan Yuan, Shuai Yong, Liu Linhua, 2017, "Progress in concentrated solar power technology with parabolic trough collector system: A comprehensive review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 79, pp. 1314-1328.
- [4] Meng Tian, Yuehong Su, Hongfei Zheng, Gang Pei, Guiqiang Li, SaffaRiffat. A review on the recent research progress in the compound parabolic concentrator (CPC) for solar energy applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82(1), 2018, pp. 1272-1296.
- [5] A.Z. Hafez, A.M. Attia, H.S. Eltwab, A.O. ElKousy, A.A. Affi, A.G. AbdElhamid, A.N. AbdElqader, S-E.K. Fateen, K.A. El-Metwally, A. Soliman, I.M. Ismail, 2018, "Design analysis of solar parabolic trough thermal collectors", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82(1), pp. 1215-1260.
- [6] C. Tzivanidis, E. Bellos, D. Korres, K.A. Antonopoulos, G. Mitsopoulos, 2015, «Thermal and optical efficiency investigation of a parabolic trough collector», Case Studies in Thermal Engineering, 6, pp. 226-237.
- [7] G. Kumaresan, P. Sudhakar, R. Santosh, R. Velraj, 2017, "Experimental and numerical studies of thermal performance enhancement in the receiver part of solar parabolic trough collectors", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 77, pp. 1363-1374.

- [8] L. Salgado Conrado, A. Rodríguez-Pulido, G. Calderón, 2017, "Thermal performance of parabolic trough solar collectors", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, pp. 1345-1359.
- [9] E. Bellos, Ch. Tzivanidis, V. Belessiotis, 2017, "Daily performance of parabolic trough solar collectors", *Solar Energy*, 158, pp. 663-678.
- [10] Fabienne Sallaberry, Loreto Valenzuela, Luis G. Palacin, 2017, «On-site parabolic-trough collector testing in solar thermal power plants: Experimental validation of a new approach developed for the IEC 62862-3-2 standard», *Solar Energy*, 155, pp. 398-409.
- [11] C. Kutscher, F. Burkholder, K. Stynes, 2010, "Generation of a Parabolic Trough Collector Efficiency Curve from Separate Measurements of Outdoor Optical Efficiency and Indoor Receiver Heat Loss", *SolarPACES*, Perpignan, France.
- [12] Bergman T., Lavine A., Incropera F., Dewitt D., 2011, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 7<sup>th</sup> Ed., JOHN WILEY & SONS.
- [13] Duffie JA, Beckman WA., 2013, *Solar engineering of thermal processes*. 4th ed. New York: J. Wiley & Sons Inc..



## Η ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΧΩΡΕΣ ΤΗΣ ΜΕΣΟΓΕΙΟΥ

**Νίκος Παπαμανώλης**

Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών Πολυτεχνείου Κρήτης

email: npapama@arch.tuc.gr

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην περιοχή της Μεσογείου καταγράφονται σχετικά υψηλές τιμές ηλιακής ακτινοβολίας καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Παράλληλα, οι όμοιες κλιματικές συνθήκες της περιοχής, δικαιολογούν σε αυτήν συγκρίσιμες ενεργειακές ανάγκες σε βασικούς τομείς ενεργειακών καταναλώσεων (π.χ. κτιριακός, αγροτικός). Αποτελεί ως εκ τούτου η περιοχή της Μεσογείου κατάλληλο πεδίο σύγκρισης και αξιολόγησης δεδομένων παραγωγής και κατανάλωσης ηλιακής ενέργειας.

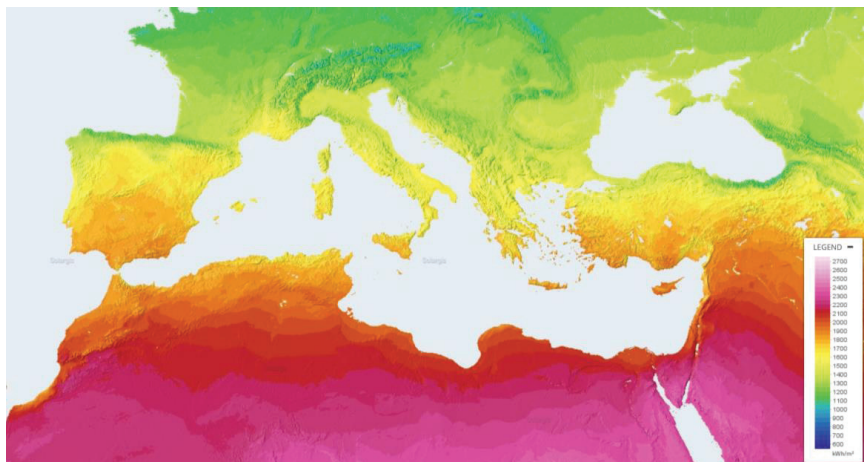
Η εργασία μελετά, με βάση διαθέσιμα στατιστικά στοιχεία, την παραγωγή και κατανάλωση ηλιακής ενέργειας σε χώρες της Μεσογείου. Μελετά την εξέλιξη της παραγωγής ενέργειας από τον ήλιο σε σύγκριση τόσο με την παραγωγή ενέργειας από άλλες ανανεώσιμες όσο και από μη ανανεώσιμες πηγές. Εντοπίζει και εξετάζει τους παράγοντες που επιδρούν θετικά ή αρνητικά στην αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας στην περιοχή. Στο μέτρο που τα στοιχεία το επιτρέπουν, η μελέτη εξειδικεύεται σε διαφορετικούς τομείς αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας (π.χ. παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, φωτοβολταϊκά, ηλιοθερμικά). Τα συμπεράσματα βοηθούν στη βελτιστοποίηση της αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας στην περιοχή της Μεσογείου και ειδικότερα στην περιοχή της Ελλάδας.

**Λέξεις Κλειδιά:** *Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Εφαρμογές ΑΠΕ, Ηλιακή Ενέργεια, Μεσογειακές χώρες, Συστήματα ΑΠΕ*

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η λεκάνη της Μεσογείου και οι χώρες που την περιβάλουν αποτελούν σημαντική γεωπολιτική περιοχή του πλανήτη με πολλά κοινά χαρακτηριστικά. Το κλίμα είναι ένα από αυτά.

Το Μεσογειακό κλίμα χαρακτηρίζεται από ευδιάκριτη εναλλαγή εποχών. Οι χειμώνες είναι ήπιοι και σχετικά βροχεροί. Τα καλοκαίρια είναι θερμά και ξηρά. Κατά τη διάρκειά τους δεν σημειώνονται υπερβολικά υψηλές θερμοκρασίες, εφόσον η θερμοκρασία μετριάζεται από την επίδραση της θάλασσας. Επίσης, η αίσθηση της ζέστης δεν είναι αποπνικτική, επειδή τις περισσότερες μέρες η σχετική υγρασία της ατμόσφαιρας είναι χαμηλή. Η εποχή της άνοιξης είναι ιδιαίτερα ασταθής και μεταβατική περίοδος, ενώ το φθινόπωρο είναι τις περισσότερες φορές μικρής διάρκειας καθώς ο χειμώνας ξεκινάει απότομα. Η περιοχή της Μεσογείου χαρακτηρίζεται από αυξημένη ηλιοφάνεια και υψηλές τιμές ηλιακής ακτινοβολίας (Εικόνα 1).



Εικόνα 1: Μέση ετήσια ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο στην περιοχή της Μεσογείου [1]

Στις Μεσογειακές χώρες περιλαμβάνονται χώρες της Νότιας Ευρώπης (Πορτογαλία, Ισπανία, Γαλλία, Ιταλία, Σλοβενία, Κροατία, Βοσνία - Ερζεγοβίνη, Μαυροβούνιο, Αλβανία, Ελλάδα), της Εγγύς Ανατολής (Τουρκία, Κύπρος, Συρία, Λίβανος, Ισραήλ) και της Βόρειας Αφρικής (Μαρόκο, Αλγερία, Τυνησία, Μάλτα, Λιβύη, Αίγυπτος). Ο πληθυσμός της λεκάνης της Μεσογείου πλησιάζει τα 500 εκατομμύρια και αναμένεται να αυξηθεί στα 600 εκατομμύρια έως το 2030, εκ των οποίων το 60 % θα βρίσκεται στη νότια όχθη της. Η κατανάλωση ενέργειας στην περιοχή της Μεσογείου αντιστοιχεί στο 9 % της παγκόσμιας ζήτησης και αναμένεται να συνεχίσει να αυξάνεται κατά 1,5 % ετησίως [2].

Η εργασία μελετά συγκριτικά την παραγωγή και κατανάλωση ενέργειας από ΑΠΕ σε χώρες της Μεσογείου, με έμφαση στην παραγωγή και κατανάλωση ηλιακής ενέργειας. Από στοιχεία προερχόμενα από διεθνείς βάσεις στατιστικών δεδομένων (Eurostat, World Bank DataBank, IEA Statistics) εντοπίζει και εξετάζει παράγοντες που επιδρούν στην αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας στην περιοχή. Στόχος της εργασίας είναι η εξαγωγή γενικών συμπερασμάτων για την καλύτερη αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας στην περιοχή της Μεσογείου και ειδικότερα στην περιοχή της Ελλάδας.

## 2. ΤΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΠΡΟΦΙΛ ΤΗΣ ΜΕΣΟΓΕΙΟΥ

Η παραγωγή ενέργειας στην περιοχή της Μεσογείου βασίζεται σε ορυκτές πηγές (άνθρακας, πετρέλαιο, φυσικό αέριο). Υπολογίζεται ότι μέχρι το 2030 οι ενεργειακές καταναλώσεις από ορυκτές πηγές στην περιοχή θα υπερβαίνουν το 80 % των συνολικών καταναλώσεων. Ένα μέρος των αναγκών σε ορυκτά καύσιμα καλύπτεται από εγχώρια αποθέματα. Η Βόρεια Αφρική συγκεντρώνει λιγότερο από το 5 % των αποδεδειγμένων παγκόσμιων αποθεμάτων σε πετρέλαιο και φυσικό αέριο. Από όλες τις χώρες παραγωγής της περιοχής της Μεσογείου, μόνο η Λιβύη, κυρίως λόγω του μικρού πληθυσμού της,

διαθέτει δυναμικό διάρκειας περίπου 50 ετών. Αντίθετα, η Αλγερία και η Αίγυπτος, με βάση τα υφιστάμενα στοιχεία σχετικά με τα αποθέματά τους, οδηγούνται στο να μετατραπούν σε εισαγωγείς ενέργειας. Σύμφωνα με μελέτες, η παραγωγή πετρελαίου στην περιοχή της Μεσογείου αναμένεται να αυξηθεί μόνο κατά 20 % σε είκοσι χρόνια, ενώ η παραγωγή φυσικού αερίου αναμένεται να διπλασιαστεί. Από την άλλη μεριά, οι χώρες της νότιας και της ανατολικής όχθης της Μεσογείου βρίσκονται σε μία κρίσιμη φάση της πολιτικής, οικονομικής, κοινωνικής και ενεργειακής τους ανάπτυξης. Είναι επομένως φυσικό να γνωρίζουν ρυθμούς αύξησης της ζήτησης σε ενέργεια της τάξης του 6 % έως 7 % και σε ορισμένες περιπτώσεις του 8 %. Με αυτά τα δεδομένα, υπολογίζεται ότι μέχρι το 2030 οι χώρες της Μεσογείου, συνολικά, θα εισάγουν το 40 % και το 30 % των αναγκών τους σε πετρέλαιο και σε φυσικό αέριο, αντίστοιχα [2].

Η περιοχή της Μεσογείου διαθέτει σημαντικούς πόρους σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, κυρίως σε ηλιακή και αιολική ενέργεια. Διαθέτει επίσης σημαντικά αποθέματα σε βιομάζα και πιθανά αποθέματα γεωθερμικής ενέργειας στην Ελλάδα, την Αλγερία και το Μαρόκο. Παρά το υψηλό δυναμικό των πόρων και τη βούληση των περισσότερων κρατών να τους εκμεταλλευτούν, το μερίδιο των ΑΠΕ παραμένει χαμηλό, ή ακόμη και οριακό στον ενεργειακό ισοζύγιο των κρατών της νότιας και ανατολικής Μεσογείου. Ωστόσο, είναι αξιοσημείωτο ότι το μερίδιο αυτό αυξήθηκε κατά τα τελευταία χρόνια.

### 3. ΟΙ ΑΠΕ ΣΤΙΣ ΧΩΡΕΣ ΤΗΣ ΜΕΣΟΓΕΙΟΥ

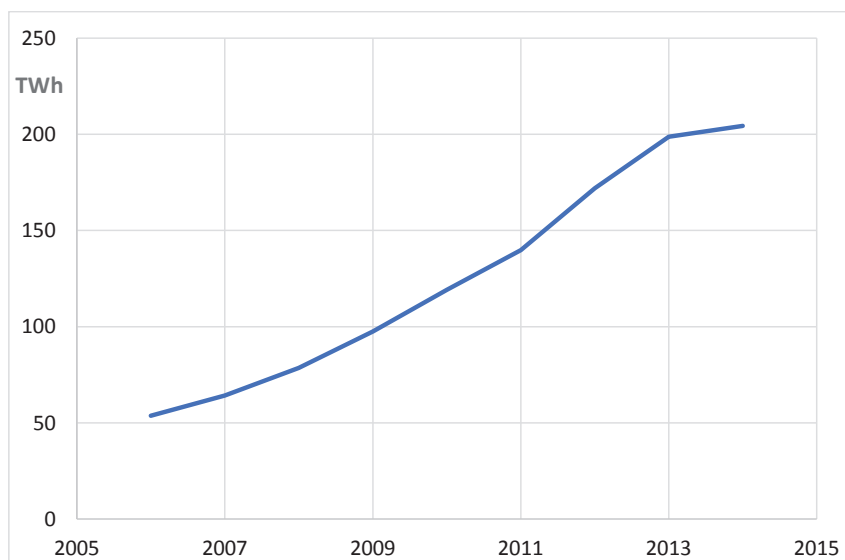
Στους Πίνακες 1 και 2 καταγράφονται τα στατιστικά στοιχεία που περιγράφουν την εξέλιξη της κατανάλωσης ενέργειας από ΑΠΕ στις χώρες της Μεσογείου κατά την τελευταία δεκαετία. Παρατηρούμε ότι οι τάσεις, τόσο συνολικά (Εικόνα 2), όσο και για κάθε χώρα ξεχωριστά (πλην εξαιρέσεων) είναι αυξητικές, γεγονός που αντανάκλα τη σημαντική πρόοδο όσον αφορά το δυναμικό της εγκατεστημένης παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές στην περιοχή. Η αύξηση οφείλεται κατά βάση στην ηλιακή και την αιολική ενέργεια. Παρατηρούμε ότι οι χώρες που βρίσκονται βορειώς της Μεσογείου (Νότια Ευρώπη) αποτελούν τους μεγαλύτερους παραγωγούς ανανεώσιμης ενέργειας. Ειδικότερα, από τον πίνακα 1 προκύπτει ότι, με βάση τα πιο πρόσφατα διαθέσιμα στατιστικά στοιχεία (2014), χώρες της Βαλκανικής, όπως το Μαυροβούνιο, η Βοσνία Ερζεγοβίνη, η Αλβανία, τοποθετούνται στην πρωτοπορία αξιοποίησης των ΑΠΕ. Αντίθετα, χώρες που βρίσκονται στη νότια όχθη της Μεσογείου εμφανίζουν χαμηλές επιδόσεις. Επιπλέον, σε κάποιες από αυτές τις χώρες παρατηρείται στασιμότητα ή ακόμη και αρνητική τάση (π.χ. Λίβανος, Λιβύη, Αλγερία) στην ανάπτυξη εφαρμογών ΑΠΕ.

Πίνακας 1: Κατανάλωση ενέργειας από ΑΠΕ ως ποσοστό (%) των συνολικών ενεργειακών καταναλώσεων [3].

Χώρα	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Πορτογαλία	22,3	23,2	23,2	24,9	27,8	27,2	25,5	30,2	30,5
Ισπανία	8,5	9,0	9,7	12,2	14,4	14,8	15,8	17,0	17,4
Γαλλία	8,5	9,4	10,5	11,2	11,9	10,8	12,4	13,4	13,1
Ιταλία	7,5	8,7	10,8	12,5	12,8	11,9	14,4	16,3	17,1
Σλοβενία	14,4	14,1	13,9	18,9	19,6	18,6	19,8	22,1	22,7
Κροατία	25,5	22,7	24,2	27,2	29,8	27,2	29,4	32,8	33,7
Βοσνία Ερζεγοβίνη	18,1	14,8	14,3	17,4	19,6	14,2	15,3	19,5	41,8
Μαυροβούνιο	47,7	46,3	42,7	53,9	54,5	43,2	46,2	49,3	46,0
Αλβανία	31,7	32,1	35,9	37,2	37,1	36,0	40,1	41,3	38,7
Ελλάδα	8,2	7,9	8,1	8,9	11,1	11,1	13,9	16,3	16,1
Τουρκία	14,3	12,5	12,4	13,4	14,4	12,8	12,8	13,9	11,6
Κύπρος	3,5	4,4	5,5	6,0	6,4	7,4	8,4	9,5	9,4
Συρία	1,8	1,6	1,3	0,9	1,4	1,9	2,6	2,9	3,0
Λίβανος	7,5	8,6	5,7	4,3	5,2	5,2	4,9	5,7	3,2
Ισραήλ	6,8	6,7	8,8	8,4	8,5	9,0	8,7	9,5	9,3
Αίγυπτος	6,2	6,1	6,0	5,8	5,7	5,6	5,7	6,1	6,4
Λιβύη	1,9	2,0	1,9	1,7	1,6	2,2	1,9	1,7	1,8
Μάλτα	0,2	0,3	0,3	0,3	1,4	2,0	2,6	2,6	4,0
Τυνησία	14,3	14,3	14,6	16,1	12,7	13,3	13,1	13,2	12,9
Αλγερία	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1
Μαρόκο	18,7	17,1	15,2	14,9	14,5	12,4	11,5	12,3	11,8

Πίνακας 2: Παραγωγή ηλεκτρισμού από ΑΠΕ (πλην υδροηλεκτρικής) ως ποσοστό (%) της συνολικής παραγωγής ηλεκτρισμού [3].

Χώρα	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Πορτογαλία	9,7	13,1	17,2	20,2	22,7	24,2	30,2	31,2	30,8	30,3
Ισπανία	8,9	10,3	12,5	16,3	18,6	19,5	22,6	26,5	25,9	24,9
Γαλλία	1,1	1,5	1,8	2,4	2,7	3,5	4,3	4,6	5,1	6,1
Ιταλία	4,4	4,8	5,3	7,0	8,7	12,4	16,9	20,6	22,3	23,4
Σλοβενία	0,7	0,8	1,8	1,2	1,4	2,0	2,8	3,0	3,0	3,7
Κροατία	0,2	0,3	0,5	0,6	1,2	2,3	4,0	4,7	6,9	-
Βοσνία Ερζεγοβίνη	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-
Μαυροβούνιο	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-
Αλβανία	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-
Ελλάδα	3,0	3,2	3,9	4,6	5,3	7,0	9,5	14,0	15,3	17,6
Τουρκία	0,2	0,3	0,6	1,1	1,9	2,5	3,1	4,1	4,8	6,3
Κύπρος	0,0	0,1	0,3	0,6	1,4	3,6	5,5	7,6	7,3	-
Συρία	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-
Λίβανος	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-
Ισραήλ	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,5	0,7	0,9	1,5	2,1
Αίγυπτος	0,5	0,7	0,7	0,8	1,2	1,1	0,9	0,9	0,9	-
Λιβύη	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-
Μάλτα	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,5	1,1	1,6	3,3	-
Τυνησία	0,3	0,3	0,3	0,6	0,9	0,7	1,1	2,0	2,8	-
Αλγερία	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-
Μαρόκο	0,9	1,4	1,5	1,9	2,8	2,8	2,7	5,3	6,7	-



Εικόνα 2: Διάγραμμα εξέλιξης της παραγωγής ηλεκτρισμού από ΑΠΕ (πλην υδροηλεκτρικής) στις χώρες της Μεσογείου.

#### 4. Η ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΤΙΣ ΧΩΡΕΣ ΤΗΣ ΜΕΣΟΓΕΙΟΥ

Από τα διαθέσιμα στοιχεία για την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας στις χώρες της Μεσογείου, προκύπτει ότι τα συνολικά ποσά ενέργειας που αντλούνται μέσω φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι συγκρίσιμα προς τα αντίστοιχα που αντλούνται μέσω ηλιοθερμικών. Ωστόσο, οι διαφορές από χώρα σε

χώρα είναι ευδιάκριτες. Σε κάποιες χώρες υπερέχουν σημαντικά τα φωτοβολταϊκά (π.χ. Ισπανία, Τουρκία, Κύπρος) και σε άλλες τα ηλιοθερμικά (π.χ. Ιταλία, Γαλλία, Ελλάδα).

Στον Πίνακα 3 καταγράφεται η εξέλιξη των κατά κεφαλήν καταναλώσεων ηλιακής ενέργειας στις χώρες της Μεσογείου. Τα στοιχεία αφορούν τη δεκαετία από το 2006 μέχρι το 2015 και περιλαμβάνουν ενέργεια που έχει αντληθεί αθροιστικά από φωτοβολταϊκά και ηλιοθερμικά συστήματα. Η τάση, για τις χώρες που περιλαμβάνονται στον πίνακα, είναι σαφώς θετική. Από τον πίνακα, για την τελευταία χρονιά που διατίθενται επίσημα στοιχεία (2015), προκύπτει ότι η πρώτη χώρα σε κατά κεφαλήν κατανάλωση ηλιακής ενέργειας ετησίως στη Μεσόγειο είναι η Κύπρος (με 1081,98 kWh per capita), ακολουθούμενη από την Ισπανία (797,36 kWh per capita) και το Ισραήλ (615,42 kWh per capita).

Πίνακας 3: Ετήσια κατά κεφαλήν κατανάλωση ηλιακής ενέργειας σε χώρες της Μεσογείου (σε kWh/per capita) [4,5].

	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Πορτογαλία	26,6	30,6	37,1	53,6	72,9	92,0	111,6	126,4	145,9	166,8
Ισπανία	22,0	35,7	88,8	178,6	258,9	337,2	598,0	703,9	777,0	797,4
Γαλλία	6,3	7,8	10,0	13,5	21,8	46,1	78,4	90,7	109,7	131,4
Ιταλία	7,6	11,1	16,6	28,2	58,6	209,4	348,0	394,5	401,3	413,7
Σλοβενία	0,0	0,0	0,6	45,2	52,3	82,3	134,7	163,3	185,6	194,5
Κροατία	7,3	8,6	10,8	12,4	14,1	16,5	19,9	25,1	33,7	42,1
Βοσνία Ερζεγοβίνη	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Μαυροβούνιο	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,7
Αλβανία	8,5	23,2	23,8	24,1	26,9	48,1	47,3	47,7	49,8	49,9
Ελλάδα	115,4	168,4	182,5	195,6	205,9	246,1	346,3	529,2	551,1	569,5
Τουρκία	68,0	70,0	69,2	69,7	69,2	99,4	119,5	122,3	122,0	126,4
Κύπρος	678,4	822,5	843,4	849,3	870,3	882,2	895,8	937,5	1003,1	1082,0
Συρία	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Λίβανος	16,6	19,3	22,3	25,7	29,1	32,6	38,8	41,3	44,5	45,9
Ισραήλ	1001,1	1018,5	1448,0	1417,3	1535,0	1519,7	437,6	500,8	583,2	615,4
Αίγυπτος	0,0	0,0	0,0	0,0	2,2	2,3	2,5	2,5	2,6	2,6
Λιβύη	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Μάλτα	17,2	22,9	25,7	25,5	106,7	120,5	150,4	182,2	278,9	333,2
Τυνησία	0,0	0,0	0,0	0,0	28,8	33,1	37,9	42,7	48,2	53,2
Αλγερία	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,4
Μαρόκο	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2

Για τις χώρες της Βόρειας Αφρικής οι επιδόσεις στον τομέα της αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας είναι, γενικά, μέτριες και, πάντως, ασύμβατες προς το υψηλό δυναμικό που διαθέτουν - έχει υπολογιστεί ότι, τεχνικά, το δυναμικό αυτό αρκεί να καλύψει το σύνολο των ενεργειακών αναγκών του πλανήτη. Ωστόσο, είναι αξιοσημείωτο ότι κατά τα τελευταία χρόνια καταγράφονται σημαντικές προσπάθειες από τις χώρες αυτές για να καλύψουν τη διαφορά που τις χωρίζει από τις πιο προηγμένες στον τομέα εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας χώρες της βόρειας όχθης της Μεσογείου. Ως παράδειγμα, το Μαρόκο στα πλαίσια προγράμματος για την κατασκευή εγκαταστάσεων ισχύος 10 GW για την παραγωγή ηλεκτρισμού από ΑΠΕ μέχρι το 2020, έχει ξεκινήσει την κατασκευή του μεγαλύτερου ηλιακού πάρκου στον κόσμο, ισχύος 580 MW (Εικόνα 3) [6]. Ομοίως, η Αίγυπτος, στοχεύοντας στην κάλυψη μέχρι το 2022 του 20 % της ενέργειας παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος από ΑΠΕ, από τα οποία το 2,2 % θα προέρχεται από ηλιακή ενέργεια, σχεδιάζει την κατασκευή μονάδων εκμετάλλευσης ηλιακής ενέργειας ισχύος 3,5 GW με ορίζοντα ολοκλήρωσης το 2027 [7]. Ανάλογα μεγαλεπήβολα προγράμματα βρίσκονται σε στάδιο προγραμματισμού ή υλοποίησης στην Αλγερία (ισχύος 4,6 GW), την Τυνησία, τη Λιβύη αλλά και στη βόρεια όχθη της Μεσογείου (Ισπανία, Ιταλία κ.α.) από τα οποία υπολογίζεται ότι, εφόσον ολοκληρωθούν, θα μπορούσε να καλυφθεί μέχρι και το 35 % των ενεργειακών αναγκών της περιοχής. Τα προγράμματα αυτά είναι ενδεχόμενο ότι έχουν ήδη επηρεάσει τις συσχετίσεις στις επιδόσεις αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας μεταξύ των χωρών της Μεσογείου, κάτι το οποίο, εξ αιτίας της καθυστέρησης στη δημοσίευση των στατιστικών στοιχείων, θα γίνει φανερό σε μερικά χρόνια. Ωστόσο, η αυξανόμενη ανάπτυξη του τομέα εκμετάλλευσης των ΑΠΕ σε περιοχές της Μεσογείου συχνά έρχεται αντιμέτωπη με προβλήματα και προκλήσεις, όπως ελλείψεις ρυθμιστικών προτύπων, υποδομών κλπ [8].



*Εικόνα 3: Το ηλιακό πάρκο Noor στην περιοχή Ouarzazate του Μαρόκου που, όταν ολοκληρωθεί (σύμφωνα με τον προγραμματισμό, το 2018), η ισχύς του θα φτάνει τα 580 MW και θα είναι το μεγαλύτερο στον κόσμο.*

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η λεκάνη της Μεσογείου και οι χώρες που την περιβάλλουν αποτελούν περιοχή του πλανήτη με πολύ πλούσιο δυναμικό σε ΑΠΕ, κυρίως, σε ηλιακή ενέργεια. Το δυναμικό αυτό, με βάση τα διαθέσιμα στοιχεία, δεν αξιοποιείται ισομερώς σε όλες τις χώρες και περιοχές της Μεσογείου. Έτσι, οι χώρες που βρίσκονται στη βόρεια όχθη της είναι αυτές που φαίνεται ότι έχουν αναπτύξει περισσότερο τις κατάλληλες υποδομές και εγκαταστάσεις για την εντατικότερη αξιοποίησή του. Ωστόσο, υπάρχουν σαφείς διαφορές μεταξύ των στοιχείων που αποτυπώνουν τις επιδόσεις αυτών των χωρών στην εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας - χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι διαφορετικές τεχνολογίες (φωτοβολταϊκά, ηλιοθερμικά) που επικρατούν σε διαφορετικές χώρες. Αντίθετα, οι χώρες στην ανατολική και, κυρίως, στη νότια όχθη της Μεσογείου υστερούν σημαντικά σε αυτόν το τομέα. Η διαπίστωση αυτή έρχεται σε πλήρη αντίθεση προς το γεγονός ότι οι τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας είναι σαφώς υψηλότερες στη νότια όχθη της Μεσογείου. Ωστε, εκτός από τη διαθεσιμότητα των πόρων και άλλοι παράγοντες όπως, θεσμικοί, οικονομικοί, κοινωνικοί, τεχνολογικοί, υποδομών, ασκούν ισχυρή επίδραση στην αξιοποίησή τους.

Είναι ενθαρρυντικό ότι η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας στην περιοχή της Μεσογείου παρουσιάζει ανοδική τάση κατά τα τελευταία χρόνια. Η τάση αυτή είναι βέβαιο ότι θα υποστηριχτεί και από τα μεγάλα προγράμματα σχετικών έργων που την περίοδο αυτή βρίσκονται σε εξέλιξη σε πολλές χώρες της περιοχής, ιδιαίτερα σε χώρες που μέχρι τώρα φαίνεται να υστερούν στον τομέα αξιοποίησης των ΑΠΕ. Με τον τρόπο αυτό, ενισχύεται η επίτευξη των στόχων που έχουν τεθεί από διεθνείς οργανισμούς (και την Ε.Ε.) για αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και βιώσιμη ανάπτυξη μέσω της κάλυψης σημαντικού μέρους των αναγκών σε ενέργεια από ΑΠΕ.

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Global Solar Atlas, <http://globalsolaratlas.info/?c=39.225447,13.992186,5&s=54.815879,63.449113&m=sg:ghi&l=0>
- [2] Euro-Mediterranean Regional and Local Assembly (ARLEM), 2012, "Η προαγωγή των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας ως παράγοντας της από κοινού οικονομικής και κοινωνικής ανάπτυξης της περιοχής της Μεσογείου", <http://cor.europa.eu/en/activities/arlem/Documents/report-on-renewable-energies-2011/EL.pdf>

- [3] Knoema, World Development Indicators (WDI),  
[https://knoema.com/WBWDIGDF2017Sep/world-development-indicators-wdi?gclid=EAlalQobChMlnITq4Pu21wIVIgvTCh36aAD7EAAYASAAEglgB\\_D\\_BwE&accesskey=olmgapg](https://knoema.com/WBWDIGDF2017Sep/world-development-indicators-wdi?gclid=EAlalQobChMlnITq4Pu21wIVIgvTCh36aAD7EAAYASAAEglgB_D_BwE&accesskey=olmgapg)
- [4] Eurostat, Primary production of renewable energy by type,  
<http://ec.europa.eu/eurostat/tgm/table.do?tab=table&tableSelection=4&labeling=labels&footnotes=yes&layout=time,geo,cat&language=en&pcode=ten00081&plugin=1>
- [5] IEA, Atlas of Energy, Renewables, <http://energyatlas.iea.org/#!/tellmap/-1076250891>
- [6] <https://www.theguardian.com/global-development/2016/nov/17/cop22-host-morocco-lights-way-africa-renewable-energy-2020>
- [7] <https://www.export.gov/article?id=Egypt-Renewable-Energy>
- [8] <http://www.medaeconomicweek.org/the-mediterranean-solar-energy-as-a-source-of-sustainable-growth/>



## ΕΠΙΘΕΩΡΗΣΗ ΔΕΚΤΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΥ ΚΑΤΟΠΤΡΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΥΠΕΡΥΘΡΗΣ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑΣ

Π.Ν. Μπότσαρης<sup>1</sup>, Κ.Α. Λυμπερόπουλος<sup>1</sup>, Α. Πεχτελίδης<sup>1</sup>, Π. Γκιούρκα<sup>1</sup>,  
Π. Μπεκάκος<sup>1</sup>, Π. Πιστοφίδης<sup>1</sup>, Δ. Τσεμπερλίδου<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Πολυτεχνική Σχολή Τμήμα Μηχανικών  
Παραγωγής & Διοίκησης, Τ.Κ. 67100, Ξάνθη, email: [klympero@pme.duth.gr](mailto:klympero@pme.duth.gr)

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ανάγκη εκμετάλλευσης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) για την παραγωγή οποιασδήποτε μορφής ενέργεια αυξάνεται ραγδαία τα τελευταία χρόνια. Η χρήση της ηλιακής ενέργειας έχει φτάσει σε ένα αξιοσημείωτο επίπεδο καθώς η συνεχής έρευνα για μια εναλλακτική πηγή ενέργειας, λόγω της ολοένα και μεγαλύτερης έλλειψης ορυκτών καυσίμων, αποτελεί κινητήρια δύναμη. Τα παραβολικά ηλιακά κάτοπτρα (Parabolic trough concentrators - PTCs) αποτελούν ένα από τα πλέον διαδεδομένα εμπορικά συστήματα παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας. Αυτό οφείλεται εν' μέρει και στο γεγονός της δυνατότητας παραγωγής θερμικής ενέργειας από τον ήλιο σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών (έως 400°C), και έτσι, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μια ποικιλία εφαρμογών όπως λ.χ. από εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έως σε βιομηχανικά συστήματα παραγωγής ψύξης, ζεστού νερού ή/και ατμού. Η λειτουργικότητα και η διαθεσιμότητα τους ανά πάσα στιγμή, σε κάθε είδους εφαρμογή είναι καταλυτικής σημασίας. Παρά ταύτα οι παραβολικοί συλλέκτες αντιμετωπίζουν διάφορα τεχνικά προβλήματα που σχετίζονται κυρίως με την δομική ακεραιότητα και την επιθεώρηση κρίσιμων εξαρτημάτων τους, όπως π.χ. των δεκτών απορρόφησης τους. Η επιθεώρηση του σωλήνα απορρόφησης καθίσταται πολύ δύσκολη διότι καλύπτεται από μία επικάλυψη κεραμομετάλλου και τοποθετείται μέσα σε ένα γυάλινο περίβλημα κενού.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση των δυνατοτήτων επιθεώρησης των δεκτών απορρόφησης συγκεντρωτικών κατόπτρων στο πεδίο με τη βοήθεια της υπέρυθρης απεικόνισης (infrared (IR) thermal imaging) καθώς και η διερεύνηση και αποτίμηση της αποτελεσματικότητας της ως μεθόδου ελέγχου και ανάλυσης της λειτουργίας ενός ηλιοθερμικού πάρκου σε σύγκρισή της με τις υφιστάμενες συμβατικές μεθόδους. Στο πλαίσιο του θερμογραφικού ελέγχου της τρέχουσας εργασίας έγιναν μετρήσεις πεδίου αρχικά σε όλους τους δέκτες που εμπεριέχονται στα παραβολικά κάτοπτρα ενός ηλιακού θερμικού πάρκου που είναι εγκατεστημένο στον Νομό Ξάνθης, καθώς επίσης και στην είσοδο και έξοδο του θερμικού ελαίου, κάθε μίας από τις έξι σειρές των κατόπτρων. Τέλος, οι μετρήσεις αυτές αναλύθηκαν και συγκρίθηκαν με τις αναμενόμενες τιμές θερμοκρασίας λειτουργίας του πάρκου.

Οι μετρήσεις στους δέκτες απορρόφησης των κατόπτρων του ηλιακού πεδίου κατέδειξαν πως η θερμική απεικόνιση αποτελεί έναν πολλά υποσχόμενο ποιοτικό και γρήγορο τρόπο επιθεώρησης μη καταστροφικού τύπου αντίστοιχων διατάξεων.

**Λέξεις Κλειδιά:** Υπέρυθρη θερμογραφία, επιθεώρηση, συγκεντρωτικά παραβολικά κάτοπτρα, δέκτης, ηλιακή ενέργεια.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όπως σε κάθε τεχνολογικό σύστημα έτσι και σε ένα ενεργειακό πάρκο που προορίζεται για την παραγωγή ενέργειας στηριζόμενο σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) όπως λ.χ. ένα πάρκο παραβολικών ηλιακών κατόπτρων, εφαρμόζονται διάφορες τεχνικές και στρατηγικές συντήρησης και έλεγχου. Σκοπός των τεχνικών αυτών είναι η διατήρηση της λειτουργικότητας των διαφόρων συστημάτων και η διασφάλιση της λειτουργίας τους εντός των προβλεπόμενων σχεδιαστικών ορίων με τελικούς στόχους την αύξηση της αξιοπιστίας, της διαθεσιμότητας και τελικώς της απόδοσης του συστήματος. Περιοδικά πραγματοποιούνται διάφορες επιθεωρήσεις και έλεγχοι, προκειμένου να επαληθευτούν σημαντικές παράμετροι λειτουργίας, όπως, για παράδειγμα, το επίπεδο σκόνης που επικάθεται στην επιφάνεια ενός ανακλαστήρα, το επίπεδο ανάκλασης ενός καθρέφτη ή το επίπεδο κενού που δημιουργείται στο εσωτερικό του γυάλινου περιβλήματος ενός δέκτη. Τα τελευταία χρόνια, με την διαρκή εξέλιξη της τεχνολογίας, εμφανίστηκαν διάφορα εργαλεία/τεχνικές για την αξιολόγηση αυτών λειτουργικών παραμέτρων, βοηθώντας στην εφαρμογή βελτιωμένων και πιο οικονομικών τεχνικών συντήρησης και ελέγχου και μάλιστα σε τεχνολογικά συστήματα ευρείας κλίμακας. [1,2,3]

Προς την κατεύθυνση αυτή κινείται και η παρούσα μελέτη, στο πλαίσιο της οποίας με την χρήση της υπέρυθρης θερμογραφίας ελέγχεται το θερμοκρασιακό προφίλ των σωλήνων κενού που περιβάλλουν τους δέκτες των παραβολικών κατόπτρων ενός ηλιακού θερμικού πάρκου του ΔΠΘ που είναι εγκατεστημένο στον Δήμο Τοπείρου του Νομού Ξάνθης. Σημειώνεται ότι, η απώλεια θερμότητας του σωλήνα κενού που περιβάλλει τον δέκτη ενός συγκεντρωτικού κατόπτρου είναι ο υπ' αριθμόν ένα δείκτης μείωσης της απόδοσης του κατόπτρου, και κατά συνέπεια όλου του συστήματος [4,5]. Ένα σημαντικό αίτιο που μπορεί να οδηγήσει σε θερμικές απώλειες έναν δέκτη, είναι η μείωση του επιπέδου του κενού που σχηματίζεται στο εσωτερικό του γυάλινου περιβλήματος που περιβάλλει τον δέκτη του κατόπτρου. Η μείωση αυτή μπορεί να οφείλεται σε διάφορους λόγους όπως λ.χ. σε αστοχία της αντλίας κενού, σε διάρρηξη του γυάλινου περιβλήματος, κλπ. Αποτελέσματα των προαναφερομένων θερμικών απωλειών είναι ο σχηματισμός υδρογόνου στο εσωτερικό του σωλήνα ή η διάρρηξη τους από τους μεταλλικούς κόμβους στήριξης.

## 2. ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΠΑΡΚΟ ΤΟΠΕΙΡΟΥ

Το Υβριδικό Πάρκο στο οποίο πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις πεδίου βρίσκεται στον δήμο Τοπείρου στον Νομό Ξάνθης στην Περιφέρεια Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης. Αποτελεί έργο στρατηγικού χαρακτήρα το οποίο υλοποιήθηκε στο πλαίσιο του Προγράμματος Ευρωπαϊκής Εδαφικής Συνεργασίας Ελλάδα-Βουλγαρία 2007-2013 με τίτλο: «Κοινά πρότυπα αξιοποίησης χαμηλών γεωθερμικών πεδίων για την προώθηση καινοτόμων ενεργειακά επενδύσεων στην διασυνοριακή περιοχή - πιλοτική εφαρμογή», "Fostering the use of low temperature geothermal sources through the development of operational exploitation guidelines and green energy solutions of enterprising" με διακριτικό τίτλο "ENERGEIA".

Σκοπός της κατασκευής του πιλοτικού έργου «ENERGEIA» είναι η παραγωγή ηλεκτρικής, αλλά κυρίως θερμικής ενέργειας με χρήση ανανεώσιμων πηγών όπως ο ήλιος και η γεωθερμία. Πρόκειται δηλαδή για ένα υβριδικό πάρκο, στο οποίο συνδυάζονται η εκμετάλλευση της θερμικής ενέργειας που προέρχεται από ένα γεωθερμικό πεδίο χαμηλής ενθαλπίας (θερμοκρασία γεωθερμικού ρευστού <90°C), καθώς επίσης και της θερμικής ενέργειας που προέρχεται από ένα ηλιακό θερμικό πεδίο αποτελούμενο από γραμμικούς παραβολικούς συλλέκτες. Το ρευστό του γεωθερμικού πεδίου που αντλείται σε συγκεκριμένη θερμοκρασία (≈60°C), μέσω εναλλάκτη, αποδίδει την θερμότητά του, όταν οι θερμοκρασιακές συνθήκες του επιτρέπουν π.χ. πρωινές ώρες, στο μέσο μεταφοράς θερμότητας (HeatTransferFluid - HTF) του ηλιακού θερμικού πεδίου, επισπεύδοντας έτσι την επίτευξη της θερμοκρασίας κατωφλίου για την έναρξη λειτουργίας του πάρκου. Στη συνέχεια το HTF διέρχόμενο μέσα από τους συλλέκτες του ηλιακού θερμικού πεδίου αυξάνει περαιτέρω την θερμοκρασία του (>120 °C), προσλαμβάνοντας επιπλέον ποσά θερμότητας από τους συλλέκτες. Αυτή η θερμική ενέργεια στη συνέχεια μεταφέρεται μέσω ενός άλλου εναλλάκτη θερμότητας κατά ένα μέρος στο οργανικό εργαζόμενο μέσο της μηχανής οργανικού κύκλου Rankine (ORC) για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και την κάλυψη ενός μέρους των εσωτερικών ηλεκτρικών φορτίων του πάρκου, ενώ το υπόλοιπο διοχετεύεται για την κάλυψη

των ενεργειακών (θερμικών) φορτίων παρακείμενου κτιρίου που βρίσκεται σε απόσταση 850m από το πάρκο, των θερμοκηπίων και του κομποστοποιητή.

Συνοπτικά, το πάρκο αποτελείται από τα ακόλουθα τμήματα:

- Σύστημα κυκλοφορίας γεωθερμικού ρευστού – Δίκτυο τηλεθέρμανσης
- Ηλιακό θερμικό πεδίο συγκεντρωτικών κατόπτρων
- Γεννήτρια ORC
- Σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (Thermal Energy Storage – TES)
- Κομποστοποιητής για την πιλοτική παραγωγή βιοαερίου
- Θερμοκήπια
- Οικόσκιο με συστήματα ελέγχου και καταγραφής

Στο Σχήμα 1 φαίνεται μία αεροφωτογραφία του πιλοτικού έργου όπου ξεχωρίζουν τα κύρια μέρη του.

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το συνδυασμό ενεργειακών πηγών και ιδιαίτερα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ), αποτελεί μια ταχύτατα εξελισσόμενη ερευνητική περιοχή. Κύριο στόχο της υβριδοποίησης των ΑΠΕ αποτελεί η συμπληρωματική λειτουργία των πρωτογενών πηγών ενέργειας για την επίτευξη της αδιάλειπτης λειτουργίας του εκάστοτε σταθμού παραγωγής ενέργειας.

Το πιλοτικό έργο αποσκοπεί:

- Αφενός στη μελέτη της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με την χρήση μηχανής οργανικού κύκλου Rankine, η οποία θα τροφοδοτείται από την συνδυασμένη λειτουργία ηλιοθερμικού και γεωθερμικού πεδίου χαμηλής ενθαλπίας,
- Αφετέρου στη δυνατότητα ταυτόχρονης εκμετάλλευσης της παραγόμενης θερμικής ενέργειας μέσω της συνδυασμένης λειτουργίας (υβριδοποίησης) του ηλιακού και γεωθερμικού συστήματος για την κάλυψη θερμικών φορτίων.



Σχήμα 1: Άποψη του υβριδικού πάρκου «ENERGEIA»

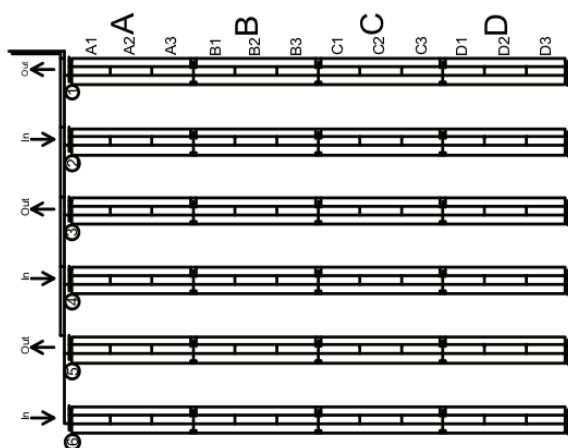
### 3. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΕΔΙΟΥ

Σήμερα στις ηλιακές θερμικές εγκαταστάσεις υπάρχουν διαφορετικού τύπου εξοπλισμοί και μετρητικά όργανα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την μέτρηση και τον έλεγχο της θερμοκρασίας, εν' προκειμένω της υαλίνης επιφάνειας του σωλήνα κενού που περιβάλλει τον δέκτη, όπως λ.χ. θερμοζεύγη, PT100, θερμομέτρα υπέρυθρης ακτινοβολίας, θερμοκάμερες κλπ. Όμως κάθε ένα από τα προαναφερόμενα μετρητικά όργανα παρουσιάζει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που καθιστούν την χρήση του λιγότερο ή περισσότερο επιτυχή. Αυτό όμως που φαίνεται να κυριαρχεί στις μέρες μας είναι η ανάγκη μιας γρήγορης, «ποιοτικής»

αποτύπωσης του θερμοκρασιακού προφίλ ενός ελεγχόμενου συστήματος και μάλιστα σε μεγάλης κλίμακας ελέγχους (Wide Range Inspections). Μια τέτοια τύπου «ποιοτική» αποτύπωση του θερμοκρασιακού προφίλ ενός επιθεωρούμενου εξαρτήματος είναι σε θέση να επιτελέσει μια θερμοκάμερα. Εάν τα ευρήματα των «ποιοτικών» αυτών αποτυπώσεων είναι ενθαρρυντικά, συνήθως οι μετρήσεις αυτές ακολουθούνται από άλλες ακριβέστερες και πιο συμβατικές τεχνικές όπως π.χ. μετρήσεις θερμοκρασίας με θερμομέτρα εμβάπτισης τύπου θερμοζεύγους, αλλά περισσότερο χρονοβόρες.

Για τη μελέτη περίπτωσης στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, σε πρώτο στάδιο, επιθεωρήθηκαν οι γυάλινοι σωλήνες κενού που περιβάλουν τους δέκτες όλων των σειρών παραβολικών κατόπτρων του πάρκου με τη χρήση μιας θερμοκάμερας μοντέλου FLIR τύπου E50. Η λήψη των θερμογραφίσεων έγινε τους μήνες Νοέμβριο και Δεκέμβριο του 2016.

Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται η κάτοψη του ηλιακού πεδίου του πάρκου. Λόγω του μήκους κάθε συλλέκτη (34m) κάθε μία από τις έξι σειρές κατόπτρων χωρίστηκε σε τέσσερα τμήματα A,B,C και D. Επιπλέον, καθένα από αυτά τα τμήματα χωρίστηκε σε τρία υποτμήματα A1,A2,A3 κλπ. Δηλαδή, κάθε σειρά χωρίστηκε συνολικά σε 12 επιμέρους τμήματα έτσι ώστε να υπάρξει καταγραφή όλου του μήκους των σωλήνων κενού αλλά και δυνατότητα σύγκρισης των θερμοκρασιών κάθε κομματιού. Συνολικά σε αυτό το σημείο έγιναν 72 θερμογραφίες στα επιμέρους τμήματα κάθε σειράς κατόπτρου όπως εξηγήθηκε προηγουμένως. Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται ενδεικτικά η θερμογράφιση που πραγματοποιήθηκε σε ένα μέρος του σωλήνα/δέκτη και συγκεκριμένα του τμήματος D2 που ανήκει στην τρίτη σειρά συλλεκτών του ηλιακού πεδίου του πάρκου.



Σχήμα 2: Κάτοψη ηλιακού πεδίου

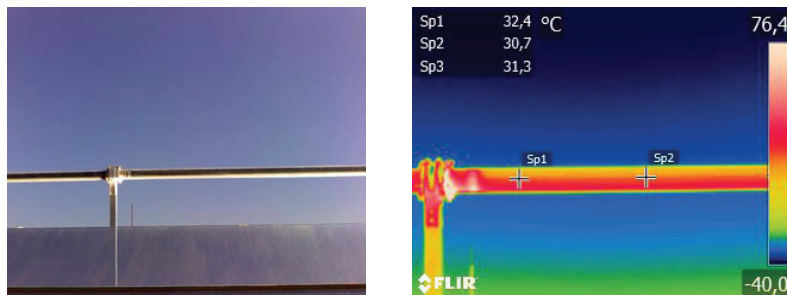
Η καταγραφή των καιρικών συνθηκών που επικράτησε κατά τη διάρκεια των θερμογραφίσεων έγινε αρχικά με δεδομένα από τοπικό μετεωρολογικό σταθμό και στη συνέχεια με επιβεβαίωση των συνθηκών από το σύστημα εποπτικού ελέγχου και συλλογής δεδομένων (SCADA) του υβριδικού πάρκου, το οποίο είναι κατάλληλο για την παροχή πληροφοριών κάθε χρονική στιγμή της μέρας.

Έτσι, οι καταγεγραμμένες περιβαλλοντικές συνθήκες (μέσες τιμές) που επικρατούσαν την στιγμή μιας τυπικής θερμογράφισης που παρουσιάζεται στην συνέχεια ήταν, θερμοκρασία αέρα 15 °C, σχετική υγρασία 58%, ταχύτητα ανέμου 7,8 km/hr, ενώ η ακτινοβολία ήταν στα 754 W/ m<sup>2</sup>. Όσον αφορά τις παραμέτρους θερμογράφισης έχουν ως εξής:

- Αντιστάθμιση της Ατμόσφαιρας ACV = 1,00

- Αντιστάθμιση του Φόντου RTC = 15 °C
- Συντελεστής Ικανότητας Εκπομπής  $\epsilon = 0.89$

Τέλος, η απόσταση ανάμεσα στην θερμοκάμερα και τον σωλήνα/δέκτη καθορίστηκε στα 3m και διατηρήθηκε σταθερή σε όλο τον κύκλο των μετρήσεων.



Σχήμα 3: Θερμογράφηση τμήματος σωλήνα δέκτη

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση κάθε υπέρυθρης θερμογράφησης, είναι το FLIR Tools [6]. Κύριο μέρος της ανάλυσης αποτέλεσε ο έλεγχος για πιθανές αστοχίες ή βλάβες στα τμήματα του σωλήνα/δέκτη αλλά και η καταγραφή της θερμοκρασίας κάθε τμήματος που επιθεωρήθηκε.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν συνοψίζονται στον Πίνακα 1. Οι γραμμές αποτελούν τις 6 σειρές κατόπτρων του ηλιακού πεδίου ενώ οι στήλες τα τέσσερα τμήματα στα οποία έγινε ο καταμερισμός των κατόπτρων με σκοπό την καλύτερη και πιο λεπτομερή ανάλυση τους, σύμφωνα και με το Σχήμα 2. Όπως αναφέρθηκε, κάθε σειρά δέκτη χωρίστηκε σε 4 τμήματα A,B,C,D τα οποία με την σειρά τους χωρίστηκαν σε 3 ακόμα μέρη A1,A2,A3 κλπ. για μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα της θερμογράφησης. Έτσι λοιπόν, κάθε κελί αποτελεί την μέση τιμή των τριών μερών που διαχωρίστηκε το κάθε τμήμα δέκτη για το σκοπό της θερμογράφησης (πχ. το αποτέλεσμα που παρουσιάζεται στο κελί A1 είναι η μέση τιμή των τριών μετρήσεων στα σημεία A1,A2,A3 του δέκτη). Τέλος, η γραμμή και η στήλη Μέση Τιμή, αναφέρονται στη μέση τιμή του αθροίσματος κάθε στήλης και κάθε γραμμής του πίνακα αντίστοιχα. Δίπλα από τον Πίνακα 1 παρουσιάζεται ο χρωματικός κώδικας κατάταξης του γυάλινου περιβλήματος του δέκτη, που δημιουργήθηκε αναλόγως της κατάστασης του με βάση το μετρούμενο θερμοκρασιακό εύρος του.

Με την θερμογράφηση απεικονίζεται η επικρατούσα θερμοκρασία στην γυάλινη επιφάνεια του σωλήνα που περιβάλλει τον δέκτη. Η θερμοκρασία είναι ανάλογη των θερμικών απωλειών του θερμογραφούμενου δέκτη. Έτσι ένας "καλός" δέκτης, δηλ. ένας σωλήνας πλήρης κενού, παρουσιάζει ένα θερμοκρασιακό εύρος από 26 έως 47 °C σύμφωνα με την διεθνή βιβλιογραφία [2,4,7]. Αντίστοιχα, στο σωλήνα που έχει απολέσει το κενό του, το θερμοκρασιακό εύρος φτάνει στους 57 °C ενώ στον γυμνό δέκτη η θερμοκρασία μπορεί να φτάσει και στους 181 °C.

Η κατάσταση ενός δέκτη, βάσει των θερμικών του απωλειών, με βάση την προηγούμενη ανάλυση χωρίστηκαν σε τρεις (3) κατηγορίες χρωματικού κώδικα ως ακολούθως. Στον Πίνακα 1 με πράσινο χρώμα παρουσιάζονται οι δέκτες που είναι ανάμεσα στις θερμοκρασίες 26-47 °C και μπορούν να χαρακτηριστούν ως «καλοί», με πορτοκαλί χρώμα αυτοί που έχουν θερμοκρασίες 48-57 °C και μπορούν να χαρακτηριστούν ως «κανονικοί», ενώ με κόκκινο αυτοί με θερμοκρασία άνω των 57 °C και χαρακτηρίζονται ως «όχι καλοί» και είναι αυτοί που κατά πάσα πιθανότητα έχουν κάποιου είδους βλάβη και χρειάζονται περαιτέρω έλεγχο. Όπως φαίνεται και στον πίνακα 1, οι δέκτες του ηλιοθερμικού πεδίου είναι σε καλή κατάσταση, διαπίστωση η οποία αιτιολογείται από το γεγονός ότι το πάρκο ξεκίνησε να λειτουργεί τον Οκτώβριο του 2016, παρόλο που παρουσιάζουν μικρές θερμοκρασιακές διακυμάνσεις μεταξύ τους, κάτι το οποίο μπορεί να προέρχεται από διάφορες αιτίες όπως λ.χ. του τρόπου λήψης της θερμογράφησης, της γωνίας λήψης, των καιρικών συνθηκών κλπ.

Πίνακας 1: Θερμοκρασίες στην επιφάνεια του γυάλινου περιβλήματος του δέκτη

Τμήμα Σειρά	A Θερμ. °C	B Θερμ. °C	C Θερμ. °C	D Θερμ. °C	Μέση Τιμή			
1	34,4	34,4	34,4	34,4	34,4			
2	36,5	33,3	36,3	31,4	34,4			
3	28,9	34,1	33,1	31,5	31,9			
4	34,8	33,5	35,0	34,3	34,4			
5	36,1	33,3	36,8	39,5	36,4			
6	33,3	39,4	39,7	37,6	37,5			
Μέση Τιμή	34,0	34,7	35,9	34,8	<table border="1"> <tr> <td>&lt;47 °C</td> </tr> <tr> <td>47-57 °C</td> </tr> <tr> <td>57 °C &lt;</td> </tr> </table>	<47 °C	47-57 °C	57 °C <
<47 °C								
47-57 °C								
57 °C <								

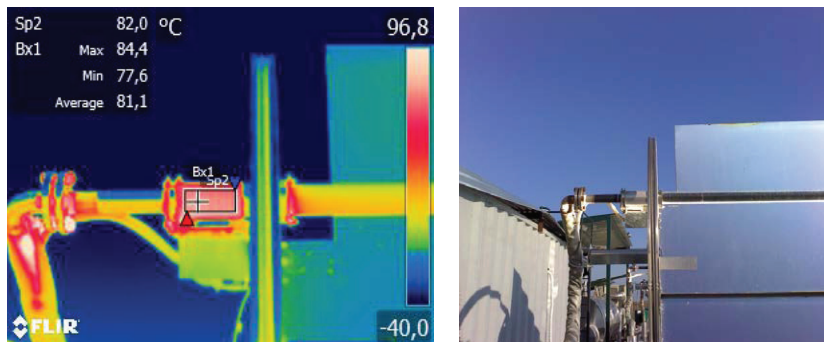
Η δεύτερη φάση των θερμογραφίσεων πραγματοποιήθηκε επίσης στο ηλιακό πεδίο παραβολικών κατόπτρων του πάρκου. Όμως, στην φάση αυτή οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν για την ανάλυση της θερμοκρασίας του θερμικού ελαίου κάθε σειράς κατόπτρων σε διαφορετικές χρονικές στιγμές κατά τη διάρκεια της μέρας, καθώς το πάρκο βρισκόταν σε κατάσταση λειτουργίας. Σε αυτή τη φάση, οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν επίσης τους μήνες Νοέμβριο και Δεκέμβριο του 2016. Στόχος αυτής της φάσης των μετρήσεων είναι η σύγκριση των θερμοκρασιακών αποτελεσμάτων των θερμικών εικόνων με τα θερμοκρασιακά δεδομένα που παρέχει το σύστημα εποπτικού ελέγχου και συλλογής δεδομένων (SCADA) του υβριδικού πάρκου μέσω των αισθητήρων θερμότητας και ο επακόλουθος έλεγχος της αξιοπιστίας τους.

Για την επίτευξη των μετρήσεων, κάθε σειρά παραβολικών κατόπτρων αποτέλεσε ένα σημείο μετρήσεων με αριθμό 1,2,3,4,5 και 6 αντίστοιχα, (Σχήμα 2), ενώ ανά δύο αποτελούν έναν βρόγχο μεταξύ τους από όπου το θερμικό έλαιο εισέρχεται «κρύο» (έχοντας αποδώσει την θερμική του ενέργεια στο TES) και εξέρχεται «θερμό» (έχοντας αποκτήσει θερμική ενέργεια μέσω της κυκλοφορίας του στο σωλήνα/δέκτη). Έτσι λοιπόν, στο Σχήμα 2 οι σειρές 2,4 και 6 αφορούν μετρήσεις εισόδου του «κρύου» ελαίου στο ηλιακό πεδίο και οι σειρές 1,3 και 5 μετρήσεις εξόδου του «θερμού» ελαίου που οδηγείται προς το TES για να αποδώσει την θερμική του ενέργεια και έπειτα να επιστρέψει ξανά στο ηλιακό πεδίο. Όλες οι μετρήσεις έγιναν ξεκινώντας από την σειρά 1 (σημείο 1) καταλήγοντας στη σειρά 6 (σημείο 6) με αντιστροφολογική φορά. Κάθε κύκλος μετρήσεων επαναλαμβάνονταν οκτώ (8) φορές προκειμένου να αξιολογηθούν οι λαμβανόμενες μετρήσεις και να αποκλειστεί το τυχαίο σφάλμα. Η χρονική διαφορά μεταξύ των κύκλων μέτρησης ήταν 30 λεπτά.

Στο Σχήμα 4 παρουσιάζεται ενδεικτικά η θερμογράφιση μιας τυπικής ημέρας που πραγματοποιήθηκε σε ένα σημείο από τα 6 που προαναφέρθηκαν (Σχήμα 2) και συγκεκριμένα στο σημείο 6 που αφορά τη χρονική στιγμή που το ρευστό εισέρχεται στην 6<sup>η</sup> σειρά.

Στη συνέχεια τα δεδομένα συγκρίνονται με τις αντίστοιχες τιμές θερμοκρασίας του θερμικού ελαίου από το σύστημα εποπτικού ελέγχου και συλλογής δεδομένων (SCADA) του υβριδικού πάρκου για την ίδια χρονική περίοδο. Αυτά τα δεδομένα προέρχονται από δυο αισθητήρες θερμοκρασίας που είναι τοποθετημένοι (εμβαπτυσμένοι) στο δίκτυο. Ο πρώτος αισθητήρας μετράει την θερμοκρασία του θερμικού ελαίου κατά την έξοδο του από το ηλιακό πεδίο, καθώς μεταφέρει την θερμική ενέργεια που παρέλαβε προς το δοχείο αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (TES) «PM HOT TEMPERATURE» (Σχήμα 6). Ο δεύτερος μετρά την θερμοκρασία

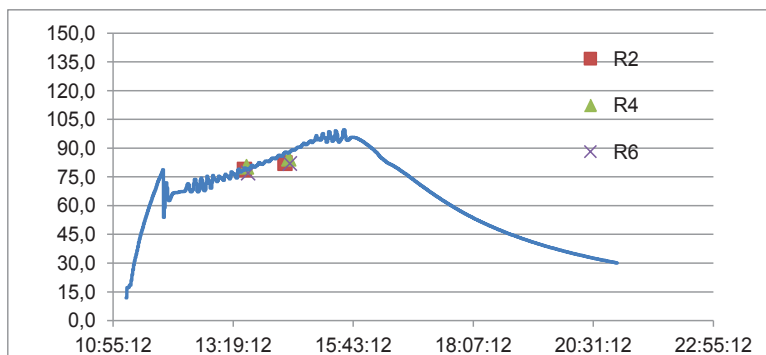
του ελαίου κατά την έξοδο του από το TES, όπου έχει αφήσει την θερμική του ενέργεια, και είναι έτοιμο να εισέλθει εκ νέου στο ηλιακό πεδίο, «PM COLD TEMPERATURE» (Σχήμα 5). Σκοπός αυτής της διαδικασίας είναι η σύγκριση των θερμοκρασιών που προκύπτουν από τα δεδομένα του πάρκου και των θερμοκρασιών που προκύπτουν από τις θερμικές εικόνες την ίδια χρονική στιγμή. Έτσι, διερευνάται εάν ο διενεργούμενος έλεγχος της κατάστασης του γυάλινου περιβλήματος του δέκτη ενός κατόπτρου με χρήση θερμογραφικής κάμερας με την θερμοκρασία του θερμικού ελαίου που ρέει στο εσωτερικού του δικτύου των σωληνώσεων διασύνδεσης των κατόπτρων, κατά την είσοδο και έξοδο του στους βρόγχους των παραβολικών κατόπτρων, αποτελεί έναν αξιόπιστο δείκτη "ποιοτικής" επιθεώρησης που χρίζει περαιτέρω διερεύνησης



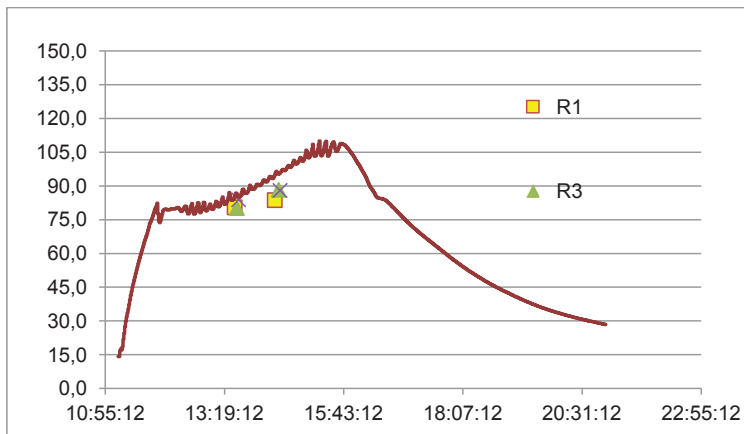
Σχήμα 4: Θερμογράφιση τμήματος εισόδου θερμικού ελαίου στο παραβολικό κάτοπτρο

Όπως φαίνεται από τα Σχήματα 5 και 6 των καμπυλών Θερμοκρασίας – Χρόνου σε όλες τις περιπτώσεις, ανεξαρτήτως βρόγχου ή σειράς από το οποίο προέρχεται ή στο οποίο κατευθύνεται το θερμικό έλαιο υπάρχουν διαφοροποιήσεις ανάμεσα στις θερμοκρασίες των δεδομένων που προήλθαν από τους αισθητήρες του υβριδικού πάρκου και από αυτές που προήλθαν από τις μετρήσεις με τις θερμικές εικόνες. Αυτές οι αποκλίσεις, όπως φαίνεται από τις καμπύλες και τα σημεία των μετρήσεων μεταβάλλονται σε ένα πεδίο τιμών από 2 έως και 25 °C. Οι αποκλίσεις αυτές, εκτός του ότι χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης και διεξαγωγής μεγαλύτερου αριθμού θερμογραφήσεων σε διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες, οφείλονται εν' μέρει και:

- 1) στην διαφορετική αρχή μέτρησης μεταξύ των διαλαμβανομένων τιμών μεταξύ θερμοκάμερας και αισθητήρων πεδίου
- 2) στις επικρατούσες πειραματικές συνθήκες π.χ. σημείο λήψης θερμογράφισης, απόσταση, αρχική βαθμονόμηση, γωνία λήψης θερμογράφισης κ.λ.π.



Σχήμα 5: Συγκεντρωτική καμπύλη δεδομένων - μετρήσεων, Pm Cold Temperature, όπου R αριθμός θερμογραφούμενης σειράς κατόπτρων



Σχήμα 6: Συγκεντρωτική καμπύλη δεδομένων - μετρήσεων, Pm Hot Temperature, όπου R αριθμός θερμογραφούμενης σειράς κατόπτρων

Οι παράγοντες αυτοί αν και συναντώνται στη διεθνή βιβλιογραφία [2,3], εντούτοις σημειώνεται ότι η επιθεώρηση των γυάλινων σωλήνων του δέκτη ενός παραβολικού κατόπτρου χρησιμοποιώντας υπέρυθη θερμογραφία μπορεί να δώσει μια γρήγορη "ποιοτική" εικόνα της γενικής κατάστασης ενός ηλιακού θερμικού πεδίου, ιδιαίτερα τον εντοπισμό κάποιας περιοχής υπερθέρμανσης σε συστήματα μεγάλης κλίμακας [3,5].

Επίσης, κατά την διάρκεια των μετρήσεων στο πεδίο επιπλέον εστίες προβλημάτων οι οποίες εντοπίστηκαν και χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης είναι: α) Ο μηχανισμός μετακίνησης της κάμερας προκειμένου να καλυφθεί όλη η έκταση του ηλιακού πεδίου, με αποτέλεσμα την πιθανή αλλοίωση των διαλαμβανόμενων μετρήσεων, β) η γήρανση της κεραμομεταλλουργικής επίστρωσης του δέκτη με τον χρόνο με την επακόλουθη επίδραση στην ανακλαστική επιφάνεια του και στους συντελεστές απορροφητικότητας και ικανότητας εκπομπής σε διάφορα μέρη του ηλιακού πεδίου, δεδομένα τα οποία είναι δύσκολο να εντοπιστούν και να ρυθμιστούν από τον χειριστή της κάμερας.

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η επιθεώρηση ενός συστήματος παραβολικών κατόπτρων ενός ηλιοθερμικού πάρκου με την βοήθεια της υπέρυθρης απεικόνισης (infrared (IR) thermal imaging) και συγκεκριμένα η διερεύνηση και αποτίμηση της αποτελεσματικότητας της υπέρυθρης θερμογραφίας ως μεθόδου αξιολόγησης της λειτουργικής κατάστασης των γυάλινων σωλήνων κενού που περιβάλλουν τον δέκτη ενός συγκεντρωτικού παραβολικού κατόπτρου.

Για τον σκοπό αυτόν σε πρώτη φάση θερμογραφήθηκαν οι γυάλινοι σωλήνες/δέκτες των παραβολικών κατόπτρων, για τον εντοπισμό κάποιας πιθανής αστοχίας, και στην συνέχεια και σε δεύτερη φάση οι θερμογραφίες αυτές συγκρίθηκαν με τις διαλαμβανόμενες τιμές θερμοκρασιών στις εισόδους και στις εξόδους του θερμικού ελαίου στο βρόχους του ηλιακού πεδίου, που παρείχαν ενσωματωμένοι συμβατικοί αισθητήρες μέτρησης θερμοκρασιών, προκειμένου να ελεγχθεί η αξιοπιστία της προτεινόμενης μεθόδου.

Η θερμογραφική επιθεώρηση που έγινε στην περιοχή του σωλήνα/δέκτη των κατόπτρων δεν έδειξε κάποια βλάβη ή αστοχία. Αυτό σημαίνει πως όλοι οι δέκτες του υβριδικού πάρκου λειτουργούν κανονικά και δεν φέρουν κάποιο πρόβλημα που να εμποδίζει την παραγωγή θερμικής ενέργειας, αναμένωμενο αποτέλεσμα αφού το πάρκο ξεκίνησε την λειτουργία του τον Οκτώβριο του 2016. Ωστόσο, στο πλαίσιο της έρευνας, η κατηγοριοποίηση της λειτουργικής κατάστασης των δεκτών πραγματοποιήθηκε με την χρήση χρωματικού κώδικα, στοιχείο που επιτρέπει στην παρούσα ερευνητική ομάδα να συνεχίσει περαιτέρω της έρευνα

της για την δυνατότητα αξιοποίησης τεχνικών/συστημάτων επεξεργασίας εικόνας για την αυτόματη εξαγωγή συμπερασμάτων για την λειτουργική κατάσταση των δεκτών.

Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν από συμβατικά όργανα μέτρησης θερμοκρασίας στις εισόδους και εξόδους στο δίκτυο σωληνώσεων του θερμικού ελαίου των κατόπτρων του ηλιακού πεδίου κατέδειξε πως η θερμική απεικόνιση αποτελεί έναν εξαιρετικό και γρήγορο τρόπο "ποιοτικού" (μη καταστροφικού) ελέγχου εξοπλισμού που βρίσκεται σε λειτουργία πχ. θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την πιθανή ανίχνευση κατεστραμμένης μόνωσης και την απώλεια θερμότητας σε ορισμένα σημεία του ηλιακού πεδίου, καθώς επίσης για την ανίχνευση διαρροών, αλλά και την όποια σημαντική θερμική διακύμανση στις σωληνώσεις των κατόπτρων που μπορεί να υποδεικνύει την παρουσία ενός ενδεχόμενου δομικού προβλήματος, με συγκεκριμένους όμως περιορισμούς.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Τσανάκας, Ι.Α., «Προηγμένες τεχνολογίες διάγνωσης-πρόγνωσης βλαβών σε μηχανολογικές κατασκευές με χρήση εποπτικών μεθόδων: περίπτωση υπέρυθρη θερμογραφίας», Διδακτορική Διατριβή, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Τομέας Υλικών Διεργασιών και Μηχανολογίας, Ξάνθη, Φεβρουάριος 2013.
- [2] A. García de Jalóna, D. Péreza, P. Benitoa, F. Zaverskya, «Inspection receiver tubes device for CSP plants», 2015
- [3] Mayorkinos Papaelias, Liang Cheng, Maria Kogia, Abbas Mohimi, Vassilios Kappatos, Cem Selcuk, Louis Constantinou, Carlos Quiterio Gomez Munoz, Fausto Pedro Garcia Marquez, Tat-Hean Gan, «Inspection and Structural Health Monitoring techniques for Concentrated Solar Power plants», August 2015
- [4] M. Yaghoubi, F. Ahmadi, and M. Bandehee, «Analysis of Heat Losses of Absorber Tubes of Parabolic through Collector of Shiraz (Iran) Solar Power Plant», January 2013
- [5] H. Price, R. Forristall, T. Wendelin, and A. Lewandowski, «Field Survey of Parabolic Trough Receiver Thermal Performance», National Renewable Energy Laboratory, July 8–13, 2006
- [6] FLIR Systems, Inc., «User's manual FLIR Tools/Tools+», <http://www.flir.com>
- [7] «Collector/Receiver Characterization», National Renewable Energy Laboratory



## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΗΛΙΑΚΩΝ ΘΕΡΜΑΝΤΗΡΩΝ ΝΕΡΟΥ ΕΦΟΔΙΑΣΜΕΝΩΝ ΜΕ ΑΝΤΛΙΑ ΚΑΙ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

Γ. Παπαθανασόπουλος<sup>1</sup>, Ι. Γ. Καούρης<sup>1</sup>, Μ. Σουλιώτης<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Τμήμα Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών,  
26504 Ρίο Πατρών.

<sup>2</sup> Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος / <sup>3</sup> Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,  
Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας

e-mail : [georgepa@mech.upatras.gr](mailto:georgepa@mech.upatras.gr) , [caouris@upatras.gr](mailto:caouris@upatras.gr) , [msouliotis@uowm.gr](mailto:msouliotis@uowm.gr)

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπό της συγκεκριμένης εργασίας, αποτελεί η μελέτη δύο ίδιων ηλιακών θερμοσιφωνικών συστημάτων, που λειτουργούν με ηλιακούς συλλέκτες κενού. Στο ένα σύστημα τοποθετήθηκε αντλία που τροφοδοτείται με ρεύμα από μικρό φωτοβολταϊκό πλαίσιο (Φ/Β), προκειμένου να εξεταστεί η λειτουργική συμπεριφορά τους, σε σύγκριση με το απλό θερμοσιφωνικό σύστημα.

Η διερεύνηση έγινε με βάση τα πρότυπα ISO 9459-2 και EN 12976-2. Προσδιορίστηκε, για κάθε ημέρα δοκιμών, ο βαθμός απόδοσης των συστημάτων και τελικά ο μέσος όρος τους.

Τα αποτελέσματα έδειξαν: μέσο συντελεστή απόδοσης  $\eta_{av} = 40,4\%$  - μέγιστη θερμοκρασία ζεστού νερού  $T_{max} = 54,45\text{ }^\circ\text{C}$  για το σύστημα με αντλία και  $\eta_{av} = 39,8\%$  -  $T_{max} = 53,76\text{ }^\circ\text{C}$  για το σύστημα χωρίς αντλία. Επιπρόσθετα, παρατίθενται αποτελέσματα από δοκιμές συστήματος ηλιακού θερμαντήρα με κατακόρυφο δοχείο και κυκλοφορητή οδηγούμενο από μικρό Φ/Β πλαίσιο.

Από τα αποτελέσματα συνάγεται, ότι το σύστημα με αντλία συμπεριφέρεται το ίδιο και ελαφρώς καλύτερα απ' ότι το απλό θερμοσιφωνικό. Έτσι, η τοποθέτηση αντλίας και μικρού Φ/Β μπορεί να εφαρμοστεί σε ηλιακά συστήματα με κατακόρυφα δοχεία, τοποθετημένα – ενσωματωμένα πίσω από τους ηλιακούς συλλέκτες, για καλύτερη αισθητική ένταξη και μεγαλύτερη θερμοκρασιακή στρωμάτωση.

**Λέξεις Κλειδιά:** *Ηλιακοί Θερμαντήρες Νερού, Φωτοβολταϊκές αντλίες, ηλιακοί θερμοσίφωνες.*

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα πιο γνωστά οικιακά ηλιακά συστήματα, για την παραγωγή ζεστού νερού, είναι τα λεγόμενα θερμοσιφωνικά συστήματα (ηλιακοί θερμοσίφωνες). Τα πλέον διαδεδομένα ανήκουν στη κατηγορία «κλειστού κυκλώματος», στα οποία το υγρό του συλλέκτη είναι διαφορετικό από το υγρό (νερό) της αποθήκης θερμότητας (δοχείο) και η μετάδοση θερμότητας επιτυγχάνεται μέσω εναλλάκτη θερμότητας, που βρίσκεται είτε στο εσωτερικό του δοχείου αποθήκευσης (έχοντας την μορφή αυλών ή σερπαντίνας) ή τοποθετείται γύρω από αυτό με τη μορφή λεπτού στρώματος, καλούμενου «μανδύα», ώστε να περιβρέχει εξωτερικά μεγάλο τμήμα του δοχείου. Κατά κανόνα χρησιμοποιείται εναλλάκτης μανδύα, διότι κατασκευαστικά αποτελεί την ευκολότερη λύση και λειτουργικά εξασφαλίζει μεγάλη επιφάνεια θερμανταλλαγής και μικρή πτώση πίεσης. Το θερμανταλλακτικό υγρό του κλειστού κυκλώματος είναι συνήθως νερό με προσθήκη αντιψυκτικού υγρού και αντιδιαβρωτικών προσθέτων. Η θέρμανση του νερού του δοχείου επιτυγχάνεται με θερμοσιφωνική κυκλοφορία του θερμανταλλακτικού υγρού μεταξύ ηλιακού συλλέκτη και μανδύα. Ως εκ τούτου, το δοχείο πρέπει να τοποθετείται υψηλότερα του συλλέκτη και μάλιστα αρκετά υψηλότερα, ώστε να αποφεύγεται ανάστροφη κυκλοφορία, σε περιπτώσεις έλλειψης ηλιακής ακτινοβολίας (π.χ. νυκτερινή διάρκεια). Για πρακτικούς και αισθητικούς λόγους, το δοχείο τοποθετείται οριζόντια. Η οριζόντια τοποθέτηση επιδρά αρνητικά στην ανάπτυξη ικανοποιητικής θερμοκρασιακής στρωμάτωσης (θερμοβαθμίδας) στο νερό του δοχείου, που κατ' επέκταση μειώνει τη συνολική απόδοση του συστήματος. Επιπρόσθετα, η κατ' αυτόν τον τρόπο τοποθέτηση του δοχείου δημιουργεί δυσάρεστο αισθητικό αποτέλεσμα. Μια αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, με τοποθέτηση – ενσωμάτωση του δοχείου στη πλάτη του συλλέκτη και εξασφάλιση θέρμανσης του με θερμοσωλήνα (heat pipe), δεν έχει αποκτήσει ευρεία απήχηση. Θα μπορούσε όμως, αυτή η τοποθέτηση – ενσωμάτωση να αποκτήσει μεγαλύτερη πρακτικότητα και εφαρμογή, αν συνδυαζόταν με κυκλοφορητή οδηγούμενο από μικρό φωτοβολταϊκό (Φ/Β) πλαίσιο.

Σ' αυτή την εργασία εξετάζεται η λειτουργία και απόδοση ενός ηλιακού θερμαντήρα νερού που συνδυάζει κυκλοφορητή, οδηγούμενο από μικρό Φ/Β πλαίσιο. Ταυτόχρονα, εξετάζεται και η λειτουργία – απόδοση πανομοιότυπου συμβατικού θερμοσιφωνικού συστήματος, που έχει τοποθετηθεί πλάι στο προηγούμενο, κάτω από τις ίδιες συνθήκες και γίνεται σύγκριση των δύο συστημάτων. Επιπρόσθετα, παρατίθενται αποτελέσματα από δοκιμές συστήματος ηλιακού θερμαντήρα με κατακόρυφο δοχείο και κυκλοφορητή οδηγούμενο από μικρό Φ/Β πλαίσιο.

## 2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Δύο πανομοιότυπα ηλιακά θερμοσιφωνικά συστήματα (του ίδιου τύπου και της ίδιας εταιρείας), με οριζόντια δεξαμενή, τοποθετήθηκαν το ένα δίπλα στ' άλλο, στο πεδίο δοκιμών της οροφής του πολυώροφου κτιρίου Μηχ/γων & Αερον/γών Μηχ/κών του Πανεπιστημίου Πατρών. Και τα δυο συστήματα διαθέτουν συλλέκτης κενού με εμβαδόν συλλεκτικής επιφάνειας (aperture) 2,26 m<sup>2</sup> και χωρητικότητα δεξαμενής: 160 ℓ. Στο ένα σύστημα έχει επέλθει μετατροπή, ώστε η κυκλοφορία του θερμανταλλακτικού ρευστού μεταξύ συλλέκτη και «μανδύα» να συντελείται με ένα αυτολίπαντο κυκλοφορητή DC-12 V, 1,5 – 4 W, ~270 ℓ/h, χωρίς ψήκτρες (Brushless), που τροφοδοτείται από Φ/Β πλαίσιο ισχύος 10 W. Τα συστήματα έχουν τοποθετηθεί σε βάσεις που προβλέπει ο κατασκευαστής με κλίση 45° και έχουν στραφεί προς Νότο.

Τα δυο συστήματα δοκιμάστηκαν σε παράλληλη λειτουργία, κάτω από τις ίδιες μετεωρολογικές και λειτουργικές συνθήκες, επί σειρά ημερών. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με τα πρότυπα ISO 9459-2 [1] και EN 12976-2 (μέθοδος CSTG) [2], αφού τοποθετήθηκαν τα απαραίτητα αισθητήρια και συνδέθηκαν τα κατάλληλα όργανα μέτρησης (ακτινόμετρα ανεμόμετρο, σύστημα συλλογής Data Logging κλπ.).

Χρησιμοποιήθηκαν αισθητήρια και όργανα σύμφωνα με τις προδιαγραφές των παραπάνω προτύπων. Στη παρακάτω Εικόνα 1 φαίνεται η διάταξη μετρήσεων των δύο συστημάτων, σε ταυτόχρονη δοκιμή. Πρέπει να σημειωθεί, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1, ότι και στα δύο συστήματα, το θερμανταλλακτικό ρευστό εισέρχεται και εξέρχεται στη κάτω πλευρά του μανδύα, αντidiaμετρικά. Γεγονός που ανενδείκνυται λειτουργικά [3] [4] [5] και επηρεάζει αρνητικά, τόσο τη θερμοκρασιακή στρωμάτωση στη δεξαμενή, όσο και την απόδοση των συστημάτων.

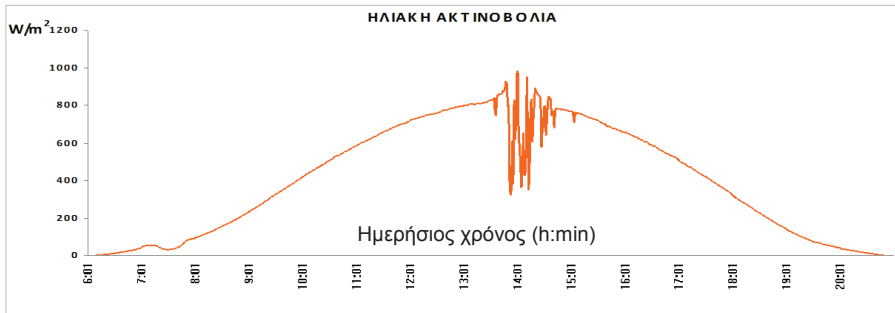


Εικόνα 1. Άποψη της πειραματικής διάταξης, συγκριτικής δοκιμής των 2

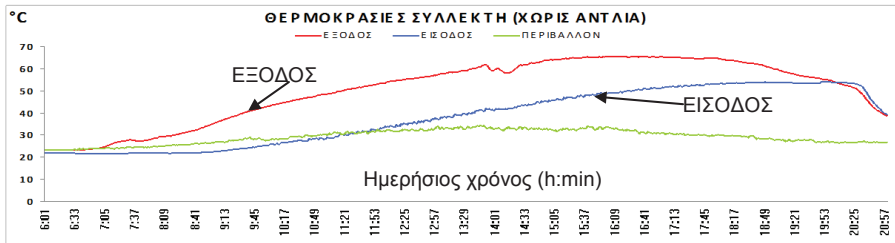
Τα δυο συστήματα δοκιμάστηκαν ταυτόχρονα 20 φορές, σε θερινές μόνο μετεωρολογικές και λειτουργικές συνθήκες. Οι μετρήσεις αυτές θεωρούνται επαρκείς, ώστε να εξαχθούν συγκριτικά αποτελέσματα και συμπεράσματα. Σύμφωνα με τα πρότυπα ISO 9459-2 και EN 12976-2 (μέθοδος CSTG) εξάγονται δυο κατηγορίες διαγραμμάτων, τα διαγράμματα απομάστευσης και τα διαγράμματα εισόδου – εξόδου. Κατά την ημερήσια λειτουργία των συστημάτων, συλλογής και αποθήκευσης ενέργειας, υπήρξε συνεχής καταγραφή των θερμοκρασιών του θερμανταλλακτικού υγρού στην είσοδο και έξοδο των συλλεκτών, της ηλιακής ακτινοβολίας στο επίπεδο του συλλέκτη και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος.

Παρακάτω, δίνονται διαγράμματα μιας τυπικής ημερήσιας δοκιμής, με τα εξής χαρακτηριστικά: μέση ημερήσια θερμοκρασία περιβάλλοντος  $T_a = 26,74 \text{ }^\circ\text{C}$ , θερμοκρασία νερού απομάστευσης (δικτύου)  $T_c = 19,37 \text{ }^\circ\text{C}$ , ήτοι θερμοκρασιακή διαφορά  $T_a - T_c = 7,4 \text{ }^\circ\text{C}$ , συνολική ηλιακή ενέργεια στο επίπεδο του συλλέκτη  $Q_{in} = 54.588,64 \text{ kJ}$ , συνολική ενεργειακή απολαβή για το σύστημα με αντλία  $Q_{out} = 23.773,89 \text{ kJ}$  με απόδοση  $\eta = 0,436$ , συνολική ενεργειακή απολαβή για το σύστημα χωρίς αντλία  $Q_{out} = 22.639,84 \text{ kJ}$  με απόδοση  $\eta = 0,415$ . Σκόπιμα, επιλέχθηκε μια ημέρα δοκιμής με όχι τόσο ομαλή κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας, ώστε να φανεί η επίδραση της διακύμανσης της ηλιακής ακτινοβολίας στη διακύμανση των θερμοκρασιών εισόδου – εξόδου στο συλλέκτη.

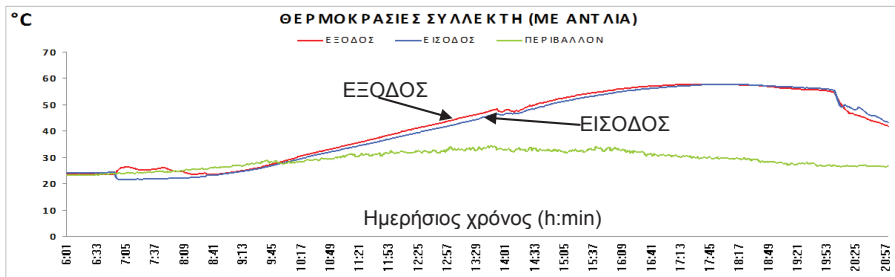
Εξαιτίας του περιορισμένου φάσματος μετρήσεων (δοκιμές μόνο στη θερινή περίοδο), δεν εξάγονται διαγράμματα απόδοσης (είσοδου – εξόδου) των συστημάτων.



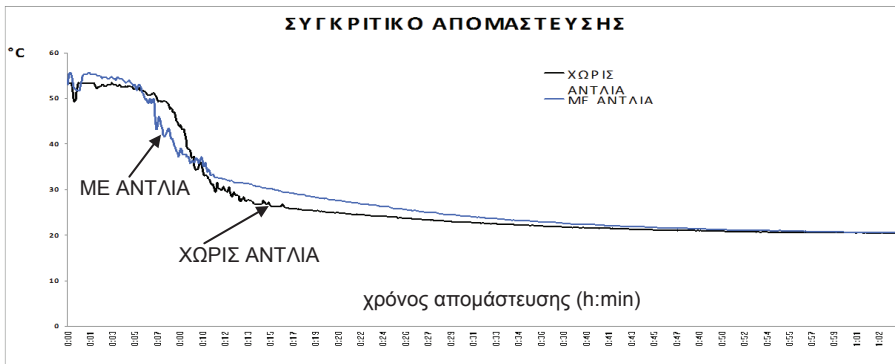
Εικόνα 2. Ημερήσια μεταβολή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας



Εικόνα 3. Ημερήσια μεταβολή των θερμοκρασιών εισόδου – εξόδου στο συλλέκτη & περιβάλλοντος



Εικόνα 4. Ημερήσια μεταβολή των θερμοκρασιών εισόδου – εξόδου στο συλλέκτη & περιβάλλοντος



Εικόνα 5. Θερμοκρασιακές κατανομές απομάστευσης

Στον παρακάτω Πίνακα 1 δίνονται, συγκεντρωτικά, τα συγκριτικά αποτελέσματα από το σύνολο των δοκιμών.

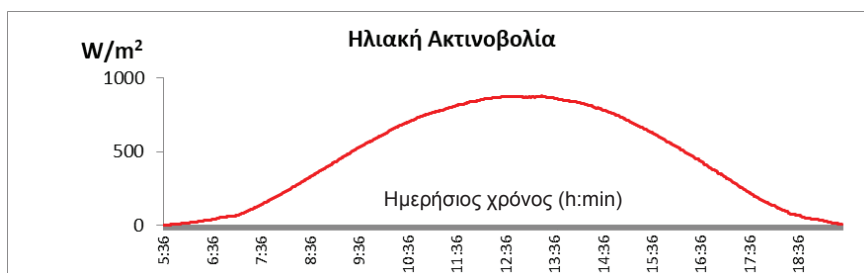
Πίνακας 1

	ΜΕ ΑΝΤΛΙΑ	ΧΩΡΙΣ ΑΝΤΛΙΑ
Μέσος Βαθμός απόδοσης %	40,4	39,8
Μέση μέγιστη θερμοκρασία νερού χρήσης (απομάστευσης) °C	54,45	53,76
Μέση μέγιστη θερμοκρασία θερμοανταλλακτικού υγρού στο συλλέκτη °C	57,91	66,44
Μέση ωφέλιμη ενέργεια συστήματος kJ	22.427,27	22.078,60

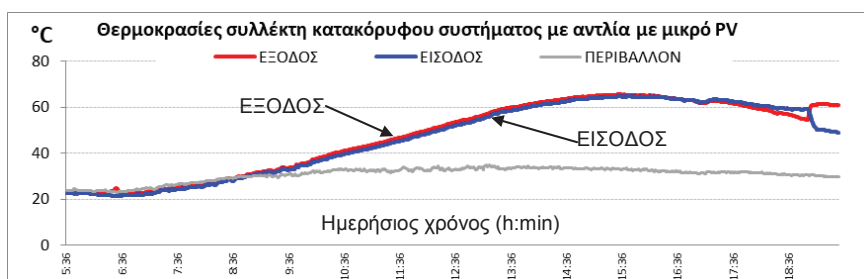
Όπως αναφέρθηκε στην Εισαγωγή, διεξήχθησαν δοκιμές και σε σύστημα ηλιακού θερμαντήρα με κατακόρυφο δοχείο και κυκλοφορητή οδηγούμενο από Φ/Β πλαίσιο, με επιλεκτικό συλλέκτη, εμβαδού: 2 m<sup>2</sup> και χωρητικότητα δεξαμενής: 125 ℓ. Δοκιμάστηκαν δύο φωτοβολταϊκά πλαίσια, ένα μικρό ονομαστικής ισχύος 10 W και ένα μεγαλύτερο 50 W, ώστε να διερευνηθεί η επίδραση του μεγέθους τους στην απόδοση του συστήματος. Στην Εικόνα 6 παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη του συστήματος, με συνδεδεμένο το μεγάλο Φ/Β πλαίσιο. Στις παρακάτω Εικόνες 7 – 9, δίνονται διαγράμματα μιας τυπικής ημερήσιας δοκιμής, με τα εξής χαρακτηριστικά: μέση ημερήσια θερμοκρασία περιβάλλοντος  $T_a = 30,69$  °C, θερμοκρασία νερού απομάστευσης (δικτύου)  $T_c = 22,08$  °C, ήτοι θερμοκρασιακή διαφορά  $T_a - T_c = 8,61$  °C, συνολική ηλιακή ενέργεια στο επίπεδο του συλλέκτη  $Q_{in} = 46.159,31$  kJ, συνολική ενεργειακή απολαβή  $Q_{out} = 23.725,67$  kJ με απόδοση  $\eta = 0,51$ . Στο διάγραμμα απομάστευσης (Εικόνα 9), στο δεξιό κατακόρυφο άξονα καταγράφεται η παροχή απομάστευσης (ℓ/h).



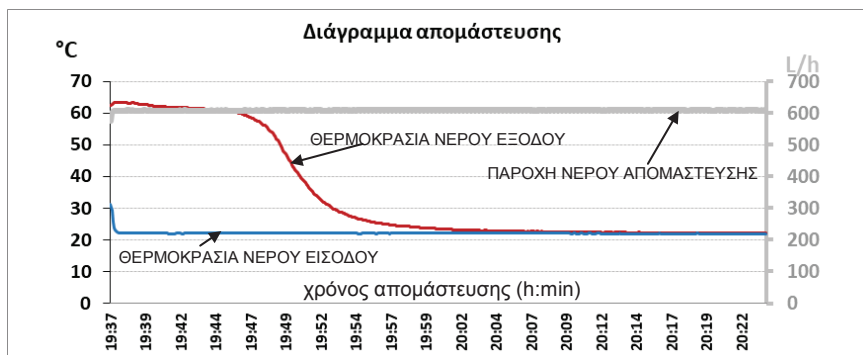
Εικόνα 6. Σύστημα κατακόρυφου δοχείου



Εικόνα 7. Ημερήσια μεταβολή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας



Εικόνα 8. Ημερήσια μεταβολή των θερμοκρασιών εισόδου – εξόδου στο συλλέκτη &amp; περιβάλλοντος



Εικόνα 9. Θερμοκρασιακή κατανομή απομάστευσης

Διεξήχθησαν συνολικά 6 ημερήσιες διαδοχικές δοκιμές, 3 με Φ/Β πλαίσιο ισχύος 10 W και 3 με Φ/Β πλαίσιο ισχύος 50 W. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 2. Από αυτά συνάγεται, ότι η χρήση του μεγαλύτερου Φ/Β λίγο συνεισέφερε στην αύξηση της απόδοσης, γεγονός που τεκμαίρεται και από τα διαγράμματα ημερήσιας μεταβολής των θερμοκρασιών εισόδου – εξόδου στο συλλέκτη (Εικόνες 4 και 8), όπου οι θερμοκρασίες εμφανίζουν πολύ μικρή διαφορά μεταξύ τους. Επικρατεί δηλαδή, ικανοποιητικότητα παροχή θερμανταλλακτικού ρευστού, ώστε η μετάδοση θερμότητας μεταξύ συλλέκτη – δοχείου να κυριαρχείται από τη παροχή και όχι από τη διαφορά θερμοκρασιών εισόδου – εξόδου, όπως αντιθέτως συμβαίνει στα θερμοσιφωνικά συστήματα (Εικόνα 3), με μικρή θερμοσιφωνική κυκλοφορία.

Πίνακας 2

	με μεγάλο PV 50 W	με μικρό PV 10 W
Ελάχιστη ημερήσια ηλιακή ενέργεια στο συλλέκτη ( $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ )	22.756,35	22.885,29
Μέγιστη ημερήσια ηλιακή ενέργεια στο συλλέκτη ( $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ )	23.288,24	23.201,77
Μέση μέγιστη θερμοκρασία ρευστού στο συλλέκτη ( $^{\circ}\text{C}$ )	65,15	64,99
Μέση μέγιστη θερμοκρασία νερού απομάστευσης ( $^{\circ}\text{C}$ )	63,81	63,25
Ελάχιστος βαθμός απόδοσης $\eta_{\min}$ (%)	52,97	49,83
Μέγιστος βαθμός απόδοσης $\eta_{\max}$ (%)	56,38	51,40
Μέσος βαθμός απόδοσης $\eta_{\text{av}}$ (%)	54,52	50,85

### 3. ΣΥΖΗΤΗΣΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από το συγκριτικό διάγραμμα απομάστευσης της Εικόνας 5 προκύπτει ότι το σύστημα με αντλία αναπτύσσει μικρότερη θερμοκρασιακή ομοιομορφία. Το φαινόμενο αυτό εξαλείφεται στο σύστημα με κατακόρυφο δοχείο, όπου η είσοδος έχει κατευθυνθεί στο άνω μέρος του μανδύα, όπως εμφανίζεται στην Εικόνα 9. Όπως διαπιστώνεται, υπάρχει μεγάλο χρονικό διάστημα ( $\sim 12$  min), στην αρχή της απομάστευσης, που η θερμοκρασία εξόδου, από το δοχείο, παραμένει σχεδόν σταθερή. Στα επόμενα δε  $\sim 12$  min, η θερμοκρασία εξόδου έχει σχεδόν ταυτιστεί με τη θερμοκρασία εισόδου του νερού στο δοχείο (από το δίκτυο). Η απόκτηση πιστοποιητικού «Solar Keymark» [6] διευκολύνεται από μια κατ' αυτόν τον τρόπο «κανονικοποιημένη» κατανομή. Βέβαια, το φαινόμενο αυτό σχετίζεται και με άλλους παράγοντες, όπως την αποδοτικότητα του συλλέκτη, την αναλογία όγκου δοχείου προς συλλεκτική επιφάνεια και άλλους ήσσονος σημασίας.

Όπως έχει φανεί, από τις δοκιμές του συστήματος με κατακόρυφο δοχείο, ένα Φ/Β πλαίσιο με ισχύ στη περιοχή των 10 W επαρκεί για την ικανοποιητική κυκλοφορία του θερμανταλλακτικού ρευστού. Για αποδοτικότερη όμως λειτουργία χρειάζεται να συνδυασθεί

με ελεγκτή, ώστε να αποφεύγεται η κυκλοφορία, σε περίπτωση που η θερμοκρασία του νερού στο δοχείο είναι μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία στην έξοδο του συλλέκτη, ενώ υπάρχει επαρκής ηλιακή ακτινοβολία, ώστε να λειτουργεί ο κυκλοφορητής. Η ανάγκη αυτή γίνεται επιτακτικότερη, όταν συνδυάζεται με επίπεδο ηλιακό συλλέκτη, με αυξημένο συντελεστή θερμικών απωλειών. Με συλλέκτες κενού δεν υπάρχει ιδιαίτερη ανάγκη, λόγω του μικρού τους συντελεστή απωλειών. Αυτή ήταν και η αιτία που κατ' αρχή δοκιμάσθηκαν συστήματα με συλλέκτες κενού. Έχουν βέβαια αναπτυχθεί πολύ φθηνά κυκλώματα αυτού του είδους ελεγκτών, που μπορούν να λειτουργούν με τη τάση του Φ/Β πλαισίου και με αισθητήρια θερμοκρασίας, τύπου ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Θα πρέπει όμως, να διερευνηθεί και η αποφυγή του ελεγκτή με χρήση ακόμη μικρότερου Φ/Β πλαισίου, σε συνδυασμό με διάφορα μεγέθη κυκλοφορητών, ώστε σε περιπτώσεις μειωμένου ηλιασμού να μειώνεται δραστικά ή/και να σταματά η λειτουργία τους.

Απ' ότι λοιπόν αναπτύχθηκε παραπάνω, φαίνεται ότι ο συνδυασμός κυκλοφορητή και Φ/Β πλαισίου αποτελεί ικανοποιητική και φθηνή λύση. Για ένα κυκλοφορητή αυτού του τύπου το κόστος ανέρχεται σε 6 – 15 € [7], ενώ ένα Φ/Β πλαίσιο 3 – 10 W στοιχίζει μέχρι 5 € [8] και το κόστος του ελεγκτή δεν ξεπερνά τα 10 €. Συνολικά προστίθεται κόστος ~30 €, που μπορεί να αντισταθμισθεί από μείωση κατασκευαστικού κόστους, λόγω ενσωμάτωσης του δοχείου στη πλάτη του συλλέκτη. Βέβαια, υπάρχει αύξηση πολυπλοκότητας του συστήματος και επικινδυνότητα εμφάνισης βλαβών. Θα πρέπει όμως να αναπτυχθεί συνείδηση ότι ένα ηλιακός θερμαντήρας αποτελεί συσκευή με ανάγκες συντήρησης (τακτική αλλαγή ράβδου μαγνησίου, συμπλήρωση θερμανταλλακτικού υγρού κλπ.), όπως άλλες συσκευές, (κλιματιστικά, καυστήρες κλπ.), ώστε να διατηρείται η απόδοση του και να μακροημερεύει. Κάτω από αυτή τη θεώρηση, η επιδιόρθωση πιθανών επιπρόσθετων βλαβών δεν αποτελεί κάποιο σοβαρό επί πλέον πρόβλημα.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]. ISO 9459-2:1995, Solar heating – Domestic water heating systems – Part 2: Outdoor test methods for system performance characterisation and yearly performance prediction of solar only systems, 1 ch. de la Voie-Creuse CP 56, CH-1211 Geneva 20, Switzerland.
- [2]. European Standard EN 12976-2: January 2006, Thermal solar systems and components - Factory made systems - Part 2: Test methods, CEN, rue de Stassart, 36 B-1050 Brussels.
- [3]. Ι. Γ. Καούρης, Ν. Συρίμπης, ΠΑΡΑΛΛΗΛΗ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΥΟ ΠΑΝΟΜΟΙΟΥΤΥΠΩΝ ΗΛΙΑΚΩΝ ΘΕΡΜΟΣΙΦΩΝΩΝ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΗ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ, Πρακτικά 6<sup>ου</sup> Εθνικού Συνεδρίου για τις Ήπιες Μορφές Ενέργειας, τόμος 1 σελ. 222-231, Βόλος, 3-5 Νοεμ. 1999.
- [4]. Yannis Caouris, Nikolaos Syrimbeis, Konstantinos Konstantinidis, *Side by side comparison of two identical solar thermosiphons, with different mantle entry positions*, CD of Proc. WREC X, 19-25 July 2008, Glasgow, UK.
- [5]. Y. G. Caouris, M. Souliotis, *Examination of top and bottom inlet position in horizontal mantle heat exchanger solar thermosiphonic circuits*, International Journal of Sustainable Energy, 2013, Vol. 32, No. 5, 421–433.
- [6]. <http://www.estif.org/solarkeymarknew/>
- [7]. [https://www.aliexpress.com/af/12v%25252ddc%25252dbrushless%25252dpump.html?SearchText=12v+dc+brushless+pump&d=y&blanktest=0&origin=n&isViewCP=y&jump=af\\_s](https://www.aliexpress.com/af/12v%25252ddc%25252dbrushless%25252dpump.html?SearchText=12v+dc+brushless+pump&d=y&blanktest=0&origin=n&isViewCP=y&jump=af_s)
- [8]. <https://jasungroup.en.made-in-china.com/product/JCDQLZwMzqWr/China-2W-3W-5W-8W-10W-Monocrystalline-Photovoltaic-Mini-Home-Solar-Panels.html>



***Ενεργειακή κλιματολογία***

---



## ΒΑΘΜΟΗΜΕΡΕΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ – ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΑΝΑ ΧΡΗΣΗ ΚΤΗΡΙΩΝ

Αθηνά Γαγλία<sup>1</sup>, Αθανάσιος Αργυρίου<sup>2</sup>, Ευάγγελος Διαλυνάς<sup>1</sup>, Έφη  
Κωστοπούλου<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Εργαστήριο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 80 Αθήνα. email: [agaglia@teemail.gr](mailto:agaglia@teemail.gr), [agaglia@central.ntua.gr](mailto:agaglia@central.ntua.gr)

<sup>2</sup>Εργαστήριο Φυσικής της Ατμόσφαιρας, Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Πατρών, 265 00 Πάτρα. email: [athanarg@upatras.gr](mailto:athanarg@upatras.gr)

<sup>3</sup>Τμήμα Γεωγραφίας, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Μυτιλήνη 81100, Λέσβος. email: [ekostopoulou@aegean.gr](mailto:ekostopoulou@aegean.gr)

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία υπολογίζονται αναλυτικά οι βαθμοημέρες θέρμανσηςσαράντα (40) περιοχών στην Ελλάδα, βάσει της μέσης ωριαίας θερμοκρασίας κάθε χειμερινού μήνα, κάθε περιοχής. Μέσω της προτεινόμενης ωριαίας υπολογιστικής προσέγγισης, δίνεται η δυνατότητα εκτίμησης των βαθμοημερών θέρμανσης σε κτήρια διαφόρων χρήσεων, τα οποία δεν εφαρμόζουν ίδια ωράρια, αλλά και εβδομαδιαίως σχήματα λειτουργίας.

Το πλεονέκτημα της μεθόδου είναι το ότι υπολογίζονται οι βαθμοημέρες θέρμανσης προσαρμοσμένες στο πραγματικό χρόνο λειτουργίας των κτηρίων και όχι μόνο σε υποθετική εικοσιτετράωρη λειτουργία. Τα αποτελέσματα της μεθόδου δίνουν τη δυνατότητα ακριβέστερης εκτίμησης των αναμενόμενων φορτίων θέρμανσης, καθώς και τη δυνατότητα συγκριτικής αξιολόγησης μεταξύ των διαφορετικών χρήσεων κτηρίων.

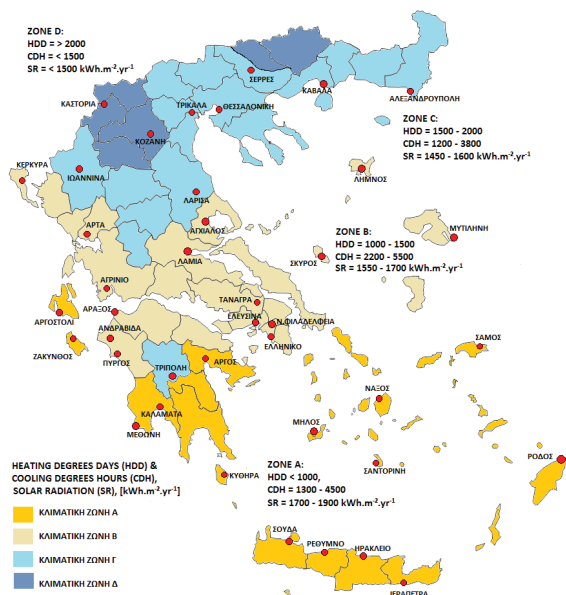
Στην περίπτωση κτηρίων διανυκτέρευσης (π.χ. κατοικίες) που λειτουργούν 18 ώρες ή 14 ώρες ανά ημέρα, το μέσο ποσοστό μείωσης θερμικού φορτίου για τις ελληνικές περιοχές, σε σχέση με την 24ώρη λειτουργία, εκτιμήθηκε στο 15,8% και 30,5% αντίστοιχα. Για τις υπόλοιπες χρήσεις κτηρίων με λειτουργία 5 ή 6 ημερών ανά βδομάδα, το ποσοστό μείωσης θερμικού φορτίου είναι πολύ υψηλό και ανέρχεται για τα κτήρια γραφείων στο 78,1% και για τα εκπαιδευτικά κτήρια στο 69,4%. Τα υψηλά αυτά ποσοστά απόκλισης του θερμικού φορτίου για τις διάφορες χρήσεις κτηρίων, σε σχέση με τα κτήρια 24ώρης λειτουργία (ίδια θερμοκρασία βάσης), αποδεικνύει την ανάγκη αναλυτικότερης προσέγγισης υπολογισμού των βαθμοημερών ή/και βαθμωρών θέρμανσης, λαμβάνοντας υπόψη το πραγματικό ωράριο λειτουργίας τους.

Λέξεις κλειδιά: Βαθμοημέρες θέρμανσης, θερμικά φορτία κτηρίων, ενεργειακή απόδοση κτηρίων, Ελλάδα.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι βαθμομέρες θέρμανσης (HDD) είναι μια παράμετρος η οποία επιτρέπει τον αρκετά ακριβή υπολογισμό των φορτίων θέρμανσης ενός κτηρίου, καθώς και της αναμενόμενης τελικής κατανάλωσης ενέργειας θέρμανσής του. Η μέθοδος των βαθμομερών θέρμανσης είναι η απλούστερη και ταχύτερη μέθοδος προσδιορισμού των φορτίων θέρμανσης ενός κτηρίου[1]. Ουσιαστικά οι βαθμομέρες θέρμανσης αποτυπώνουν τις αναμενόμενες κλιματικές τιμές θερμοκρασίας μιας περιοχής κατά τη χειμερινή περίοδο, η οποία είναι μια βασική παράμετρος για την αρχική εκτίμηση της αναμενόμενης ενεργειακής απόδοσης των κτηρίων κατά την περίοδο θέρμανσης. Παράλληλα μπορεί να αποτελέσουν δείκτη αξιολόγησης της ενεργειακής απόδοσης ορισμένων ηλεκτρομηχανολογικών συστημάτων ως προς τη θέρμανση, των οποίων η λειτουργία σχετίζεται άμεσα με τη θερμοκρασία εξωτερικού περιβάλλοντος, όπως π.χ. οι συμβατικές αερόψυκτες ή υδρόψυκτες αντλίες θερμότητας.

Σύμφωνα με τον Κανονισμό Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων (Κ.Εν.Α.Κ.)[2], η Ελληνική επικράτεια διαιρείται σε τέσσερις κλιματικές ζώνες (Σχ. 1), με βάση τις βαθμομέρες θέρμανσης, οι οποίες έχουν προσδιοριστεί πολλές φορές στο πλαίσιο ερευνητικών μελετών και αναφέρονται σε επιστημονικές δημοσιεύσεις [3-6]. Ο προσδιορισμός των βαθμομερών θέρμανσης για τις ελληνικές περιοχές βασίζεται κυρίως σε τιμές της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας για κάθε περιοχή, οι οποίες έχουν προκύψει από την επεξεργασία μακροχρόνιων μετρήσεων της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας [4-13].



Σχήμα 1: Σχηματική απεικόνιση Κλιματικών Ζωνών ελληνικής επικράτειας και περιοχές Μετεωρολογικών Σταθμών ΕΜΥ[2-3].

Σύμφωνα με τον Κ.Εν.Α.Κ. οι ελληνικές περιοχές που βρίσκονται σε υψόμετρο άνω των 500 μέτρων, εντάσσονται στην επόμενη ψυχρότερη κλιματική ζώνη από εκείνη στην οποία ανήκουν σύμφωνα με την αρχική κατάταξη (Σχ. 1), με ψυχρότερη σε κάθε περίπτωση τη ζώνη Δ. Στο τμήμα του νομού Αρκαδίας το οποίο εντάσσεται στην κλιματική ζώνη Γ και στο τμήμα του νομού Σερρών (ΒΑ τμήμα), το οποίο εντάσσεται στην κλιματική ζώνη Δ, περιλαμβάνονται όλες οι περιοχές υψόμετρο άνω των 500 m[2-3].

Στην παρούσα εργασία υπολογίζονται αναλυτικά οι βαθμοημέρες θέρμανσης σαράντα (40) περιοχών της Ελλάδας, βάσει της μέσης ωριαίας θερμοκρασίας μιας τυπικής ημέρας κάθε χειμερινού μήνα, κάθε μίας από αυτές. Μέσω της προτεινόμενης ωριαίας υπολογιστικής προσέγγισης, δίνεται η δυνατότητα εκτίμησης των βαθμοημερών θέρμανσης κτηρίων διαφόρων χρήσεων, με διαφορετικές εσωτερικές συνθήκες θερμοκρασίας, τα οποία δεν εφαρμόζουν ίδια ωράρια, ούτε και εβδομαδιαία σχήματα λειτουργίας.

## 2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ

Για τον υπολογισμό των βαθμοημερών θέρμανσης βασική παράμετρος είναι η θερμοκρασία του αέρα μιας περιοχής. Συνήθως οι υπολογισμοί βασίζονται σε τιμές της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας του εξωτερικού αέρα για μια σημαντική περίοδο μετρήσεων, τουλάχιστον δεκαπέντε (15) ετών. Στην παρούσα εργασία για τους υπολογισμούς των βαθμοημερών θέρμανσης χρησιμοποιήθηκαν μακροχρόνιες μετρήσεις της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (Ε.Μ.Υ.), οι οποίες είναι σε τρίωρη βάση. Οι μετρήσεις της Ε.Μ.Υ. αφορούν σε σαράντα (40) μετεωρολογικούς σταθμούς οι οποίοι απεικονίζονται στο Σχ.1.

Οι βαθμοημέρες θέρμανσης μιας περιοχής υπολογίζονται συνήθως για κάθε χειμερινό μήνα και προκύπτουν ως το γινόμενο του αριθμού ημερών του μήνα, επί τη διαφορά της μέσης μηνιαίας εικοσιτετράωρης θερμοκρασίας αέρα μείον μια θερμοκρασία αναφοράς, επιθυμητή θερμοκρασία εσωτερικού χώρου κτηρίου, η οποία συνήθως λαμβάνεται ίση με 18°C. Η εξίσωση υπολογισμού των βαθμοημερών θέρμανσης HDD, με βασική παραδοχή την εικοσιτετράωρη λειτουργία του κτηρίου, είναι [1,3-5]:

$$HDD = \sum [N_{mo} \cdot (T_{ref} - T_{air})^+ ] \quad [1]$$

όπου,  $N_{mo}$  ο αριθμός ημερών για τον κάθε μήνα,  $T_{ref}$ , η θερμοκρασία αναφοράς (°C) και  $T_{air}$ , η μέση μηνιαία θερμοκρασία αέρα περιβάλλοντος (°C). Το σύμβολο (+) δηλώνει ότι στους υπολογισμούς λαμβάνονται υπόψη μόνο οι περιπτώσεις κατά τις οποίες η θερμοκρασία  $T_{air}$  είναι χαμηλότερη της θερμοκρασίας αναφοράς  $T_{ref}$ , δηλαδή το αποτέλεσμα της διαφοράς στην παρένθεση είναι πάντοτε θετικό.

Πίνακας 1. Κατηγορίες και σχήματα λειτουργίας κτηρίων ανά βασική κατηγορία και χρήση

Κωδικός	Περίοδος λειτουργίας		Βασική κατηγορία κτηρίων	Χρήσεις κτηρίων
	Ώρες ανά ημέρα	Ημέρες ανά εβδομάδα		
Κ.Δ.24	24 ώρες	7	Περιθαλής, μόνιμης ή προσωρινής διαμονής	Νοσοκομεία, κατοικίες, χειμερινά ξενοδοχεία και ξενώνες, φυλακές
Κ.Δ.18	15μμ-9πμ (18 ώρες)	7	Μόνιμης ή προσωρινής διαμονής	Κατοικίες με απασχολούμενους χρήστες (ενήλικες και ανήλικες)
Κ.Δ.14	17μμ-7πμ (14 ώρες)	7	Μόνιμης ή προσωρινής διαμονής	Κατοικίες με απασχολούμενους χρήστες (ενήλικες και ανήλικες)
Κ.Γ.10	8πμ-18μμ (10 ώρες)	5	Γραφεία	Γραφεία δημόσιων υπηρεσιών και ιδιωτικών εταιριών
Κ.ΕΜ.12	9πμ-21μμ (12 ώρες)	6	Εμπορίου	Καταστήματα, πολυκαταστήματα, supermarket, κ.ά.
Κ.ΕΚ.13	8πμ-21μμ (13 ώρες)	5	Σχολεία / εκπαιδευτήρια	Πρωτοβάθμιας και δευτεροβάθμιας εκπαίδευσης με διπλό ωράριο (πρωί & απόγευμα), τριτοβάθμιας εκπαίδευσης κ.ά.
Κ.ΕΚ.8	8πμ-16μμ (8 ώρες)	5	Σχολεία / εκπαιδευτήρια	Πρωτοβάθμιας και δευτεροβάθμιας εκπαίδευσης μονής βάρδιας κ.ά.
Κ.ΣΚ.15	09πμ-24μμ (15 ώρες)	7	Συνάθροιση κοινού	Καφενείο, ζαχαροπλαστείο, εστιατόρια, γυμναστήρια κ.ά.

Ωστόσο, προκειμένου για τον ακριβή υπολογισμό των βαθμοημερών θέρμανσης για διάφορα σχήματα λειτουργίας (επιθυμητή εσωτερική θερμοκρασία, ωράριο λειτουργίας, ημέρες

λειτουργίας) των ελληνικών κτηρίων, ο υπολογισμός θα γίνει βάσει των ωριαίων τιμών της θερμοκρασίας εξωτερικού αέρα από τις μετρήσεις της Ε.Μ.Υ. Το πλεονέκτημα της μεθόδου είναι το ότι υπολογίζονται οι βαθμομέρες θέρμανσης προσαρμοσμένες στον πραγματικό χρόνο λειτουργίας των κτηρίων και όχι μόνο σε υποθετική εικοσιτετράωρη λειτουργία, η οποία εφαρμόζεται ως παραδοχή σήμερα για τον υπολογισμό των βαθμομερών θέρμανσης (Εξ. 1).

Τα αποτελέσματα της μεθόδου δίνουν τη δυνατότητα ορθότερης εκτίμησης των αναμενόμενων φορτίων θέρμανσης, καθώς και τη δυνατότητα συγκριτικής αξιολόγησης μεταξύ των διαφορετικών χρήσεων κτηρίων. Για το λόγο αυτό, υπολογίστηκαν οι βαθμομέρες θέρμανσης για συγκεκριμένα σχήματα (προφίλ) λειτουργίας κτηρίων, που αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες χρήσεις κτηρίων ως όπως περιγράφονται στον Πίνακα 1 και για επιθυμητή θερμοκρασία 18°C και 20°C.

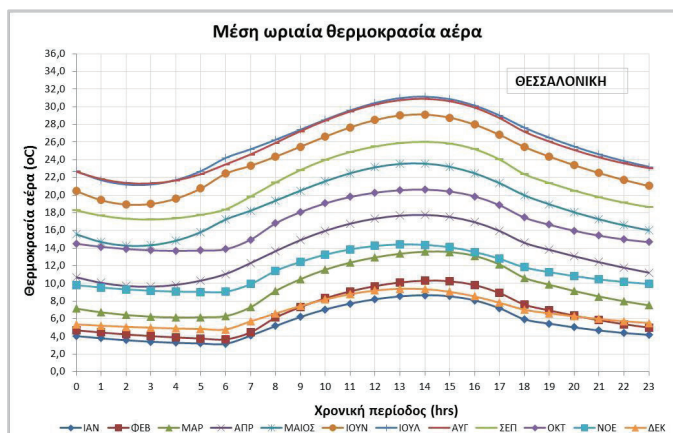
Η Εξ. 1 η οποία υπολογίζει τις βαθμομέρες θέρμανσης HDD για εικοσιτετράωρη λειτουργία του κτηρίου, μπορεί να προσαρμοστεί ανάλογα και για τον υπολογισμό των βαθμομερών θέρμανσης για τα σχήματα (προφίλ) λειτουργίας του Πίνακα 1, ως ακολούθως:

$$HDD = \sum [N_{mo-op} \cdot (T_{ref} - T_{air-op})^+ ] \quad [2]$$

όπου,  $N_{mo-op}$  ο αριθμός ημερών λειτουργίας του κτηρίου κάθε μήνα (ανάλογα με τις ημέρες λειτουργίας ανά βδομάδα, 5,6 κτλ) και  $T_{air-op}$ , η μέση θερμοκρασία αέρα περιβάλλοντος (°C) για τις ώρες λειτουργίας του κτηρίου στη διάρκεια μιας ημέρας κάθε μήνα. Το σύμβολο (+) δηλώνει ότι στους υπολογισμούς λαμβάνονται υπόψη μόνο οι περιπτώσεις κατά τις οποίες η μέση ωριαία θερμοκρασία  $T_{air-op}$  μιας τυπικής ημέρας ενός μήνα είναι χαμηλότερη της θερμοκρασίας αναφοράς  $T_{ref}$ .

## 2.1. Ημερήσια Διακύμανση Θερμοκρασίας

Για τον υπολογισμό των βαθμομερών θέρμανσης εκτιμήθηκαν αρχικά οι μέσες ωριαίες τιμές της θερμοκρασία αέρα. Συγκεκριμένα, από τις τριώρες μετρήσεις της Ε.Μ.Υ. εκτιμήθηκε η μέση ωριαία τιμή της θερμοκρασίας, για μια τυπική ημέρα κάθε μήνα (μέσος όρος ημερών) και για κάθε περιοχή. Η διακύμανση της μέσης τιμής της ωριαίας θερμοκρασίας για τις περισσότερες ελληνικές περιοχές, έχει τη μορφή που απεικονίζεται στο Σχ.2. Η τυπική απόκλιση της μέσης τιμής της θερμοκρασίας διαφοροποιείται ανάλογα με τη γεωγραφική περιοχή και την εποχή και κυμαίνεται κατά μέσο όρο από 3°C έως και 5°C. Ωστόσο, οι απολύτως ελάχιστες θερμοκρασίες κατά τη χειμερινή περίοδο στις ελληνικές περιοχές και κυρίως στις ψυχρές περιοχές παρουσιάζουν σημαντικές αποκλίσεις από τις μέσες εκτιμώμενες τιμές [3, 7, 12-16].



Σχήμα 2: Διακύμανση της θερμοκρασία αέρα για μια τυπική ημέρα κάθε μήνα για την περιοχή της Θεσσαλονίκης.

Οι αναλυτικές σχέσεις που προέκυψαν από την πολλαπλή πολυωνυμική προσαρμογή και περιγράφουν τη διακύμανση της ωριαίας θερμοκρασία  $T_{air,im}$ , συναρτήσει του χρόνου (Σχ. 2), δίνουν συντελεστές προσδιορισμού ( $R^2$ ) και συσχέτισης ( $R$ ) σχεδόν μονάδα, καθώς οι τιμές θερμοκρασία αέρα οι οποίες υπολογίζονται από τις σχέσεις αυτές σχεδόν ταυτίζονται με τις μετρήσεις. Αντίστοιχα οι τιμές της μέσης τετραγωνικής απόκλισης (RMS) είναι για την πλειοψηφία των εξισώσεων που προέκυψαν μηδενικές ή σχεδόν μηδενικές, όπως και τα υπόλοιπα που προκύπτουν.

## 2.2. Φορτία θέρμανσης κτηρίων

Για τον υπολογισμό των ετήσιων φορτίων θέρμανσης  $Q_{heating}$  (kWh/yr) εφαρμόζεται η ακόλουθη Εξ. 3, βάσει των βαθμομερών θέρμανσης (HDD) και των ωρών λειτουργίας του κτηρίου ανά ημέρα βάσει των οποίων υπολογίστηκαν οι αντίστοιχες βαθμομέρες θέρμανσης.

$$Q_{heating} = \left[ \left( \frac{U_m \cdot A}{1000} \right) + \left( \frac{V_{air} \cdot c_p \cdot \rho}{3600} \right) \right] \cdot HDD \cdot T_{hrs} \cdot F_o \quad [3]$$

όπου,  $U_m$  ο μέσος συντελεστής θερμοπερατότητας του κτηρίου ( $W/m^2 \cdot K$ ),  $A$  η επιφάνεια του κτιριακού κελύφους ( $m^2$ ),  $V_{air}$  ο εισερχόμενος νωπός αέρας στο κτήριο (φυσικός, μηχανικός ή παρασιτικός αερισμός) στη διάρκεια μιας μέρας ( $m^3$ ),  $c_p$  η ειδική θερμοχωρητικότητα του αέρα ( $1,0 \text{ kJ/kg} \cdot K$ ),  $\rho$  η πυκνότητα του αέρα ( $1,17 \text{ kg/m}^3$ ),  $T_{hrs}$  οι ώρες λειτουργίας ανά ημέρα και  $F_o$  ο συντελεστής λόγω διακοπτόμενης λειτουργίας του συστήματος θέρμανσης.

## 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ

Οι βαθμομέρες θέρμανσης (HDDs) για τις διάφορες χρήσεις κτηρίων διαφοροποιούνται σημαντικά, όπως ήταν αναμενόμενο λόγω της διαφορετικής περιόδου λειτουργίας στη διάρκεια της μέρας, πρωινή, απογευματινή, βραδινή και 24ώρη λειτουργία, αλλά και λόγω της διαφοράς ημερών λειτουργίας στη διάρκεια της εβδομάδας. Στον Πίνακα 2 δίνονται συγκεντρωτικά οι HDDs, με θερμοκρασία βάσης τους  $18^\circ C$ , για κάθε μία από τις 40 γεωγραφικές περιοχές της Ελλάδας και για τα σχήματα λειτουργίας κτηρίων που περιγράφηκαν στον Πίνακα 1, τα οποία παρουσιάζουν διαφορετικές ώρες και ημέρες λειτουργίας ανά βδομάδα.

Για τον υπολογισμό της ποσοστιαίας μείωσης του θερμικού φορτίου που παρουσιάζουν τα διάφορα σχήματα λειτουργίας των κτηρίων (Πίνακας 1) σε σχέση με το εικοσιτετράωρο εβδομαδιαίο προφίλ (Κ.Δ.24.) λειτουργίας, είναι απαραίτητος ο υπολογισμός των βαθμοωρών θέρμανσης (HDHrs), ο οποίος βασίζεται στο γινόμενο των ωρών λειτουργίας των κτηρίων, επί τον αριθμό των βαθμομερών θέρμανσης (Πίνακας 2). Στο Πίνακα 3 δίνονται η μέση, μέγιστη και ελάχιστη τιμή της ποσοστιαίας διαφοράς του θερμικού φορτίου των διαφόρων προφίλ λειτουργίας των κτηρίων, σε σχέση με το θερμικό φορτίο για εικοσιτετράωρο εβδομαδιαίο προφίλ (Κ.Δ.24.) λειτουργίας των κτηρίων, με θερμοκρασία βάσης τους  $18^\circ C$ , για το σύνολο των ελληνικών περιοχών.

Στην περίπτωση των κτηρίων κατοικιών που λειτουργούν 18 ώρες ανά ημέρα (Κ.Δ.18.) και 14 ώρες ανά ημέρα (Κ.Δ.14.), η μέση τιμή του ποσοστού μείωσης θερμικού φορτίου είναι 15,8% και 30,5% αντίστοιχα (Πίνακας 3) σε σχέση με την 24ώρη λειτουργία. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς αφορά σε κτήρια διανυκτέρευσης, τα οποία θερμαίνονται κυρίως τις βραδινές ώρες, ενώ οι χρήστες απουσιάζουν στη διάρκεια των ωρών ηλιοφάνειας (υψηλότερες θερμοκρασίες).

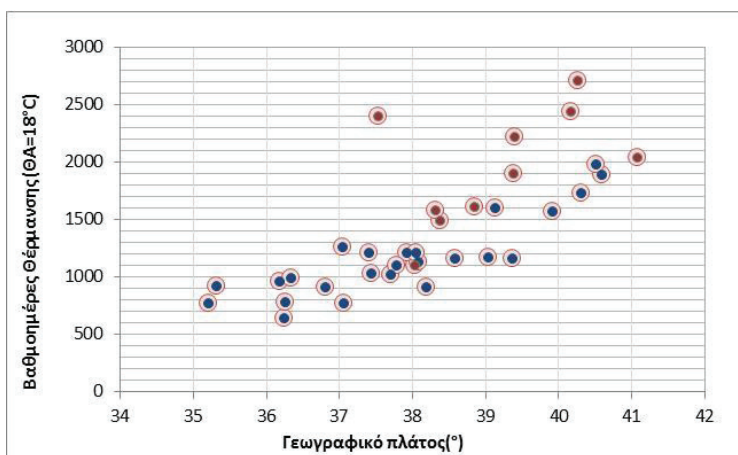
Για τις υπόλοιπες χρήσεις κτηρίων με ημερήσια λειτουργία και 5 ή 6 ημέρες ανά βδομάδα (Κ.Γ.10., Κ.ΕΜ.12., κτλ), το ποσοστό μείωσης θερμικού φορτίου είναι πολύ υψηλό και ανέρχεται για τα κτήρια γραφείων στο 78,1% και για τα εκπαιδευτικά κτήρια στο 69,4%. Τα υψηλά αυτά ποσοστά απόκλισης του θερμικού φορτίου για τις διάφορες χρήσεις κτηρίων (Πίνακας 3), σε σχέση με αυτό που αντιστοιχεί στη συμβατική τιμή των HDDs για 24ώρη λειτουργία (με ίδια θερμοκρασία βάσης), αποδεικνύει την ανάγκη αναλυτικότερης προσέγγισης υπολογισμού των βαθμομερών και βαθμοωρών θέρμανσης, λαμβάνοντας υπόψη το πραγματικό ωράριο λειτουργίας των κτηρίων.

Πίνακας 2. Βαθμομέρες θέρμανσης (HDDs) με θερμοκρασία βάσης 18°C, ανά γεωγραφική περιοχή της Ελλάδας, για τα διάφορα σχήματα λειτουργίας κτηρίων

Χρήση κτηρίου	Κ.Δ.24	Κ.Δ.18	Κ.Δ.14	Κ.Γ.10	Κ.ΕΜ.12	Κ.ΕΚ.13	Κ.ΕΚ.8	Κ.ΣΚ.15
Ώρες/ημέρα	24	18,0	14,0	10,0	12,0	13,0	8,0	15,0
Ημέρες/εβδομάδα	7	7	7	5	6	5	5	7
Ελληνικό	1037,3	1172,3	1238,2	540,0	638,4	565,0	561,1	824,6
Ν. Φιλαδέλφεια	1102,3	1233,5	1275,4	614,3	723,7	642,8	638,1	916,3
Καβάλα	1892,2	2081,9	2182,1	1061,7	1232,5	1079,3	1108,6	1554,6
Μυτιλήνη	1174,8	1275,5	1340,2	673,7	796,9	688,3	699,0	995,3
Ρόδος	647,8	733,6	780,9	329,6	397,8	350,7	339,8	519,8
Αγρίνιο	1490,3	1724,4	1848,4	706,4	777,8	717,9	775,8	1050,1
Καλαμάτα	1264,7	1492,8	1612,4	555,6	614,3	575,8	610,7	858,7
Ιωάννινα	2227,8	2457,7	2577,7	1241,4	1383,7	1231,7	1332,2	1743,5
Άραξος	1137,4	1302,3	1386,9	562,9	635,0	576,1	603,1	840,0
Αλεξανδρούπολη	1980,2	2179,1	2295,4	1099,3	1286,3	1120,4	1140,3	1625,5
Κοζάνη	2441,5	2651,8	2775,0	1410,5	1632,9	1421,8	1481,7	2043,3
Κύθηρα Α/Δ	960,5	1030,2	1068,9	577,6	707,9	601,3	576,5	867,7
Κέρκυρα	1164,3	1324,8	1403,8	592,2	653,8	596,4	643,8	860,7
Λάρισα	1902,1	2113,9	2227,4	1033,5	1142,4	1024,9	1120,8	1460,2
Καστοριά	2714,3	2956,5	3092,3	1560,8	1732,9	1531,8	1673,6	2154,7
Μακεδονία	1738,1	1880,8	1962,8	1016,8	1140,2	1001,3	1085,1	1423,2
Σκύρος	1166,1	1257,6	1310,3	688,7	825,0	707,8	700,7	1022,7
Πύργος	1212,6	1434,5	1553,5	525,3	597,9	555,4	568,9	842,0
Ρέθυμνο				498,5	602,1	523,8	504,9	
Νάξος	770,7	849,7	891,8	429,5	518,7	448,9	435,3	656,1
Σέρρες	2039,2	2235,3	2347,7	1148,0	1300,8	1147,1	1221,4	1627,1
Λήμνος	1568,7	1725,1	1818,4	870,8	1039,5	898,7	890,9	1322,2
Άρτα				612,7	705,5	654,5	667,0	
Αργαστόλι	914,3	1041,4	1115,1	452,3	547,5	482,6	469,5	729,1
Άργος				1105,3	1279,6	1141,3	1155,1	
Λαμία	1615,2	1831,7	1947,1	821,8	933,2	838,7	881,2	1226,6
Τανάγρα	1580,5	1793,2	1915,9	793,6	920,0	818,7	839,7	1216,6
Ανδραβίδα	1210,8	1409,7	1513,5	562,1	630,8	580,7	609,1	859,9
Ιεράπετρα				461,1	568,9	495,2	460,0	
Τρίκαλα Ημαθίας				1067,2	1217,6	1077,6	1141,2	
Ηράκλειο	768,5	885,2	952,9	364,5	443,8	394,2	373,1	596,3
Θήρα	785,2	875,5	928,3	417,7	513,0	445,0	424,7	660,3
Μεθώνη	915,1	1050,4	1126,5	442,2	531,7	473,5	458,4	712,0
Μήλος	991,2	1092,4	1145,7	553,6	690,9	591,6	551,5	867,4
Αγχιάλος	1603,2	1795,9	1914,1	834,2	956,4	850,6	885,6	1249,1
Ελευσίνα	1214,6	1378,4	1471,5	610,7	720,4	639,7	638,7	944,0
Σουδα	924,3	1057,5	1133,1	451,4	555,4	489,8	462,5	735,4
Σάμος	1018,7	1136,8	1208,7	537,7	635,5	558,0	563,1	819,9
Ζάκυνθος	1102,1	1285,1	1396,4	493,0	567,9	518,3	526,1	778,7
Τρίπολη	2407,3	2708,4	2875,0	1251,8	1399,2	1257,3	1338,9	1797,8

Πίνακας 3. Ποσοστό (%) θερμικού φορτίου των διαφορετικών σχημάτων λειτουργίας των κτηρίων, σε σχέση με το θερμικό φορτίο για 24ώρη και 7ήμερο προφίλ λειτουργίας (Κ.Δ.24), για το σύνολο των γεωγραφικών περιοχών στην Ελλάδα								
Χρήση κτηρίου	Κ.Δ.24	Κ.Δ.18	Κ.Δ.14	Κ.Γ.10	Κ.ΕΜ.12	Κ.ΕΚ.13	Κ.ΕΚ.8	Κ.ΣΚ.15
Ωρες/ημέρα	24	18,0	14,0	10,0	12,0	13,0	8,0	15,0
Μέση τιμή	-	84,2	69,4	21,9	30,6	29,3	18,3	49,4
Μέγιστη τιμή	-	88,7	74,7	25,1	36,9	33,9	20,8	56,5
Ελάχιστη τιμή	-	80,4	64,9	18,0	24,3	24,7	15,6	42,4

Από την ανάλυση των δεδομένων (μέσες ωριαίες τιμές θερμοκρασίας) προκύπτει ότι η σημαντικότερη παράμετρος που επιδρά στην τιμή των βαθμοημερών θέρμανσης είναι το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής (Σχ.3), ενώ το υψόμετρο παρουσιάζει εξίσου υψηλή επίδραση. Στο Σχ. 3, τα σημεία με μπλε χρώμα αντιστοιχούν σε θερμότερες περιοχές, κυρίως παραθαλάσσιες ή με χαμηλό υψόμετρο.



Σχ. 3: Βαθμοημέρες θέρμανσης για 24ώρη λειτουργία υπολογισμένες βάσει των μέσων ωριαίων θερμοκρασιών αέρα. Με μπλε απεικονίζονται οι θερμότερες περιοχές (παραθαλάσσιες ή με χαμηλό υψόμετρο).

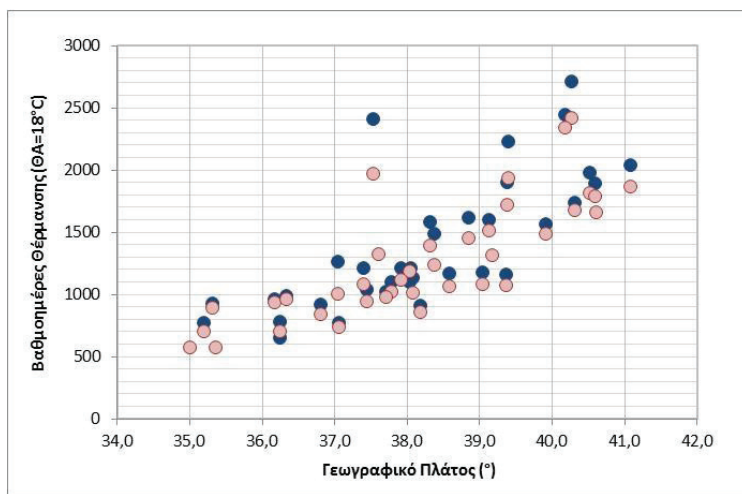
Για 24ώρη και 7ήμερη λειτουργία κτηρίων, οι βαθμοημέρες θέρμανσης στις διάφορες ελληνικές περιοχές μπορεί να υπολογιστεί με αρκετή ακρίβεια από την ακόλουθη σχέση:

$$\text{HDDs} = -7434,8 (\pm 982,8) + 229,1 (\pm 21,5) \cdot \varphi - 4,25 (\pm 17,2) \cdot L + 1.594 (\pm 0,18) \cdot h \quad [4]$$

όπου,  $\varphi$  (°) το γεωγραφικό πλάτος,  $L$  (°) το γεωγραφικό μήκος και  $h$  (m) το υψόμετρο της περιοχής. Οι συντελεστές σημαντικότητας (beta) είναι, 0,663, -0,016 και 0,571 αντίστοιχα. Ο συντελεστής προσδιορισμού  $R^2=0,89$  και συσχέτισης  $R=0,94$ .

### 3.1. Απόκλιση βαθμοημερών θέρμανσης ανά μεθοδολογία για 24ώρη λειτουργία

Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι, οι HDDs για 24ώρη και 7ήμερη λειτουργία και για θερμοκρασία βάσης (18°C), οι οποίες υπολογίζονται βάσει της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας του ατμοσφαιρικού αέρα, είναι κατά μέσο όρο 8% χαμηλότερες, σε σχέση με τις HDDs που υπολογίζονται βάσει των ωριαίων τιμών θερμοκρασίας του αέρα, για το σύνολο των ελληνικών περιοχών. Στο Σχ. 4 απεικονίζονται με μπλε χρώμα οι βαθμοημέρες θέρμανσης που υπολογίστηκαν βάσει των ωριαίων τιμών θερμοκρασίας αέρα και είναι εμφανής η αυξημένη τιμή που παρουσιάζουν.



Σχήμα 4: Σύγκριση βαθμοημερών θέρμανσης για 24ώρη λειτουργία όπως προκύπτουν από: α) τις μέσες ωριαίες τιμές θερμοκρασίας αέρα ανά μήνα (μπλε χρώμα) και β) τη μέση μηνιαία θερμοκρασία αέρα (ροζχρώμα)

### 3.2. Βαθμομέρες θέρμανσης για διαφορετικές θερμοκρασίες αναφοράς

Η χρήση ενός κτηρίου και κατά συνέπεια και το προφίλ λειτουργίας του, είναι θεωρητικά δεδομένη και δεν αλλάζει. Η παράμετρος όμως που μπορεί να τροποποιηθεί και να συμβάλει ουσιαστικά στον περιορισμό της καταναλισκόμενης ενέργειας είναι η θερμοκρασία εσωτερικού χώρου. Η απόκλιση των βαθμοημερών θέρμανσης για ίδια χρήση κτηρίου (παρόμοιο προφίλ λειτουργίας), αλλά διαφορετική θερμοκρασία βάσης, επιθυμητή θερμοκρασίας 18°C ή 20°C, παρουσιάζει αύξηση, για θερμοκρασία βάσης 20°C σε σχέση με τις HDDs για θερμοκρασία βάσης 18°C, η οποία κυμαίνεται κατά μέσο όρο από 32% έως 43% (Πίνακας 4). Η αύξηση αυτή είναι μεγαλύτερη για τις θερμότερες περιοχές της Ελλάδας (κλιματική ζώνη Α και Β) και διαφοροποιείται ανάλογα και με τη χρήση κτηρίου.

Πίνακας 4. Ποσοστιαία (%) διαφορά βαθμοημερών θέρμανσης, για θερμοκρασίες βάσης 18°C και 20°C								
Χρήση κτηρίου	Κ.Δ.24	Κ.Δ.18	Κ.Δ.14	Κ.Γ.10	Κ.ΕΜ.12	Κ.ΕΚ.13	Κ.ΕΚ.8	Κ.ΣΚ.15
Ωρες/ημέρα	24	18	14	10	12	13	8	15
Μέση τιμή	34,8	32,8	32,1	42,0	43,0	41,2	41,0	39,5
Μέγιστη τιμή	56,6	52,3	50,5	70,4	72,1	68,6	68,9	66,0
Ελάχιστη τιμή	14,4	13,1	12,1	22,5	22,9	22,5	21,5	18,7

## 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι βαθμομέρες είναι ένας αξιόπιστος δείκτης για την εκτίμηση της τελικής κατανάλωσης ενέργειας ενός κτηρίου, εφόσον έχουν προσδιοριστεί με βάση το πραγματικό ή το αναμενόμενο τυπικό προφίλ λειτουργίας ενός κτηρίου, και το οποίο χαρακτηρίζεται από το ωράριο λειτουργίας και την επιθυμητή θερμοκρασία εσωτερικού χώρου.

Οι βασικές παράμετροι που επιδρούν στην διαφοροποίηση των βαθμοημερών θέρμανσης στις διάφορες ελληνικές περιοχές, είναι πρωτίστως το γεωγραφικό πλάτος ( $\phi$ ) και το υψόμετρο ( $h$ ), ενώ το γεωγραφικό μήκος ( $L$ ) έχει αμελητέα επίδραση. Επίσης, σημαντική επίδραση στο αριθμό

των βαθμομερών θέρμανσης μια περιοχής έχει και η θέση της περιοχής παραθαλάσσια ή μη. Συγκεκριμένα, οι παραθαλάσσιες περιοχές στην πλειοψηφία τους παρουσιάζουν υψηλότερες θερμοκρασίες και κατά συνέπεια χαμηλότερο αριθμό βαθμομερών θέρμανσης.

Η ζήτηση του θερμικού φορτίου, όπως υπολογίστηκε βάσει των βαθμομερών θέρμανσης, για τις διάφορες χρήσεις κτηρίων με λιγότερες ώρες λειτουργίας στη διάρκεια της ημέρας (π.χ. γραφεία, εκπαιδευτήρια) σε σχέση με το θερμικό φορτίο που αντιστοιχεί σε 24ώρη λειτουργία, παρουσιάζει σημαντικό ποσοστό μείωσης. Αυτό αποδεικνύει την ανάγκη αναλυτικότερης προσέγγισης υπολογισμού των βαθμομερών και βαθμωρών θέρμανσης, λαμβάνοντας υπόψη το πραγματικό ωράριο λειτουργίας των κτηρίων.

Παράλληλα η εκτίμηση των βαθμομερών θέρμανσης βάσει των μέσων ωριαίων τιμών θερμοκρασίας ανά μήνα και γεωγραφική περιοχή, παρέχει επίσης τη δυνατότητα ακριβέστερης προσέγγισης, σε σχέση με τον υπολογισμό τους βάσει τη μέσης θερμοκρασίας του μήνα. Η απόκλιση / αύξηση των τιμών των βαθμομερών θέρμανσης, στην περίπτωση της ωριαίας προσέγγισης, ανέρχεται κατά μέσο όρο στο 8%, για το σύνολο των γεωγραφικών περιοχών. Το ποσοστό αυτό ανέρχεται έως και 20% στην περίπτωση ψυχρών γεωγραφικών περιοχών.

Τέλος, μια εξίσου σημαντική παράμετρος για τον υπολογισμό των βαθμομερών θέρμανσης είναι και η θερμοκρασία βάσης, που ουσιαστικά αποτυπώνει την επιθυμητή θερμοκρασία του χώρου για τις διάφορες χρήσεις κτηρίων. Βάσει του Κ.Εν.Α.Κ. [2], οι επιθυμητές θερμοκρασίες για την πλειοψηφία των ελληνικών κτηρίων καθορίζεται μεταξύ 20°C και 22°C. Κάθε αύξηση ενός βαθμού (°C) της θερμοκρασίας βάσης (επιθυμητή θερμοκρασία), συνεπάγεται, κατά μέσο όρο για το σύνολο των γεωγραφικών περιοχών, τουλάχιστον 10% αύξηση των θερμικών φορτίων στα κτήρια.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας βασίζονται κυρίως σε μετρήσεις της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (ΕΜΥ) που παραχώρησε στο Εργαστήριο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, στο πλαίσιο εκπόνησης διδακτορικής διατριβής με θέμα «Μοντελοποίηση της Ενεργειακής Συμπεριφοράς των Κρυσταλλικών Φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα. Περίπτωση Εφαρμογής σε Κτίρια Κατοικιών». Οι μετρήσεις θερμοκρασίας της ΕΜΥ αφορούν 40 περιοχές της Ελλάδας. Ευχαριστούμε ιδιαίτερω την ΕΜΥ για την παραχώρηση τους.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] ASHRAE Handbook "Fundamentals". American Society of Heating Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Atlanta, Georgia, Edition 2005.
- [2] ΦΕΚ Β 407/9.4.2010, «Κανονισμός Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων – ΚΕΝΑΚ», Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής.
- [3] Αργυρίου Α., Γαγλία Α., Δασκαλάκη Ε., Ζαχαριάς Π., Κατσάνος Δ., Κοντογιαννίδης Σ., Λαδόπουλος Γ., Λαδόπουλος Ι. Τεχνική Οδηγία Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας - Τ.Ο.Τ.Ε.Ε.20701-3/2010 «Κλιματικά δεδομένα ελληνικών περιοχών». Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος (ΤΕΕ), Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής. Γ' Έκδοση. Νοέμβριος 2014.
- [4] ΦΕΚ 362/Δ/1.6/4.7.1979. Κανονισμός Θερμομόνωσης Κτηρίων - Κ.Θ.Κ.
- [5] Α. Ματζαράκης, Χ. Μπαλαφούτης. "Γεωγραφική Κατανομή Βαθμομερών Θέρμανσης στον Ελληνικό Χώρο για Ενεργειακή Χρήση". Έκτο Πανελλήνιο Συνέδριο Μετεωρολογίας Κλιματολογίας και Φυσικής της Ατμόσφαιρας, Ιωάννινα, 25-28 Σεπτεμβρίου 2002.
- [6] Βαζαΐος, Ε. «Εφαρμογές της Ηλιακής Ενέργειας». Γ' έκδοση, Αθήνα (1987).

- [7] Γ. Κορνάρος. «Κλιματικά Στοιχεία των Σταθμών της ΕΜΥ – Περίοδος 1955 έως 1997». Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία – ΕΜΥ, Δ/νση Κλιματολογίας, Τμήμα Ελέγχου Επεξεργασίας. Αθήνα 1999.
- [8] Πελεκάνος, και Κ. Παπαχριστόπουλος, "Σύνταξη πινάκων μετεωρολογικών στοιχείων για ηλιακές εφαρμογές των κυριότερων πόλεων της Ελλάδας". Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, 1980.
- [9] Πελεκάνος και Κ. Παπαχριστόπουλος, "Σύνταξη πινάκων μετεωρολογικών στοιχείων για ηλιακές εφαρμογές των πόλεων της Ελλάδας". Πρακτικά Α' Εθνικού Συνεδρίου Ήπιες Μορφές Ενέργειας, Θεσσαλονίκη 20-22 Οκτωβρίου, 1982. Τόμος Α' σελ. ΜΕΤ 41-75.
- [10] Mamara A., Argiriou AA., Anadranistakis M, (2013). Homogenization of mean monthly temperature time series of Greece. *Int. J. Climatol.* 33: 2649–2666, DOI: 10.1002/joc.3614.
- [11] Mamara A., Argiriou AA., Anadranistakis M, (2014). Detection and correction of inhomogeneities in Greek climate temperature series. *Int. J. Climatol.* 34: 3024–3043, DOI: 10.1002/joc.3888
- [12] Mamara A., Anadranistakis M., Argiriou A.A., Szentimrey T., Kovacs T., Bezes A., Bihari Z. (2017). High resolution air temperature climatology for Greece for the period 1971 – 2000. *Meteorol. Appl.*, 24: 191-205, 2017.
- [13] Giannakopoulos C, Kostopoulou E, Varotsos K.V, Tziotziou K, Plitharas A (2011). An integrated assessment of climate change impacts for Greece in the near future. *Regional Environmental Change*, 11: 829–843, DOI: 10.1007/s00703-005-0122-2.
- [14] Kostopoulou E, Jones P.D (2005). Assessment of climate extremes in the eastern Mediterranean. *Meteorology and Atmospheric Physics* 89: 69-85, DOI: 10.1007/s00703-005-0122-2.
- [15] Giannakopoulos C, Le Sager P, Bindi M, Moriondo M, Kostopoulou E, Goodess C.M (2009) Climatic changes and associated impacts in the Mediterranean resulting from a 2 °C global warming. *Global and Planetary Change* 68: 209-224, DOI: 10.1016/j.gloplacha.2009.06.001
- [16] Kostopoulou E, Giannakopoulos C, Hatzaki M, Karali A, Hadjinicolaou P, Lelieveld J, Lange M. A (2014) Spatio-temporal patterns of recent and future climate extremes in the eastern Mediterranean and Middle East region. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14: 1565–1577, DOI:10.5194/nhess-14-1565-2014.

#### ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ

Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία: [www.hnms.gr](http://www.hnms.gr)

Εργαστήριο Φυσικής της Ατμόσφαιρας, Πανεπιστήμιο Πατρών. [www.atmosphere-upatras.gr](http://www.atmosphere-upatras.gr)

Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών: [www.meteo.gr](http://www.meteo.gr)

Παγκόσμιος Οργανισμός Μετεωρολογίας: [http://www.wmo.int/pages/index\\_en.html](http://www.wmo.int/pages/index_en.html)

## ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΩΝ ΝΕΦΩΝ, ΤΩΝ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΤΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΑΠΟ ΨΗΦΙΑΚΕΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΕΙΣ ΤΟΥ ΟΥΡΑΝΙΟΥ ΘΟΛΟΥ

**Ανδρέας Καζαντζίδης<sup>1\*</sup>, Παναγιώτης Τζουμανίκας<sup>1</sup>, Βασίλειος Σαλαμαλίκης<sup>1</sup>  
Stefan Wilbert<sup>2</sup>, Pascal Kuhn<sup>2</sup>, Philippe Blanc<sup>3</sup>**

<sup>1\*</sup> Εργαστήριο Φυσικής της Ατμόσφαιρας, Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Πατρών,

<sup>2</sup> German Aerospace Center (DLR), Institute of Solar Research, Plataforma de Almería, Spain

<sup>3</sup> MINES ParisTech - PSL Research university, Center Observation, Impacts, Energie, Sophia Antipolis CEDEX, France

e-mail: [akaza@upatras.gr](mailto:akaza@upatras.gr)

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα αιωρούμενα σωματίδια και τα νέφη επηρεάζουν την άμεση και την ολική ακτινοβολία που προσπίπτει στο έδαφος, ενώ η μεγάλη χωρική και χρονική μεταβλητότητά τους αποτελεί το πιο σημαντικό παράγοντα λάθους για την πρόγνωση του ηλιακού δυναμικού.

Τα τελευταία χρόνια, οι ψηφιακές απεικονίσεις του ουράνιου θόλου χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των οπτικών ιδιοτήτων των αιωρούμενων σωματιδίων, το ποσοστό κάλυψης, τον τύπο και την ταχύτητα των νεφών σε μια σειρά από εφαρμογές. Στην παρούσα εργασία, παρουσιάζεται η σύνοψη των μεθοδολογιών που αναπτύχθηκαν στην Plataforma Solar de Almería (PSA), στο πλαίσιο του ευρωπαϊκού προγράμματος “Direct Normal Irradiance Nowcasting methods for optimized operation of concentrating solar technologies” (DNICast, <http://www.dnicast-project.net/>).

Συγκεκριμένα, αναλύονται οι φωτογραφίες απεικόνισης του ουράνιου θόλου από τέσσερις κάμερες Mobotix Q24M, οι οποίες σε συνδυασμό με μετρήσεις των ατμοσφαιρικών συστατικών, καμερών που έχουν τοποθετηθεί σε ηλιακό πύργο για την καταγραφή των σκιών και ένα πυκνό δίκτυο από επίγειες μετρήσεις της ηλιακής ακτινοβολίας χρησιμοποιούνται για:

- την εκτίμηση των οπτικών ιδιοτήτων των αιωρούμενων σωματιδίων από την ένταση στα κανάλια RGB (Red, Green, Blue) σε συγκεκριμένες πολικές γωνίες
- την εκτίμηση των οπτικών ιδιοτήτων των νεφών από ένα συνδυασμό δεικτών της μεταβλητότητας των χρωμάτων και των αποχρώσεων στον ουράνιο θόλο.
- την τρισδιάστατη αναπαράσταση των νεφών και την εισαγωγή σε μοντέλο διάδοσης της ηλιακής ακτινοβολίας ώστε να εκτιμηθεί το ηλιακό δυναμικό σε μία περιοχή 2x2 km. Στη συνέχεια, με τη χρήση διαδοχικών φωτογραφιών, υπολογίζεται η ταχύτητα των νεφών και γίνεται πρόγνωση του ηλιακού δυναμικού σε χρονικό ορίζοντα 15 λεπτών.

Τέλος, τα δεδομένα αξιολογούνται με τη σύγκριση με επίγειες μετρήσεις και χάρτες σκίασης της υπό μελέτη περιοχής.

**Λέξεις Κλειδιά:** αιωρούμενα σωματίδια, νέφη, ηλιακό δυναμικό, πρόγνωση

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

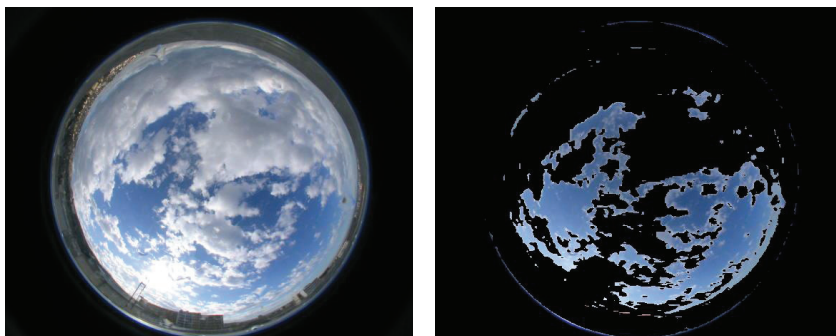
Η αποτίμηση και πρόβλεψη του ηλιακού δυναμικού σε πολύ μικρές χωρικές και χρονικές κλίμακες (0-100m, 0-30min) έχει αποδειχθεί ότι είναι δύσκολο να επιτευχθεί με την αναγκαία ακρίβεια μέσω δορυφορικών προϊόντων ή αριθμητικών προβλέψεων καιρού λόγω μιας σειράς τεχνικών και μεθοδολογικών περιορισμών. Για το λόγο αυτό, οι ψηφιακές απεικονίσεις του ουράνιου θόλου από επίγειες κάμερες χρησιμοποιούνται ευρέως τα τελευταία χρόνια για τη μελέτη της υψηλής χωρικής και χρονικής μεταβλητότητας των νεφών και να παράσχουν τα απαραίτητα δεδομένα εισόδου στα αριθμητικά μοντέλα αποτίμησης και βραχυπρόθεσμης πρόγνωσης της ηλιακής ακτινοβολίας.

Στην εργασία παρουσιάζονται σύντομα οι μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή των παραμέτρων που απαιτούνται για την εκτίμηση και πρόβλεψη του ηλιακού δυναμικού από μια κάμερα απεικόνισης του ουράνιου θόλου: νεφοκάλυψη, ύψος, ταχύτητα και τύπος νέφους, καθώς και το οπτικό βάθος των αιωρούμενων σωματιδίων. Η εφαρμογή αυτών των μεθοδολογιών έγινε στην Plataforma Solar de Almeria (PSA), στο πλαίσιο του έργου: " Direct Normal Irradiance Nowcasting methods for optimized operation of concentrating solar technologies" (DNICast, <http://www.dnicast-project.net/>).

## 2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

### 2.1. Νεφοκάλυψη και τύπος νέφους

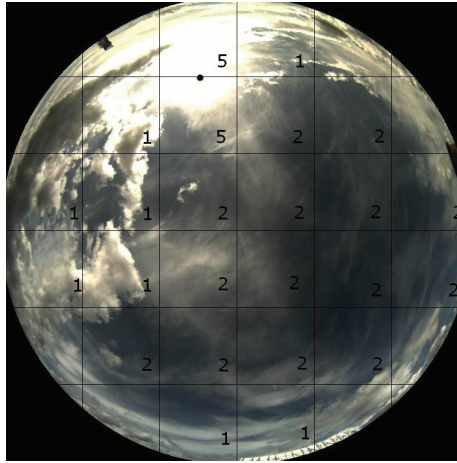
Η μέθοδος για την ανίχνευση των νεφών και την εκτίμηση της συνολικής κάλυψης των νεφών βασίζεται στο γεγονός ότι το χρώμα είναι η κύρια ιδιότητα που επιτρέπει την οπτική απεικόνιση του σύννεφου στον ουρανό. Χρησιμοποιώντας ένα ποικιλόμορφο σύνολο ψηφιακών εικόνων διαφόρων συνθηκών (συμπεριλαμβανομένων των περιπτώσεων διαφόρων τύπων και κάλυψης) κάτω από διαφορετικές ηλιακές ζενίθιες γωνίες [1], βρέθηκε ότι η χρήση ενός λόγου ή μιας διαφοράς μεταξύ των εντάσεων του μπλε (B) και κόκκινου (R) οδηγεί σε σφάλματα για τις περιπτώσεις ύπαρξης διάσπαρτων νεφών υπό υψηλές ζενίθιες ηλιακές γωνίες. Θέλοντας να οριστεί ένα κατάλληλο όριο για τη διάκριση των περιοχών χρησιμοποιήθηκε ένα πολυχρωματικό κατώφλι, λαμβάνοντας επίσης υπόψη την ένταση του πράσινου (G) της εικόνας (Εικόνα 1).



*Εικόνα 1: Παράδειγμα ψηφιακής εικόνας του ουρανού που εφαρμόζεται η τεχνική αναγνώρισης των νεφών. Η αυθεντική εικόνα και οι περιοχές των νεφών (σε μαύρο χρώμα, περιέχοντας και την περιοχή του ηλιακού δίσκου) παρουσιάζονται στην αριστερή και δεξιά στήλη αντίστοιχα.*

Για την ανίχνευση του τύπου των νεφών αναπτύχθηκε ένας ταξινομητής νεφών, με βάση τη μέθοδο k-πλησιέστερου γείτονα (KNN). Για την ταξινόμηση επιλέχθηκαν μια σειρά από χαρακτηριστικά όπως τα χρωματικά χαρακτηριστικά (R, G, B), τα επίπεδα του γκρι και των μετασχηματισμών του, αλλά και η ύπαρξη νεφοσταγόνων στην εικόνα. Η διαδικασία της εκπαίδευσης και αξιολόγησης του ταξινομητή έγινε για ένα πλήθος εικόνων που χωρίστηκαν σε 36 περιοχές (Εικόνα 2) και οδηγούν στην ανίχνευση των ακόλουθων τύπων νεφών: cumulus (1), cirrus-cirrostratus (2), cirrocumulus-altocumulus (3), stratocumulus-stratus (4), clear sky (5). Με βάση την αξιολόγηση του ταξινομητή, τα ποσοστά

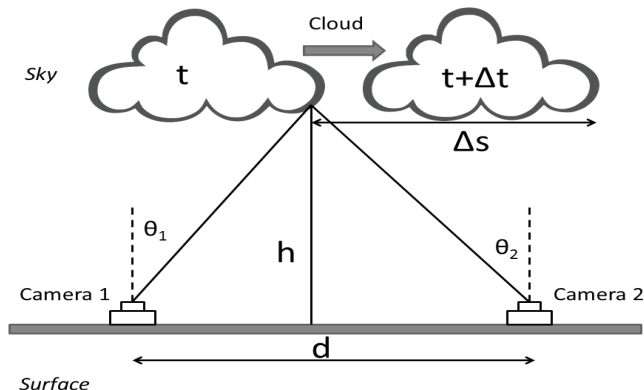
επιτυχίας της μεθόδου κυμαίνονται από 84 έως 98% για cumulus και clear sky αντίστοιχα. Ένα παράδειγμα των αποτελεσμάτων του ταξινομητή παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.



Εικόνα 2: Παράδειγμα των αποτελεσμάτων του ταξινομητή με το διαχωρισμό της εικόνας του ουρανού σε 36 περιοχές και ανίχνευση των 5 τύπων νέφωσης (παρουσιάζονται με νούμερα με τον κυρίαρχο τύπο σε κάθε περιοχή).

## 2.2. Ύψος και ταχύτητα του νέφους

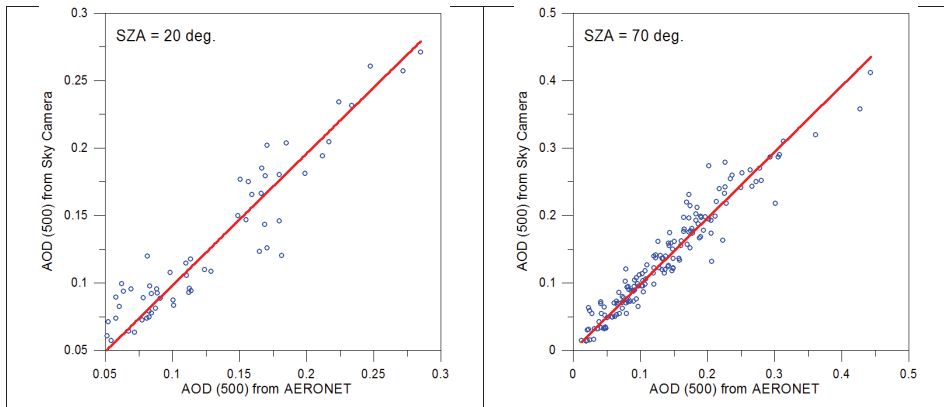
Για τον υπολογισμό του ύψους και της ταχύτητας του νέφους χρησιμοποιήθηκε η τριγωνομετρική προσέγγιση που παρουσιάζεται στην εικόνα 3. Μετά τη γεωμετρική βαθμονόμηση των εικόνων του ουρανού θόλου, είναι δυνατός ο υπολογισμός των γωνιών  $\theta_1$  και  $\theta_2$  που αντιστοιχούν στην άκρη του νέφους, όπως απεικονίζεται από 2 ψηφιακές κάμερες. Γνωρίζοντας την απόσταση  $d$  των καμερών μπορεί να υπολογιστεί το ύψος  $h$  της βάσης του νέφους. Η λήψη φωτογραφιών στις χρονικές στιγμές  $t$  και  $t+\Delta t$  μας δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού και της ταχύτητας του νέφους. Η συγκεκριμένη διαδικασία επαναλήφθηκε από ένα σύστημα τεσσάρων συγχρονισμένων καμερών για την ακριβέστερη εκτίμηση του ύψους και της ταχύτητας των νεφών, ενώ μπορεί να εφαρμοστεί και στις περιπτώσεις όπου υπάρχουν περισσότερα από ένα είδη νέφωσης.



Εικόνα 3: Σχεδιάγραμμα της απεικόνισης του νέφους από 2 επίγειες κάμερες και σε 2 διαδοχικές χρονικές στιγμές. Με τη χρήση τριγωνομετρίας μπορεί να βρεθεί το ύψος βάσης ( $h$ ) και η ταχύτητα του νέφους.

### 2.3. Το οπτικό βάθος των αιωρούμενων σωματιδίων

Για τον υπολογισμό του οπτικού βάθους των αιωρούμενων σωματιδίων αναπτύχθηκε μεθοδολογία που βασίστηκε σε μετρήσεις από φωτόμετρο CIMEL (δίκτυο AERONET) που βρίσκεται στην Plataforma Solar de Almeria [2,3,4]. Η μεθοδολογία χρησιμοποίησε πληροφορίες από ψηφιακές απεικονίσεις σταθερού χρόνου έκθεσης ώστε να επιτευχθεί μια καλή συσχέτιση μεταξύ της αλλαγής της φωτεινότητας και της αλλαγής της έντασης της ακτινοβολίας για διαφορετικές ηλιακές ζενίθιες γωνίες. Χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας στο μπλε, πράσινο και κόκκινο από το ζενίθ του ουρανού θόλου, σε συνδυασμό με το εμβαδόν της επιφάνειας της εικόνας που απεικονίζει τον ηλιακό δίσκο, παράγοντες που εξαρτώνται άμεσα από το οπτικό βάθος των αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα και δίνουν την δυνατότητα υπολογισμού του σε τρεις φασματικές περιοχές (μπλε, πράσινο, κόκκινο). Τα αποτελέσματα των συγκρίσεων των αποτελεσμάτων της μεθοδολογίας με τις μετρήσεις του φωτομέτρου CIMEL στα 500nm για δύο ηλιακές ζενίθιες γωνίες (20 και 70 μοίρες) παρουσιάζονται στην εικόνα 4.

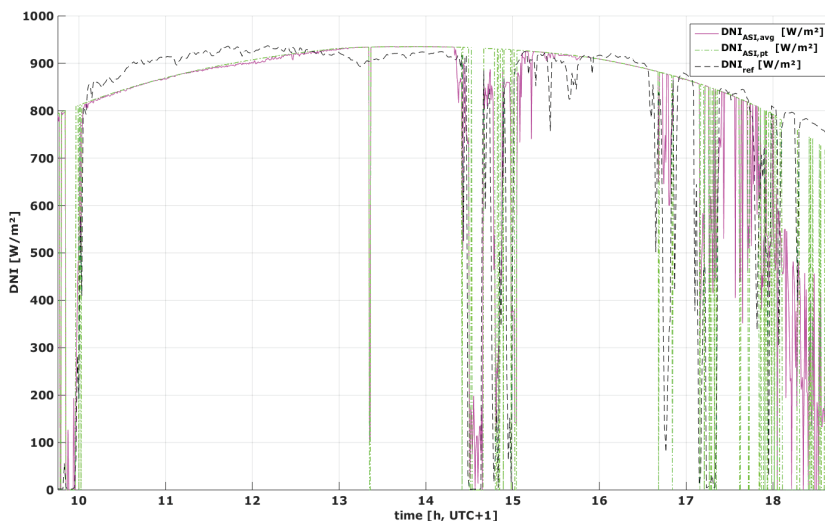


Εικόνα 4: Γραφικές παραστάσεις συσχέτισης του οπτικού βάθους των αιωρούμενων σωματιδίων στα 500nm από τις εκτιμήσεις μέσω των ψηφιακών απεικονίσεων του ουρανού θόλου (sky camera) και των μετρήσεων του φωτομέτρου (AERONET). Οι γραφικές παραστάσεις αφορούν δύο ηλιακές ζενίθιες γωνίες: 20 (αριστερά) και 70 (δεξιά) μοίρες.

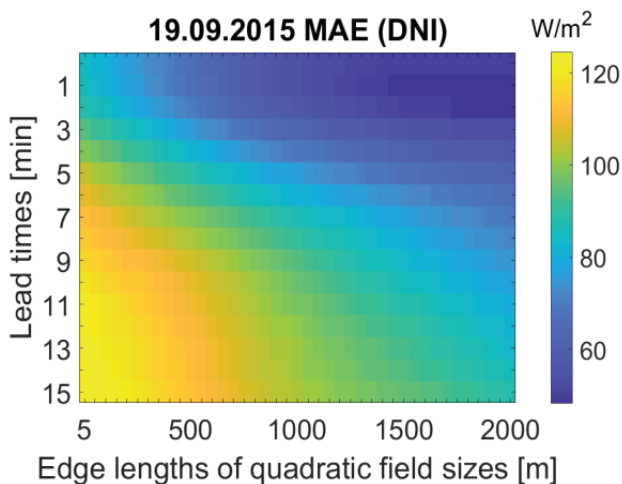
### 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα δεδομένα από τις ψηφιακές απεικονίσεις του ουρανού θόλου εισήχθησαν στο μοντέλο McClean [5] για τον υπολογισμό της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας (direct normal irradiance, DNI). Ένα τυπικό παράδειγμα των αποτελεσμάτων παρουσιάζεται στην εικόνα 5 σε συνδυασμό με τις επίγειες μετρήσεις από ένα πυρηλιόμετρο ( $DNI_{ref}$ ). Οι τιμές από τις ψηφιακές απεικονίσεις παρουσιάζονται και ως μέσες τιμές μίας περιοχής 2x2km ( $DNI_{ASI,avg}$ ) και ως τιμές ακριβώς στη θέση που βρίσκεται το πυρηλιόμετρο ( $DNI_{ASI,pt}$ ). Γενικά, η προτεινόμενη μέθοδος παρουσιάζει διαφορές από τις μετρήσεις σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν κάποια νέφη σε μεγάλο βάθος και με μικρό οπτικό βάθος (νέφη cirrus, π.χ. γύρω στις 15:30), των οποίων η κίνηση δεν μπορεί εύκολα να προβλεφθεί. Αντίθετα, προβλέπεται με ικανοποιητική ακρίβεια οι σημαντικές διακυμάνσεις της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας λόγω οπτικά πυκνότερων νεφών.

Συμπληρωματικά, τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας συγκρίθηκαν με χάρτες σκίασης της υπό μελέτη περιοχής. Οι χάρτες παρήχθησαν με ένα ειδικό σύστημα τεσσάρων καμερών που τοποθετήθηκαν προς διάφορες κατευθύνσεις στην κορυφή του ηλιακού πύργου, ώστε να καλύπτουν μία περιοχή 2x2km, από τους οποίους προέκυψαν και χάρτες για την άμεση ακτινοβολία [6]. Στην εικόνα 6 παρουσιάζεται η διακύμανση του μέσου απόλυτου σφάλματος (Mean Absolute Error, MAE) για την υπό μελέτη περιοχή και για τις προγνώσεις μίας συγκεκριμένης ημέρας με χρονικό ορίζοντα 15 λεπτών. Με βάση τα αποτελέσματα, η χρήση των απεικονίσεων του ουρανού θόλου είναι δυνατόν να οδηγήσει σε πρόγνωση της μέσης τιμής της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας σε μια περιοχή 2x2km με μέσο απόλυτο σφάλμα που κυμαίνεται από 50 έως 80  $W/m^2$  (8-13%) για πρόγνωση με χρονική διάρκεια 1 και 15 λεπτά αντίστοιχα.



Εικόνα 5: Οι τιμές της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας (DNI) από επίγειες μετρήσεις με ένα πυρηνιόμετρο ( $DNI_{ref}$ ) και από τις ψηφιακές απεικονίσεις του ουράνιου θόλου ως μέσες τιμές μίας περιοχής  $2 \times 2 \text{ km}$  ( $DNI_{ASI,avg}$ ) και ως τιμές ακριβώς στη θέση που βρίσκεται το πυρηνιόμετρο ( $DNI_{ASI,pt}$ ) για μία τυπική ημέρα στην υπό μελέτη περιοχή.



Εικόνα 6: Το μέσο απόλυτο σφάλμα (Mean Absolute Error, MAE) για την υπό μελέτη περιοχή και για τις προγνώσεις της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας (DNI) μίας συγκεκριμένης ημέρας (19.09.2015) με χρονικό ορίζοντα 15 λεπτών.

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε ένα σύστημα καμερών απεικόνισης του ουράνιου θόλου με σκοπό την εκτίμηση των ατμοσφαιρικών συνθηκών και την πρόγνωση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας στην Plataforma Solar de Almería.

Εφαρμόστηκαν και βελτιώθηκαν μεθοδολογίες για την εκτίμηση της νεφοκάλυψης, του ύψους, της ταχύτητας και του τύπου της νέφωσης, καθώς και το οπτικό βάθος των αιωρούμενων σωματιδίων. Τα αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκαν σε μοντέλο διάδοσης της ακτινοβολίας και συγκρίθηκαν είτε με επίγειες μετρήσεις είτε με χάρτες σκίασης της υπό μελέτη περιοχής. Τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά: η χρήση των απεικονίσεων του ουράνιου θόλου είναι δυνατόν να οδηγήσει σε πρόγνωση της μέσης τιμής της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας σε μια περιοχή 2x2km με μέσο απόλυτο σφάλμα που κυμαίνεται από 50 έως 80 W/m<sup>2</sup> (8-13%) για πρόγνωση με χρονική διάρκεια 1 και 15 λεπτά αντίστοιχα. Παρόλα αυτά, υπάρχει σημαντικός χώρος για βελτιώσεις, ώστε τέτοιες μορφής προσεγγίσεις να αποτελούν συστήματα αναφοράς με σταθερή και αξιόπιστη χρήση για την επιστημονική κοινότητα της ηλιακής ενέργειας και τους διαχειριστές ηλιακών πάρκων.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

H συγκεκριμένη εργασία πραγματοποιήθηκε με τη χρηματοδότηση της Ευρωπαϊκής Ένωσης μέσω του προγράμματος DNICast (Grant Agreement no. 608623)..

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Kazantzidis, A., Tzoumanikas, P., Bais A.F., Fotopoulos, S., Economou, G., 2012, "Cloud detection and classification with the use of whole-sky ground-based images", *Atmospheric Research*, 113, 80-88.
- [2] Kazantzidis, A., Tzoumanikas P., Nikitidou, E., Salamalikis V., 2017, "All-sky imager: a new instrument for the estimation of solar irradiance, cloudiness and aerosol optical properties", *Proceedings of COMECAP 2016, 19-21/9/2016, Thessaloniki, Greece*, In: *Perspectives on Atmospheric Sciences, Vol. 1*. Edited by: T. S. Karacostas, A. F. Bais and P. T. Nastos, Springer Atmospheric Sciences. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1259pp. ISBN 978-3-319-35094-3, ISBN 978-3-319-35095-0 (eBook), DOI 10.1007/978-3-319-35095-0.
- [3] Kazantzidis, A., Tzoumanikas, P., Nikitidou, E., Salamalikis, V., Wilbert, S., Prah C., 2017, "Application of Simple All-sky Imagers for the Estimation of Aerosol Optical Depth", *SolarPACES Conference 2016, AIP Conference Proceedings 1850, 140012*, doi: 10.1063/1.4984520.
- [4] Blanc, P., Massip, P., Kazantzidis, A., Tzoumanikas, P., Kuhn, P., Wilbert, S., Schüler, D., Prah, C., 2017, "Short-term forecasting of high resolution local DNI maps with multiple fish-eye cameras in stereoscopic mode" *SolarPACES Conference 2016, AIP Conference Proceedings 1850, 140004*, doi: 10.1063/1.4984512.
- [5] Lefèvre, M., Oumbe, A., Blanc, P., Espinar, B., Gschwind, B., Qu, Z., Wald, L., Schroedter-Homscheidt, M., Hoyer-Klick, C., Arola, A., Benedetti, A., Kaiser, J.W., Morcrette, J.J., 2013, "McClear: A New Model Estimating Downwelling Solar Radiation at Ground Level in Clear-Sky Conditions", *Atmospheric Measurement Techniques*, 6, 2403–2418, doi:10.5194/amt-6-2403-2013.
- [6] Kuhn, P., Wilbert, S., Schüler, D., Prah, C., Haase, T., Ramirez, L., Zarzalejo, L., Meyer, A., Vuilleumier, L., Blanc, P., Dubrana, J., Kazantzidis, A., Schroedter-Homscheidt, M., Hirsch, T., Pitz-Paal, R., 2017, "Validation of spatially resolved all sky imager derived DNI nowcasts", *SolarPACES Conference 2016, AIP Conference Proceedings 1850, 140014*, doi: 10.1063/1.4984522

## ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΩΝ ΤΥΠΙΚΩΝ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΤΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

**Κ. Α. Καββαδίας<sup>1\*</sup>, Α. Ε. Καραμάνου<sup>1</sup>, Γ. Τζάνες<sup>1</sup>, Χ. Καμπεζίδης<sup>2</sup>, Κ. Μουστρής<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Εργαστήριο Ήπιων Μορφών Ενέργειας & Προστασίας του Περιβάλλοντος, Τμήμα Μηχ/γων Μηχ/κών Τ.Ε., ΑΕΙ Πειραιά Τ.Τ.

<sup>2</sup> Ομάδα Ατμοσφαιρικής Έρευνας, Ινστιτούτο Ερευνών Περιβάλλοντος & Βιώσιμης Ανάπτυξης, Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών

<sup>3</sup> Εργαστήριο Μηχανικής Ρευστών, Τμήμα Μηχ/γων Μηχ/κών Τ.Ε., ΑΕΙ Πειραιά Τ.Τ.  
email: [kkav@puas.gr](mailto:kkav@puas.gr)

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

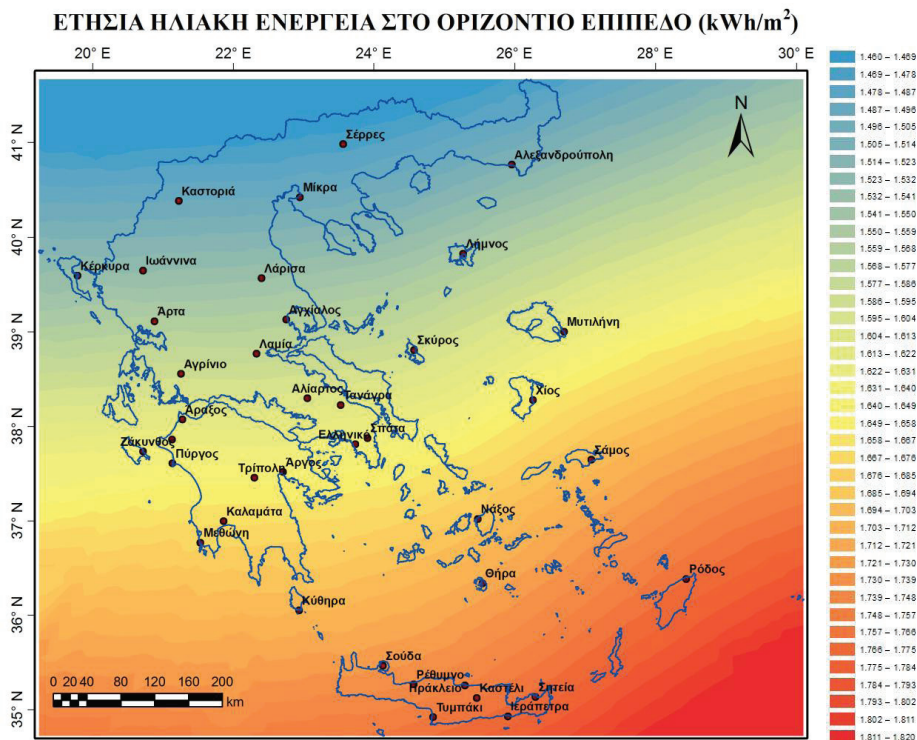
Τις τελευταίες δεκαετίες η αξιοποίηση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) έχει σημειώσει σημαντική αύξηση, με τη μεγαλύτερη να παρουσιάζεται στις εγκαταστάσεις ανεμογεννητριών και φωτοβολταϊκών μονάδων. Το ηλιακό δυναμικό της περιοχής εγκατάστασης αποτελεί τη βασικότερη παράμετρο σχεδιασμού μιας φωτοβολταϊκής μονάδας, καθώς η ηλιακή ακτινοβολία είναι η κύρια πηγή ενέργειας των φωτοβολταϊκών κυψελών. Η χρήση τιμών ηλιακής ενέργειας οι οποίες μπορεί και να αποκλίνουν από τις πραγματικές, έχει σχετικά μικρή επίδραση στην ενεργειακή αξιολόγηση φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων που είναι διασυνδεδεμένες με το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο. Ωστόσο, στις περιπτώσεις των αυτόνομων φωτοβολταϊκών συστημάτων όπου απαιτείται πλήρης ενεργειακή αυτονομία, είναι απαραίτητη η χρήση ωριαίων τιμών ηλιακής ακτινοβολίας με αυξημένο βαθμό αξιοπιστίας, καθώς οι συγκεκριμένες μονάδες απαιτούν εκτός από φωτοβολταϊκά πλαίσια και συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, αυξάνοντας σημαντικά το κόστος εγκατάστασης και κατά συνέπεια το κόστος της παραγόμενης ενέργειας.

Στα πλαίσια αυτά, στην παρούσα εργασία εξετάζεται η χρήση χρονοσειρών ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας αέρα από Τυπικά Μετεωρολογικά Έτη (ΤΜΕ), τα οποία έχουν παραχθεί από μια βάση δεδομένων 12 ετών που έχει συγκροτηθεί για 39 διαφορετικές περιοχές στην Ελλάδα. Το πλεονέκτημα χρήσης των ΤΜΕ, συγκριτικά με τη χρήση χρονοσειρών μεμονωμένων ετών, έγκειται στο γεγονός ότι η ωριαία χρονοσειρά του ΤΜΕ διαμορφώνεται κατά τέτοιον τρόπο, ώστε να αντιπροσωπεύει τις κλιματολογικές συνθήκες που θεωρούνται χαρακτηριστικές κατά τη διάρκεια μιας μακρόχρονης περιόδου σε έναν τόπο.

Πιο συγκεκριμένα, οι τιμές των ΤΜΕ χρησιμοποιούνται για τη βέλτιστη διαστασιολόγηση μιας ολοκληρωμένης φωτοβολταϊκής μονάδας σε συνδυασμό με σύστημα αποθήκευσης της ενέργειας, ικανά να παρέχουν πλήρη ενεργειακή αυτονομία σε οικιακό καταναλωτή στην περιοχή της Ρόδου. Από το πλήθος των συνδυασμών φωτοβολταϊκών πλαισίων και χωρητικότητας συσσωρευτών επιλέγεται ο συνδυασμός που επιτυγχάνει το μικρότερο κόστος παραγωγής. Για τον έλεγχο της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων, η διαδικασία της διαστασιολόγησης επαναλαμβάνεται χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις καθενός εκ των 12 ιστορικών ετών από τα οποία δημιουργήθηκε το ΤΜΕ, ώστε μέσω της συγκριτικής αξιολόγησης να διαπιστωθεί η αξιοπιστία του.

*Λέξεις Κλειδιά: Απομονωμένος Καταναλωτής, Φωτοβολταϊκά, Ενεργειακή Αυτονομία, ΤΜΕ*

Η συνεχής αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας έχει οδηγήσει στην αναζήτηση εναλλακτικών πηγών με αντιπροσωπευτικότερες τις ΑΠΕ. Η αιολική και η ηλιακή ενέργεια αποτελούν τις πιο διαδεδομένες ΑΠΕ στην Ελλάδα, λόγω του εξαιρετικού δυναμικού που διαθέτει [1]. Πιο συγκεκριμένα, το ηλιακό δυναμικό στην Ελληνική επικράτεια κυμαίνεται σε ετήσια βάση από 1450 kWh/m<sup>2</sup> έως 1820 kWh/m<sup>2</sup> στο οριζόντιο επίπεδο (εικ. 1) [2], ενώ υψηλότερες τιμές μπορούν να επιτευχθούν σε επιφάνειες υπό κλίση ή επιφάνειες τοποθετημένες πάνω σε ηλιοστάτες (solar trackers).



Εικόνα 1: Σύγχρονος ηλιακός χάρτης βασισμένος σε TME 39 διαφορετικών περιοχών της Ελλάδας [2]

Σημαντική αύξηση των φωτοβολταϊκών μονάδων στην Ελλάδα σημειώθηκε το 2004, με την ποσότητα της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από αυτές να φθάνει τη 1 GWh [3]. Στη συνέχεια, η αθροιστική εγκατεστημένη ισχύς των φωτοβολταϊκών μονάδων (βιομηχανικής κλίμακας) παρουσίασε εκθετική άνοδο μέχρι και το 2010, στα πλαίσια ισχυρών οικονομικών κινήτρων που δόθηκαν από την Πολιτεία. Ο ρυθμός αύξησης της εγκατεστημένης ισχύος μειώθηκε σημαντικά μετά από μία σειρά νόμων (3734/2009, 3851/2010) με τους οποίους μειώθηκαν οι συμφωνημένες αποζημιώσεις προς τους παραγωγούς [4].

Οι φωτοβολταϊκές μονάδες μπορούν να παράξουν σημαντικές ποσότητες ενέργειας σε περιοχές με μεγάλη ηλιοφάνεια. Ωστόσο, η ενδομερής μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας δημιουργεί ασυμφωνία μεταξύ της ζήτησης ενέργειας οικιακών καταναλωτών και της ενεργειακής παραγωγής φωτοβολταϊκών μονάδων [5]. Η ασυμφωνία αυτή καθιστά ακατάλληλη την αποκλειστική χρήση φωτοβολταϊκών πλαισίων για την εξασφάλιση πλήρους ενεργειακής αυτονομίας. Ως εκ τούτου, για την επίτευξη ενεργειακής αυτονομίας, είναι απαραίτητος ο συνδυασμός φωτοβολταϊκών μονάδων με συστήματα αποθήκευσης ενέργειας [6, 7, 8]. Στα πλαίσια αυτά, στην παρούσα έρευνα μελετάται ο συνδυασμός φωτοβολταϊκής μονάδας και συστήματος αποθήκευσης με σκοπό την πλήρη ενεργειακή

αυτονομία ενός οικιακού καταναλωτή ο οποίος βρίσκεται στην ευρύτερη περιοχή της Ρόδου, περιοχή με υψηλό ηλιακό δυναμικό (εικ. 1).

Η διαστασιολόγηση του συστήματος πραγματοποιήθηκε με τη χρήση διαφορετικών χρονοσειρών δεδομένων ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας αέρα, που αντιπροσωπεύουν την υπό εξέταση περιοχή. Οι χρονοσειρές αυτές αποτελούνται από ωριαίες τιμές 12 ετών της περιόδου 1985-1999, τη μέση ωριαία χρονοσειρά της περιόδου και τη χρονοσειρά του Τυπικού Μετεωρολογικού Έτους (ΤΜΕ). Επιπλέον, εξετάστηκαν δύο διαφορετικές τεχνολογίες για τη σύνθεση του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας (μολύβδου-οξέος και ιόντων λιθίου). Παράλληλα, η παραπάνω μονάδα συνδυάστηκε και με ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος (diesel) για τη μελέτη περιπτώσεων κάλυψης μέρους της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας από εναλλακτική πηγή.

Η προσομοίωση του συστήματος έγινε με τη χρήση του λογισμικού Energy System Analysis (ESA), το οποίο έχει αναπτυχθεί από το εργαστήριο Ήπιων Μορφών Ενέργειας και Προστασίας Περιβάλλοντος (ΗΜΕ&ΠΡΟΠΕ) του Α.Ε.Ι Πειραιά Τ.Τ. Το συγκεκριμένο λογισμικό παρέχει τη δυνατότητα προσομοίωσης υβριδικών εγκαταστάσεων ΑΠΕ με ωριαίο βήμα, εξετάζοντας όλους τους δυνατούς συνδυασμούς μονάδων παραγωγής και συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας, εξάγοντας όλα τα απαραίτητα αποτελέσματα για την αναζήτηση των βέλτιστων λύσεων.

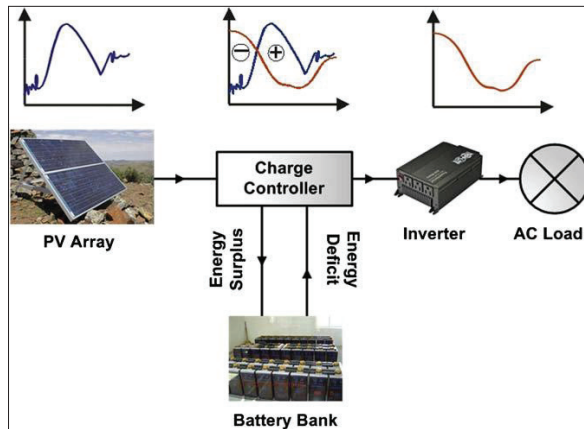
## 2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, στην παρούσα εργασία διερευνάται ο οικονομικά βέλτιστος συνδυασμός φωτοβολταϊκής μονάδας-συσσωρευτών, που αποτελούν μια ολοκληρωμένη εγκατάσταση ικανή να καλύψει πλήρως τις ηλεκτρικές ανάγκες ενός αυτόνομου καταναλωτή. Ειδικότερα, η εγκατάσταση αποτελείται από ένα ή περισσότερα φωτοβολταϊκά πλαίσια ονομαστικής ισχύος 320 W<sub>p</sub> και μέγιστης απόδοσης 16,5%, από μία ή περισσότερους συσσωρευτές οξέος-μολύβδου ή ιόντων λιθίου (Πίνακας 1), από έναν αντιστροφέα, ο οποίος μετατρέπει το ηλεκτρικό ρεύμα από συνεχές σε εναλλασσόμενο και από έναν ρυθμιστή φόρτισης, ο οποίος ελέγχει το επίπεδο φόρτισης των συσσωρευτών και ρυθμίζει το σημείο λειτουργίας της φωτοβολταϊκής μονάδας (εικ. 2). Ο αντιστροφέας και ο ρυθμιστής φόρτισης προσαρμόζονται ανάλογα με τις ηλεκτρικές απαιτήσεις των διαφόρων συνδυασμών φωτοβολταϊκής μονάδας και συσσωρευτών της εγκατάστασης. Στα πλαίσια της εύρεσης του ελάχιστου κόστους παραγωγής ενέργειας για διαφορετικούς βαθμούς αυτονομίας, μελετήθηκε και η ενσωμάτωση, στο παραπάνω σύστημα, ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους (diesel).

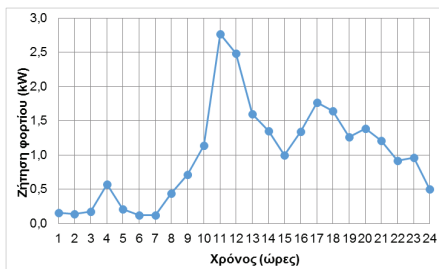
Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά συσσωρευτών [9], [10].

Τύπος	Οξέος-Μολύβδου	Λιθίου-Ιόντος
Βάθος εκφόρτισης (%)	50	80
Βαθμός απόδοσης (%)	75	97
Κόστος (€/kWh)	105	500
Αναμενόμενος χρόνος ζωής (έτη)	2	6

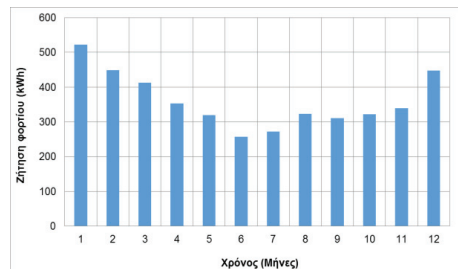
Για τη μελέτη της ενεργειακής αυτονομίας χρησιμοποιήθηκε συγκεκριμένο προφίλ οικιακού καταναλωτή, το οποίο έχει προκύψει από μετρήσεις σε κατοικία τετραμελούς οικογένειας χωρίς να περιλαμβάνει φορτία θέρμανσης και ψύξης του χώρου. Στην εικόνα 3 παρουσιάζεται το προφίλ της ηλεκτρικής ζήτησης την 31<sup>η</sup> Ιανουαρίου, όπου συναντάται και το μέγιστο φορτίο (2,8 kW). Όσον αφορά στη μηνιαία κατανάλωση ενέργειας, η ελάχιστη κατανάλωση σημειώνεται το μήνα Ιούνιο, ενώ η μέγιστη τον Ιανουάριο (εικ. 4).



Εικόνα 2: Σχηματική διάταξη αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος [11]

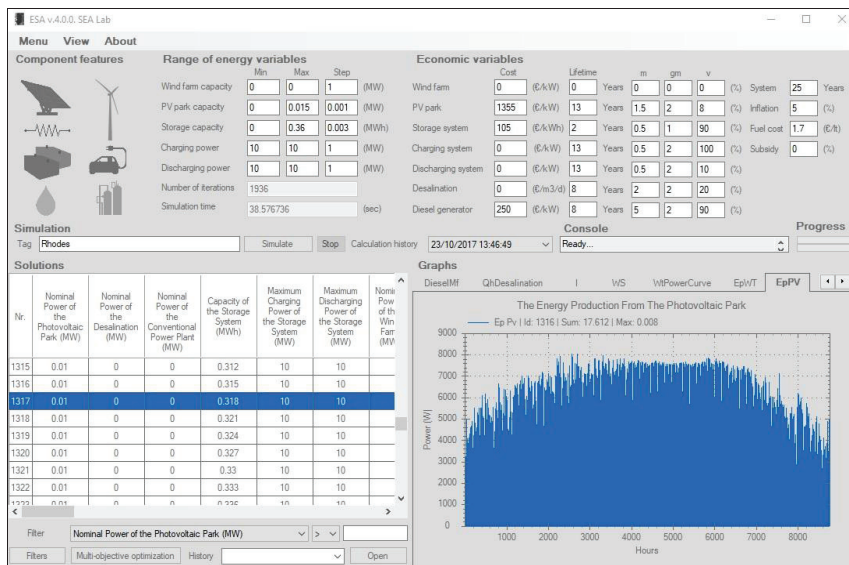


Εικόνα 3: Ωριαίο προφίλ κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας την 31<sup>η</sup> Ιανουαρίου



Εικόνα 4: Μηνιαία κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας

Για τον προσδιορισμό της οικονομικότερης λύσης για την πλήρη κάλυψη των φορτίων, απαιτήθηκε η εξέταση όλων των δυνατών συνδυασμών με μικρό βήμα μεταβολής της ισχύος των μονάδων παραγωγής (φωτοβολταϊκών πλαισίων, ηλεκτρογεννήτριας) και της χωρητικότητας των συσσωρευτών. Πιο συγκεκριμένα, εξετάστηκαν 2000 διαφορετικοί συνδυασμοί φωτοβολταϊκών πλαισίων – ηλεκτρογεννήτριας - συσσωρευτών και για κάθε συνδυασμό πραγματοποιήθηκε προσομοίωση σε ωριαίο βήμα για ένα έτος, χρησιμοποιώντας κάθε φορά διαφορετικά δεδομένα εισόδου. Ειδικότερα, χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου 14 διαφορετικές χρονοσειρές που περιλαμβάνουν τις μετρήσεις των 12 ετών (περίοδος 1985-1999) από τα οποία έχει παραχθεί το TME, τη χρονοσειρά του TME καθώς και τη μέση χρονοσειρά της περιόδου, η οποία έχει προκύψει από τις μέσες ωριαίες τιμές. Ο απαιτηθείς συνολικός αριθμός προσομοιώσεων αγγίζει τις 28000. Οι προσομοιώσεις αυτές πραγματοποιήθηκαν με το λογισμικό Energy System Analysis (ESA) του εργαστηρίου ΗΜΕ&ΠΡΟΠΕ (εικ. 5.)



Εικόνα 5: Κεντρική οθόνη εισαγωγής δεδομένων του λογισμικού ESA

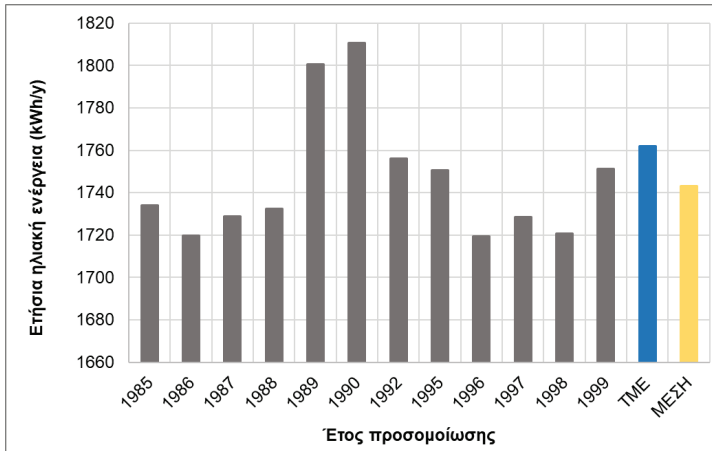
Για την οικονομική αξιολόγηση των εξεταζόμενων εγκαταστάσεων χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω οικονομικά μεγέθη: ανηγμένο κόστος φωτοβολταϊκών πλαισίων 1350 €/kW<sub>p</sub>, κόστος συντήρησης 1,5% με μέσο ετήσιο ρυθμό αναπροσαρμογής 2%. Η διάρκεια ζωής του συστήματος ορίστηκε στα 25 χρόνια, με τον αντίστοιχο μέσο πληθωρισμό της 25ετίας να είναι της τάξης του 5%.

### 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

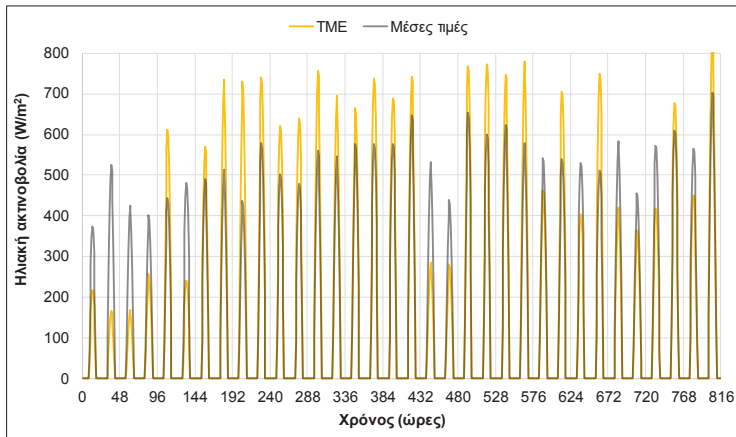
Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, χρησιμοποιήθηκαν κατά την προσομοίωση των υπό εξέταση εγκαταστάσεων τιμές ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας περιβάλλοντος από τις ωριαίες χρονοσειρές των ετών 1985-1999, όπως επίσης και η χρονοσειρά του TME και του μέσου έτους της 15-ετίας.

Στην εικόνα 6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ετήσιας ηλιακής ενέργειας στο οριζόντιο επίπεδο στην περιοχή της Ρόδου, για τα μεμονωμένα έτη της υπό εξέταση 15ετίας, του μέσου έτους καθώς και του TME. Όπως εύκολα διακρίνεται από το διάγραμμα, το TME εμφανίζει ελάχιστη υψηλότερη τιμή (1762 kWh/m<sup>2</sup>/y) από την αντίστοιχη τιμή του μέσου έτους (1743 kWh/m<sup>2</sup>/y), ενώ από τις χρονοσειρές των ιστορικών ετών ξεχωρίζουν οι αυξημένες τιμές ηλιακής ενέργειας των ετών 1989 και 1990 που παρουσιάζουν αύξηση έως και 5% σε σχέση με τα υπόλοιπα έτη.

Παρόλο που οι ετήσιες τιμές ηλιακής ενέργειας TME και μέσου έτους παρουσιάζουν μικρή διαφορά, η δημιουργία χρονοσειρών ηλιακής ακτινοβολίας με μέσο όρο, έχει ως αποτέλεσμα μια εξομαλυμένη και μη ρεαλιστική καμπύλη, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα της εικόνας 7, όπου παρουσιάζεται η μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας του μέσου έτους καθώς και του TME, για το μήνα Ιανουάριο κατά τον οποίο ο οικιακός καταναλωτής εμφανίζει τις υψηλότερες ενεργειακές καταναλώσεις. Ενδεικτικά, αναφέρεται ότι, ενώ η πιθανότητα εμφάνισης τιμών ηλιακής ακτινοβολίας άνω των 750 W/m<sup>2</sup> για τα ιστορικά έτη κυμαίνεται μεταξύ 9% και 11%, η αντίστοιχη πιθανότητα για τη χρονοσειρά του μέσου έτους είναι μετατοπισμένη κάτω από την ελάχιστη τιμή κατά 2%.

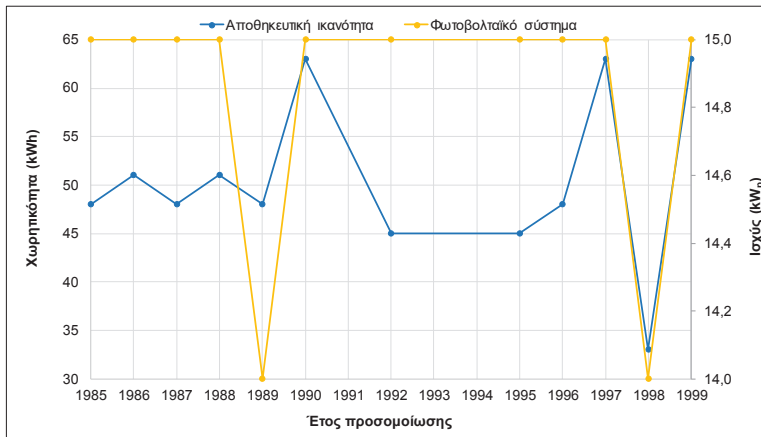


Εικόνα 6: Ετήσια ηλιακή ενέργεια στο οριζόντιο επίπεδο



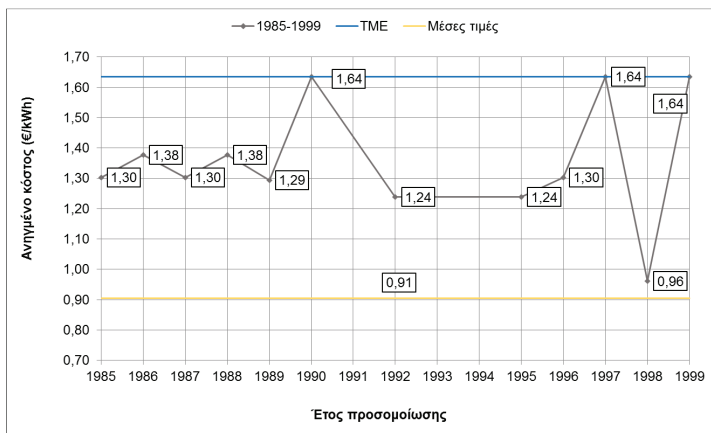
Εικόνα 7: Ωριαία μεταβολή ηλιακής ακτινοβολίας το μήνα Ιανουάριο

Το αποτέλεσμα αυτής της αλλοίωσης του προφίλ της ηλιακής ακτινοβολίας οδηγεί εσφαλμένα σε βελτίωση της συμφωνίας παραγωγής και ζήτησης, με αποτέλεσμα την υποεκτίμηση των πραγματικά απαιτούμενων διαστάσεων της εγκατάστασης φωτοβολταϊκής μονάδας-συσσωρευτών. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση της διαστασιολόγησης με βάση το TME και για την επίτευξη 100% αυτονομίας, ο οικονομικότερος συνδυασμός περιλαμβάνει την εγκατάσταση 15 kW<sub>p</sub> φωτοβολταϊκών πλαισίων και χωρητικότητα συσσωρευτών 63 kWh, ενώ για το μέσο έτος οι τιμές αυτές μειώνονται αντίστοιχα στα 11 kW<sub>p</sub> και 33 kWh. Συγκρίνοντας τις τιμές αυτές με τις τιμές της εικόνας 8, που παρουσιάζει τις ελάχιστες διαστάσεις για την επίτευξη πλήρους αυτονομίας, η εγκατάσταση που προέκυψε με τη χρήση του μέσου έτους δεν θα ήταν σε θέση να καλύψει πλήρως τις ηλεκτρικές ανάγκες του συγκεκριμένου καταναλωτή.



Εικόνα 8: Συνδυασμοί οικονομικότερων λύσεων για πλήρη αυτονομία οικιακού καταναλωτή στη Ρόδο, με τη χρήση μετεωρολογικών δεδομένων διαφορετικών ετών

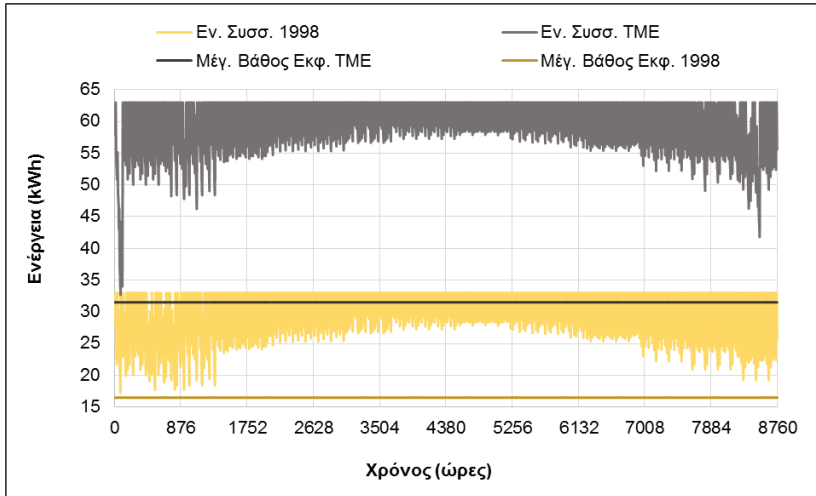
Αντίστοιχα, στην εικόνα 9, παρουσιάζεται το κόστος παραγωγής ανά kWh<sub>e</sub>, χρησιμοποιώντας ως βάση τα διαφορετικά έτη για τη διαστασιολόγηση του συστήματος, στα πλαίσια της πλήρους κάλυψης των ηλεκτρικών αναγκών με τη χρήση μόνο ΑΠΕ. Το ανηγμένο κόστος, που προκύπτει από τη διαστασιολόγηση με τη χρήση του μέσου έτους, είναι σχεδόν το μισό του κόστους που προκύπτει από τη χρήση των χρονοσειρών των ετών 1990, 1997, 1999 και του ΤΜΕ.



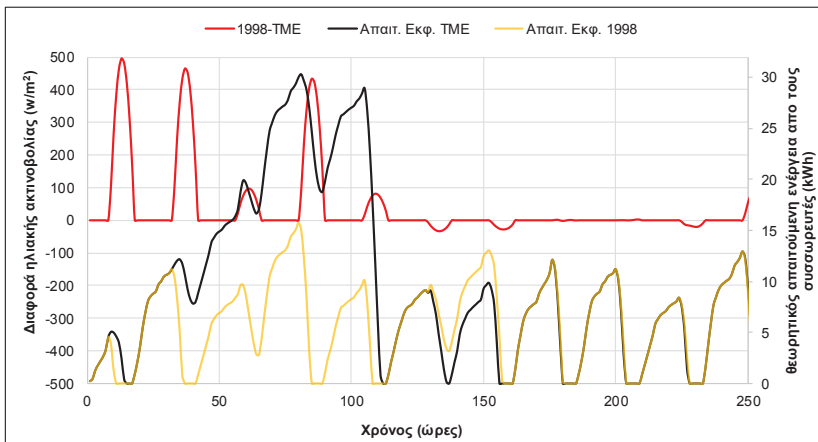
Εικόνα 9: Κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας συνδυασμών φωτοβολταϊκής μονάδας και συσσωρευτών που εξασφαλίζουν πλήρη αυτονομία με τη χρήση μετεωρολογικών δεδομένων διαφορετικών ετών

Στο σημείο αυτό, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι βασικό στοιχείο στη διαμόρφωση των διαστάσεων του συστήματος και της μεταβολής του κόστους από 0,96 €/kWh έως 1,64 €/kWh, αποτελούν οι πρώτες 200 ώρες λειτουργίας του συστήματος, καθώς τις ώρες αυτές παρουσιάζονται αυξημένες τιμές ηλεκτρικού φορτίου με μεγάλη διάρκεια, ενώ παράλληλα η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας κινείται σε χαμηλά επίπεδα. Εξετάζοντας τις χρονοσειρές που εμφανίζουν τις δύο ακραίες τιμές κόστους (ΤΜΕ και έτος 1998), στις εικόνες 10 και 11 παρουσιάζονται η στάθμη των συσσωρευτών στη διάρκεια ενός έτους, η διαφορά τιμών ηλιακής ακτινοβολίας μεταξύ των δύο ετών, που θεωρούνται με την οπτική

γωνία της διαστασιολόγησης για 100% αυτονομία από ΑΠΕ, είναι σε θέση να καλύψει τις ακραίες περιπτώσεις της υπό μελέτη περιόδου.



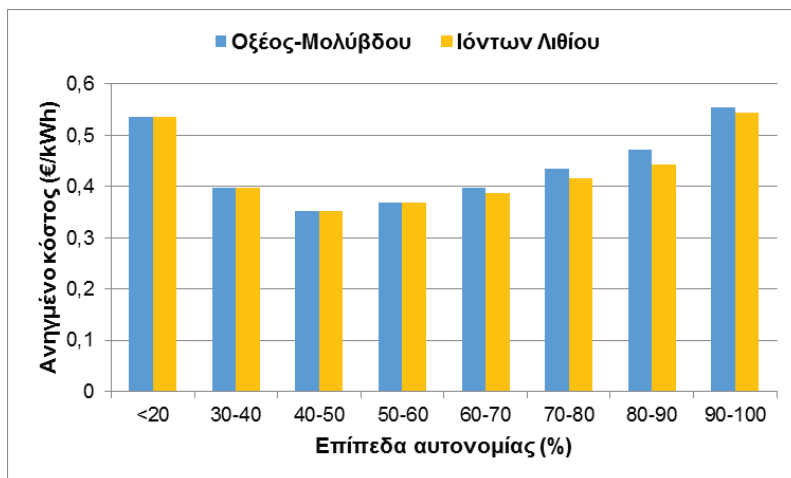
Εικόνα 10: Ωριαίες τιμές στάθμης των συσσωρευτών για το έτος 1998 και το TME



Εικόνα 11: Απαιτούμενη ενέργεια από τους συσσωρευτές για την κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών του καταναλωτή σε σχέση με τη διαφορά τιμών της έντασης της ακτινοβολίας του TME και του έτους 1998

Από τη χρήση του TME προέκυψε ότι το ελάχιστο ανηγμένο κόστος για να επιτευχθεί 100% ενεργειακή αυτονομία είναι  $1,64 \text{ €/kWh}$ . Προκειμένου να βρεθεί μια οικονομικότερη λύση για τον οικιακό καταναλωτή, πραγματοποιήθηκε αναζήτηση του ελάχιστου ανηγμένου κόστους για βαθμό ενεργειακής κάλυψης από ΑΠΕ 20-100% και για δύο διαφορετικές τεχνολογίες συσσωρευτών (εικ. 12). Από την αναζήτηση προέκυψε ότι η οικονομικότερη λύση βρίσκεται σε βαθμό αυτονομίας 40-50% και πιο συγκεκριμένα 46,7% με κόστος παραγωγής  $0,35 \text{ €/kWh}$  και για τα δύο είδη συσσωρευτών, με την υπόλοιπη απαιτούμενη ενέργεια να καλύπτεται από ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος ονομαστικής ισχύος 2 kW. Συγκρίνοντας την επιλογή συσσωρευτών οξέος-μολύβδου και ιόντων λιθίου το κόστος παραγωγής παρουσιάζει μικρές διαφορές για βαθμούς αυτονομίας έως 60%, ενώ για μεγαλύτερη

ακτινοβολία οι συσσωρευτές ιόντων λιθίου παρουσιάζουν μικρότερο κόστος, καθώς έχουν μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης και μεγαλύτερο βάθος εκφόρτισης.



Εικόνα 12: Ανηγμένο κόστος παραγωγής για κάθε επίπεδο αυτονομίας από τη χρήση ΤΜΕ για τα δύο είδη συσσωρευτών

#### 4. Συμπεράσματα

Λόγω της μεταβλητότητας που χαρακτηρίζει τις ΑΠΕ, η χρήση ανεμογεννητριών και φωτοβολταϊκών πλαισίων για την επίτευξη ενεργειακής αυτονομίας καθιστά απαραίτητο το συνδυασμό τους με συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, αυξάνοντας σημαντικά το κόστος εγκατάστασης. Η διαστασιολόγηση των αυτόνομων υβριδικών συστημάτων αποτελεί πολύπλοκη διαδικασία που απαιτεί αναλυτική προσομοίωση, η οποία είναι απολύτως απαραίτητη για την εύρεση των ελάχιστων απαιτούμενων διαστάσεων. Στα πλαίσια αυτά, το εργαστήριο ΗΜΕ&ΠΡΟΠΕ δημιούργησε κατάλληλο λογισμικό που επιτρέπει την προσομοίωση της λειτουργίας αυτόνομων υβριδικών συστημάτων ΑΠΕ που έχει τη δυνατότητα να εξετάζει πλήθος συνδυασμών με μοναδικό όριο τις δυνατότητες του υπολογιστικού συστήματος που χρησιμοποιείται. Στην παρούσα εργασία το λογισμικό χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη απομονωμένου οικιακού καταναλωτή στην περιοχή της Ρόδου, μεταβάλλοντας τα μετεωρολογικά δεδομένα εισόδου, με στόχο την αξιολόγηση των διαφορετικών λύσεων που προκύπτουν από τη χρήση χρονοσειρών ΤΜΕ σε σύγκριση με χρονοσειρές ιστορικών ετών καθώς και της μέσης χρονοσειράς τους.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της εργασίας, η χρήση του ΤΜΕ στη διαστασιολόγηση αυτόνομων φωτοβολταϊκών μονάδων παρουσιάζει σημαντικά αυξημένη αξιοπιστία από τη χρήση είτε ετήσιας χρονοσειράς ιστορικών ετών είτε μέσων τιμών μιας μακράς περιόδου. Πιο συγκεκριμένα, το μέγεθος της εγκατάστασης που προέκυψε από τη χρήση του ΤΜΕ είναι σε θέση να καλύψει πλήρως τις ανάγκες του υπό εξέταση καταναλωτή, εν αντιθέσει με την περίπτωση χρήσης της μέσης χρονοσειράς των ιστορικών ετών.

Ωστόσο, ιδιαίτερη προσοχή απαιτούν οι περιπτώσεις όπου η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας του καταναλωτή εμφανίζει υψηλά φορτία μεγάλης διάρκειας σε συγκεκριμένους μήνες, καθώς από τους μήνες αυτούς καθορίζεται και η τελική επιλογή της εγκατάστασης. Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας έδειξαν ότι η χρήση του ΤΜΕ μπορεί να εξασφαλίσει ότι η εγκατάσταση που προκύπτει από τη διαστασιολόγηση μπορεί να ικανοποιήσει πλήρως τις ενεργειακές ανάγκες του καταναλωτή και βρίσκεται σε συμφωνία με τις αντίστοιχες εγκαταστάσεις που προκύπτουν από τη χρήση χρονοσειρών των ιστορικών ετών.

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] Kaldellis, J.K., Zafirakis, D., Kavadias, K. and Kondili, E., 2012, "Optimum PV-diesel hybrid systems for remote consumers of the Greek territory", *Applied Energy*, 91, pp. 61-67.
- [2] Kambezidis, H.D., Psiloglou, B.E. Kavadias, K.A., Paliatsos, A.G. and Bartzokas, A., 2016, "Development of a Greek solar map based on solar model estimations", *Sun and geosphere*,11(2), pp. 137-141.
- [3] International Energy Agency, <http://www.iea.org>, Statistics, Greece: Electricity and Heat for 2015.
- [4] Zafirakis, D., Chalvatzis, K. and Kaldellis, J.K., 2013, "Socially just, support mechanisms for the promotion of renewable energy source in Greece", *Renewable and sustainable energy*, 21, pp. 478-493.
- [5] Deshmukh, M.K. and Deshmukh, S.S, 2006, "Modelling of hybrid renewable energy systems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*,12(1), pp. 235-249.
- [6] Zafirakis, D., Kavadias, K., Kondili, E.M., and Kaldellis, J., 2011, "Optimum Sizing of a PV-Battery-Diesel Hybrid System for Remote Consumers", *Third International Conference on Applied Energy - 16-18 May 2011 - Perugia, Italy*.
- [7] Kaldellis, J.K., Zafirakis, D., and Kondili, E., 2009, "Optimum sizing of photovoltaic - energy storage systems for autonomous small islands", *Electrical Power and Energy Systems*, pp.24-36.
- [8] Kavadias, K.A., Zafirakis, D. and Paliatsos, A.G., 2016, "Application of Typical Meteorological Years for sizing building integrated PV systems under zero load rejections", *The 8<sup>th</sup> International Conference on Applied Energy – ICAE2016*.
- [9] Albright, G., Edie, J. and Al-Hallaj, S., 2012, "A Comparison of Lead Acid to Lithium-ion in Stationary Storage Applications", *Published by AllCell Technologies LLC*.
- [10] Li-Ion vs. Lead Acid. [www.ultralifecorp.com](http://www.ultralifecorp.com)
- [11] Kaldellis, J.K., Zafirakis, D., and Kondili, E., 2009, "Optimum autonomous stand-alone photovoltaic system design on the basis of energy pay-back analysis", *Energy*, 34, pp.1187–1198.

## ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΣΕ ΣΤΑΘΜΟΥΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΕΜΥ ΣΤΗ ΝΟΤΙΟ ΕΛΛΑΔΑ

Ιφιγένεια Τσιμούρα\*, Ιωάννης Σιδηρόπουλος, Ειρήνη Τσιγαρά,  
Γεώργιος Τσιλιγκιρίδης

ΑΠΘ, Τμ. Μηχανολόγων Μηχανικών, Εργ. Κατασκευής Συσκευών Διεργασιών  
\*e-mail: [ifigeneia99@outlook.com](mailto:ifigeneia99@outlook.com)

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια αυξάνεται ιδιαίτερα το ενδιαφέρον για συστήματα εκμετάλλευσης της αποθηκευμένης στο έδαφος θερμότητας, κυρίως μέσω οριζόντιων και κατακόρυφων γεωεναλλακτών. Η θερμοκρασία του εδάφους αποτελεί δείκτη αυτής της αποθηκευμένης θερμότητας και η γνώση της σε συνδυασμό με την εποχική μεταβολή της αποτελεί σημαντικό παράγοντα για το σχεδιασμό και τη διαστασιολόγηση γεωθερμικών συστημάτων καθώς επίσης και συστημάτων διεποχιακής αποθήκευσης θερμότητας στο έδαφος.

Στην παρούσα εργασία μελετάται η μεταβολή της θερμοκρασίας του εδάφους σε σταθμούς μέτρησης της ΕΜΥ στη Νότιο Ελλάδα. Για το σκοπό αυτό γίνεται επεξεργασία διαθέσιμων μετρήσεων θερμοκρασίας ατμοσφαιρικού αέρα και θερμοκρασίας εδάφους στα βάθη 2, 5, 10, 20, 50 και 100 cm, για την περίοδο 1999-2003 για οκτώ διαφορετικούς σταθμούς της ΕΜΥ. Αναλύονται και συγκρίνονται μεταξύ τους οι μέσες μηνιαίες τιμές και γίνεται σύγκριση των μελετώμενων σταθμών ως προς τη μεταβολή με το βάθος του θερμοκρασιακού προφίλ του εδάφους τους.

Επίσης, μελετάται η εξάρτηση της θερμοκρασίας του εδάφους σε διάφορα βάθη από τη θερμοκρασία του ατμοσφαιρικού αέρα, η οποία αποτελεί μέγεθος εύκολα μετρήσιμο και διαθέσιμο σε όλη τη χώρα, και επιχειρείται η διατύπωση αναλυτικών εξισώσεων, οι οποίες να εκφράζουν τη μεταβολή των μηνιαίων τιμών της θερμοκρασίας του εδάφους σε διάφορα βάθη σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία του ατμοσφαιρικού αέρα. Οι εξισώσεις αυτές αξιολογήθηκαν με βάση τις ιστορικά παρατηρηθείσες τιμές.

Η διατύπωση των αναλυτικών αυτών συναρτήσεων μπορεί να αξιοποιηθεί ώστε να προκύψουν συναρτήσεις γενικής χρήσης, ανεξαρτήτως της γεωγραφικής περιοχής, που θα επιτρέπουν την εκτίμηση της θερμοκρασίας του εδάφους σε διάφορα βάθη σε σχέση με τη θερμοκρασία του ατμοσφαιρικού αέρα.

**Λέξεις Κλειδιά:** Θερμοκρασία εδάφους, Θερμοκρασία ατμοσφαιρικού αέρα, Θερμοκρασιακό προφίλ, ΕΜΥ

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η θερμοκρασιακή συμπεριφορά των επιφανειακών στρωμάτων του εδάφους έχει διακυμάνσεις από μήνα σε μήνα, καθώς επηρεάζεται από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, τις βροχοπτώσεις, τις εποχιακές διακυμάνσεις της θερμοκρασίας, την ταχύτητα του ανέμου αλλά και από άλλους παράγοντες. Η χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας των επιφανειακών στρωμάτων του εδάφους αποτελεί θεμελιώδη παράγοντα για την κατανόηση των φαινομένων που συμβαίνουν σε αυτό καθώς και στο στρώμα της ατμόσφαιρας που βρίσκεται σε αλληλεπίδραση με αυτό.

Από ενεργειακής πλευράς, η θερμοκρασία του εδάφους είναι ο δείκτης της αποθηκευόμενης στο έδαφος θερμότητας. Κατά συνέπεια, η γνώση της αποτελεί σημαντική παράμετρο, στην αξιολόγηση του ενεργειακού δυναμικού του εδάφους και αποτελεί απαραίτητο στοιχείο για το σχεδιασμό, την ανάπτυξη και την εξέλιξη συστημάτων εκμετάλλευσης της θερμότητάς του. Τέτοιου τύπου συστήματα, τα οποία εκμεταλλεύονται την αποθηκευμένη στο έδαφος θερμότητα, αποτελούνται από υπόγειες σωληνώσεις στις οποίες κυκλοφορεί αέρας ή νερό προτού εισέλθουν για θέρμανση ή ψύξη σε κάποιο κτίριο. Συνήθως, τα συστήματα αυτά λειτουργούν με τη βοήθεια γεωθερμικής αντλίας θερμότητας. Στα συστήματα κατακόρυφης τοποθέτησης οι αγωγοί τοποθετούνται σε βάθος έως 180 m, ενώ στα οριζόντια συστήματα σε βάθος έως 3 m [1]. Η γνώση της θερμοκρασίας του εδάφους είναι επίσης σημαντική σε υπόγεια συστήματα αποθήκευσης θερμότητας, καθώς επίσης και στον σχεδιασμό υπόγειων σωληνώσεων θέρμανσης [2].

Η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση τεχνολογιών φιλικών προς το περιβάλλον, καθιστούν την μελέτη του ενεργειακού περιεχομένου του εδάφους, απαραίτητη. Ο μεγαλύτερος όγκος ερευνών πάνω στο θέμα της θερμοκρασίας του εδάφους, αφορά στην παραγωγή και αξιολόγηση μοντέλων, τα οποία επιχειρούν να προβλέψουν τη θερμοκρασία εδάφους σε διάφορα βάθη [3-19].

Στην παρούσα εργασία μελετάται η μεταβολή της θερμοκρασίας του εδάφους σε σχέση με τη θερμοκρασία του ατμοσφαιρικού αέρα σε οκτώ (8) σταθμούς μέτρησης της EMY στη Νότιο Ελλάδα, και γίνεται προσπάθεια διατύπωσης εξισώσεων που θα επιτρέπουν τον υπολογισμό της θερμοκρασίας του εδάφους σε διάφορα βάθη συναρτήσει της θερμοκρασίας του αέρα.

## 2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας έγινε ταξινόμηση και στατιστική επεξεργασία 284.600 μετρήσεων οι οποίες αφορούν ημερήσιες τιμές θερμοκρασίας του αέρα και του εδάφους σε συγκεκριμένα βάθη. Οι μετρήσεις αφορούσαν τη μέγιστη, ελάχιστη και μέση θερμοκρασία του ατμοσφαιρικού αέρα για την πενταετία 1999-2003 σε οκτώ περιοχές της Νοτίου Ελλάδας όπου βρίσκονται οι αντίστοιχοι σταθμοί της EMY (Εικόνα 1). Αντίστοιχα έγινε μέτρηση τριών στιγμιαίων τιμών θερμοκρασίας εδάφους στα βάθη 2, 5, 10, 20, 50 και 100 cm στους παραπάνω σταθμούς τη συγκεκριμένη περίοδο. Οι παραπάνω στιγμιαίες μετρήσεις λαμβάνονταν συστηματικά σε ημερήσια βάση τις ώρες 6:00, 12:00 και 18:00. Για τον προσδιορισμό μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας εδάφους λήφθηκε υπόψιν ο μέσος όρος των τριών μετρούμενων στιγμιαίων τιμών καθώς και μιας τέταρτης τιμής, η οποία προκύπτει από τη μέση τιμή της στιγμιαίας μέτρησης στις 18:00 και της στιγμιαίας μέτρησης της επόμενης μέρας στις 06:00, καθώς έπρεπε να ληφθεί υπόψιν η χρονική διάρκεια της νύκτας κατά την οποία δεν επιδρά η ηλιακή ακτινοβολία.

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

Συνολικά, η πληρότητα των μετρήσεων και για τους οκτώ σταθμούς είναι 94%. Αν εξαιρέσουμε τις ελλείψεις για μεγάλα συνεχόμενα χρονικά διαστήματα που υπάρχουν σε κάποια βάθη ορισμένων περιοχών, η πληρότητα των δεδομένων είναι 97%.

Οι μετρήσεις της θερμοκρασίας του ατμοσφαιρικού αέρα είναι πλήρεις σε όλους τους σταθμούς εκτός από το σταθμό της Ανδραβίδας που είναι 85%, του Βέλου 92% και της Ιεράπετρας 96%.

Οι μετρήσεις των τιμών της θερμοκρασίας του εδάφους στους εξεταζόμενους σταθμούς παρουσιάζουν υψηλά ποσοστά πληρότητας. Συγκεκριμένα, η πληρότητα των μετρήσεων στην Ανδραβίδα είναι 96%, στο Βέλο 99%, στον Πύργο 99% και στην Τρίπολη 99%. Στο Άργος, όπως και στην Ιεράπετρα παρατηρήθηκαν τιμές οι οποίες αξιολογήθηκαν ως μη αξιόπιστες, για αυτό το λόγο

δεν ελήφθησαν υπόψιν. Για το σταθμό του Άργους οι τιμές που εξετάστηκαν αφορούν την περίοδο 1999 έως και το Σεπτέμβριο του 2000 και η πληρότητα των δεδομένων αυτών είναι 100%, ενώ στο σταθμό της Ιεράπετρας οι τιμές που ελήφθησαν υπόψη αφορούν επίσης την ίδια περίοδο και η πληρότητα των τιμών είναι 96%. Στο σταθμό της Καλαμάτας η πληρότητα είναι 90% καθώς λείπουν στα 50 cm όλες οι τιμές από το Μάιο του 2002 έως το Δεκέμβριο του 2003 και στα 100 cm ολόκληρο το έτος 1999 έως τον Αύγουστο του 2000. Χωρίς τις παραπάνω ελλείψεις η πληρότητα των υπολοίπων δεδομένων στην Καλαμάτα είναι 99%. Ο σταθμός του Τυμπακίου είναι αυτός που παρουσιάζει τις περισσότερες ελλείψεις καθώς λείπουν τα 2 cm για ολόκληρη την εξεταζόμενη περίοδο, ενώ ελλείψεις παρουσιάζονται και στα 5, 20 και 50 cm. Η πληρότητα των μετρήσεων στο συγκεκριμένο σταθμό είναι 72%, ωστόσο αν εξαιρέσουμε τα 2 cm η πληρότητα ανεβαίνει στο 83%.



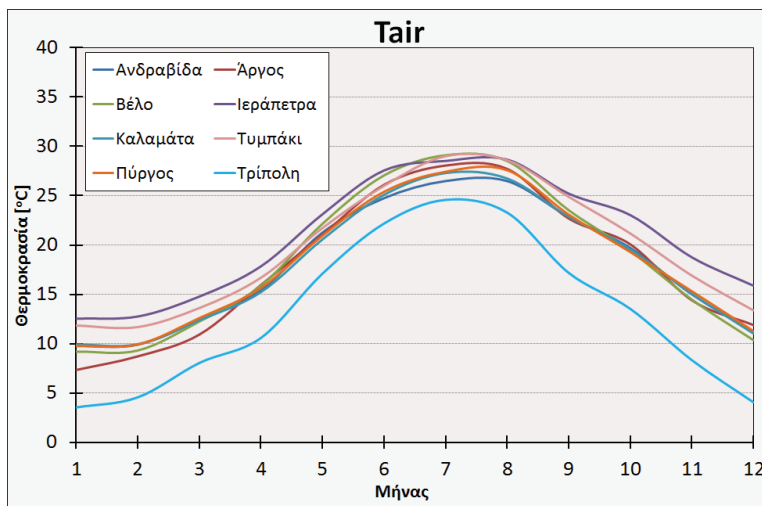
Εικόνα 1: Εξεταζόμενοι σταθμοί της ΕΜΥ στη Νότιο Ελλάδα

### 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

#### 3.1. Μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες ατμοσφαιρικού αέρα

Στην Εικόνα 2 παρουσιάζεται η μηνιαία διακύμανση της θερμοκρασίας του ατμοσφαιρικού αέρα την περίοδο 1999-2003 στους εξεταζόμενους σταθμούς. Οι μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες ατμοσφαιρικού αέρα για την Ιεράπετρα και το Άργος αφορούν μόνο τα έτη 1999-2000 καθώς τα δεδομένα για το υπόλοιπο της περιόδου αξιολογήθηκαν ως μη αξιόπιστα. Παρατηρούμε ότι:

- Η μέγιστη μέση θερμοκρασία ατμοσφαιρικού αέρα εμφανίζεται για όλες τις περιοχές το μήνα Ιούλιο εκτός από την Ιεράπετρα και τον Πύργο, όπου εμφανίζεται το μήνα Αύγουστο.
- Η μέγιστη μέση μηνιαία θερμοκρασία ατμοσφαιρικού αέρα παρατηρείται στο Βέλο Κορινθίας κατά το μήνα Ιούλιο και ακολουθεί το Τυμπάκι για τον ίδιο μήνα. Όλους τους υπόλοιπους μήνες η μέγιστη θερμοκρασία εμφανίζεται στην Ιεράπετρα.
- Όλες οι περιοχές εμφανίζουν την ελάχιστη μέση θερμοκρασία ατμοσφαιρικού αέρα το μήνα Ιανουάριο, εκτός από το Τυμπάκι όπου η ελάχιστη θερμοκρασία εμφανίζεται το μήνα Φεβρουάριο.
- Παρατηρείται ότι η Τρίπολη παρουσιάζει τις χαμηλότερες μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες περιόδου για όλους τους μήνες με τη χαμηλότερη θερμοκρασία να εμφανίζεται το μήνα Ιανουάριο, καθώς ο σταθμός βρίσκεται στα 653 m υψόμετρο και είναι ο υψηλότερος από τους εξεταζόμενους. Το υψόμετρο στο οποίο είναι εγκατεστημένοι οι υπόλοιποι μετεωρολογικοί σταθμοί κυμαίνεται από 5 έως 20 m.



Εικόνα 2: Μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες ατμοσφαιρικού αέρα κατά την περίοδο 1999-2003 στους εξεταζόμενους σταθμούς της ΕΜΥ στη Νότιο Ελλάδα

### 3.2 Μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες εδάφους

Στην Εικόνα 3 παρουσιάζεται η διακύμανση της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας εδάφους στους οκτώ σταθμούς της ΕΜΥ για τα βάθη 2, 20, 50 και 100 cm.

#### 3.2.1. Βάθος 2 cm

Οι υψηλότερες μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες εδάφους στα 2 cm παρουσιάζονται τον Ιούλιο με υψηλότερη αυτή του Άργους (35,5 °C) και έπονται η Ιεράπετρα, η Ανδραβίδα και ο Πύργος, ενώ η Καλαμάτα, η Τρίπολη και το Βέλο παρουσιάζουν τις χαμηλότερες κατά την ίδια περίοδο.

Οι χαμηλότερες μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες εδάφους στα 2 cm παρουσιάζονται τον Ιανουάριο με χαμηλότερη στην Τρίπολη (3,5 °C) και έπονται το Άργος και το Βέλο, ενώ η Ιεράπετρα, η Καλαμάτα και η Ανδραβίδα παρουσιάζουν τις υψηλότερες κατά την ίδια περίοδο

Παρόλο που η Τρίπολη εμφανίζει τις μικρότερες μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες ατμοσφαιρικού αέρα καθ' όλη τη διάρκεια του έτους δε συμβαίνει το ίδιο σε βάθος 2 cm. Κατά τον Ιούνιο και τον Ιούλιο οι μικρότερες θερμοκρασίες εμφανίζονται στην Καλαμάτα.

Τέλος, το μέγιστο εύρος (θερμοκρασιακή διαφορά) μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας περιόδου για τα 2 cm εμφανίζει το Άργος με 28,7 °C, ενώ το ελάχιστο η Καλαμάτα με 18,9 °C.

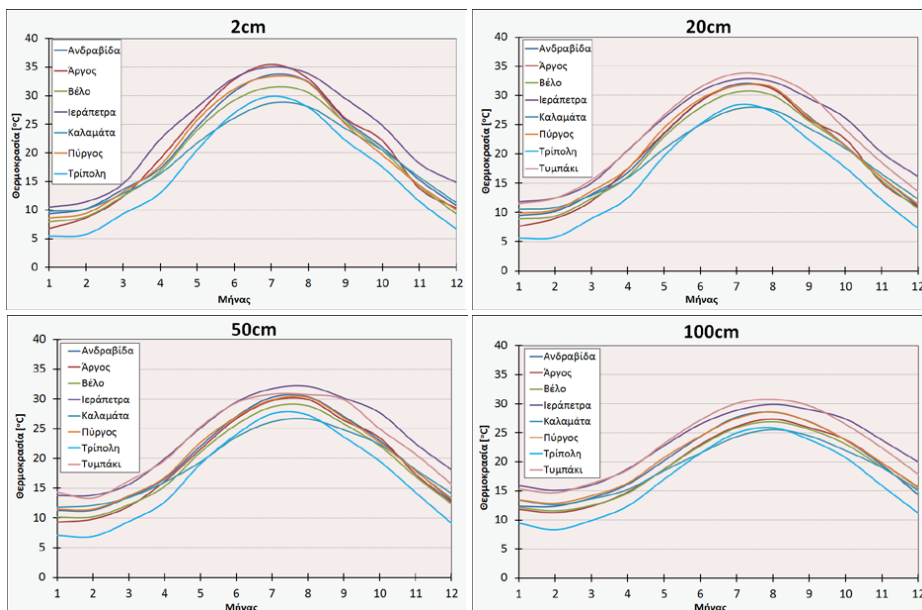
#### 3.2.2. Βάθος 20 cm

Σε αυτό το βάθος η μέγιστη μέση μηνιαία θερμοκρασία της περιόδου εμφανίζεται σε όλους τους εξεταζόμενους σταθμούς το μήνα Ιούλιο, ενώ η ελάχιστη μέση μηνιαία θερμοκρασία της περιόδου σε όλους τους σταθμούς εμφανίζεται το μήνα Ιανουάριο.

Η μέγιστη μέση μηνιαία θερμοκρασία περιόδου εμφανίζεται στο Τυμπάκι και είναι 33,8 °C και ακολουθούν η Ιεράπετρα και η Ανδραβίδα, ενώ η ελάχιστη μέση θερμοκρασία περιόδου τον ίδιο μήνα (Ιούλιο) εμφανίζεται στην Καλαμάτα με 27,7 °C και ακολουθούν η Τρίπολη και το Βέλο Κορινθίας.

Κατά τον Ιανουάριο η μέγιστη μέση θερμοκρασία εδάφους εμφανίζεται στην Ιεράπετρα με 11,8 °C, ενώ η ελάχιστη μέση θερμοκρασία περιόδου εμφανίζεται στην Τρίπολη με 5,6 °C.

Τέλος, το μέγιστο εύρος μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης μέσης θερμοκρασίας περιόδου για τα 20 cm εμφανίζει το Άργος με 24,1 °C θερμοκρασιακή διαφορά, ενώ το ελάχιστο η Καλαμάτα με 17,2 °C.



Εικόνα 3: Θερμοκρασία εδάφους σε βάθη 2, 20, 50 και 100 cm στους εξεταζόμενους σταθμούς της ΕΜΥ στη Νότιο Ελλάδα

### 3.2.3. Βάθος 50 cm

Στο συγκεκριμένο βάθος η μέγιστη μέση θερμοκρασία περιόδου εμφανίζεται σε όλους τους εξεταζόμενους σταθμούς το μήνα Αύγουστο εκτός από το σταθμό της Τρίπολης και του Τυμπακίου που εξακολουθεί να εμφανίζεται το μήνα Ιούλιο, ενώ η ελάχιστη μέση θερμοκρασία περιόδου σε όλους τους σταθμούς εμφανίζεται το μήνα Ιανουάριο εκτός από το σταθμό της Τρίπολης και του Τυμπακίου όπου εμφανίζεται Φεβρουάριο.

Παρατηρείται ότι σχεδόν σε όλες τις περιοχές αρχίζει να εμφανίζεται αργότερα η μέγιστη θερμοκρασία εδάφους σε σχέση με τη μέγιστη θερμοκρασία ατμοσφαιρικού αέρα.

Η μέγιστη μέση θερμοκρασία περιόδου εμφανίζεται στην Ιεράπετρα και είναι  $32,2^{\circ}\text{C}$  και ακολουθούν το Τυμπάκι και η Ανδραβίδα, ενώ η ελάχιστη μέση θερμοκρασία κατά τη θερινή περίοδο εμφανίζεται στην Καλαμάτα με  $26,6^{\circ}\text{C}$  τον Αύγουστο και ακολουθούν η Τρίπολη και το Άργος.

Τέλος το μέγιστο εύρος μεταξύ μέσης μέγιστης και μέσης ελάχιστης θερμοκρασίας περιόδου για τα 50 cm εμφανίζει η Τρίπολη με  $20,6^{\circ}\text{C}$  θερμοκρασιακή διαφορά, ενώ το ελάχιστο η Καλαμάτα με  $14,9^{\circ}\text{C}$  θερμοκρασιακή διαφορά.

### 3.2.4. Βάθος 100 cm

Σε αυτό το βάθος η μέγιστη μέση θερμοκρασία περιόδου εμφανίζεται σε όλους τους εξεταζόμενους σταθμούς το μήνα Αύγουστο, ενώ η ελάχιστη μέση θερμοκρασία περιόδου εμφανίζεται σε όλους τους σταθμούς το μήνα Φεβρουάριο. Παρατηρείται ότι σε όλες τις περιοχές τόσο η μέγιστη όσο και η ελάχιστη θερμοκρασία του εδάφους παρουσιάζει καθυστέρηση σε σχέση με την εμφάνιση της θερμοκρασίας του ατμοσφαιρικού αέρα.

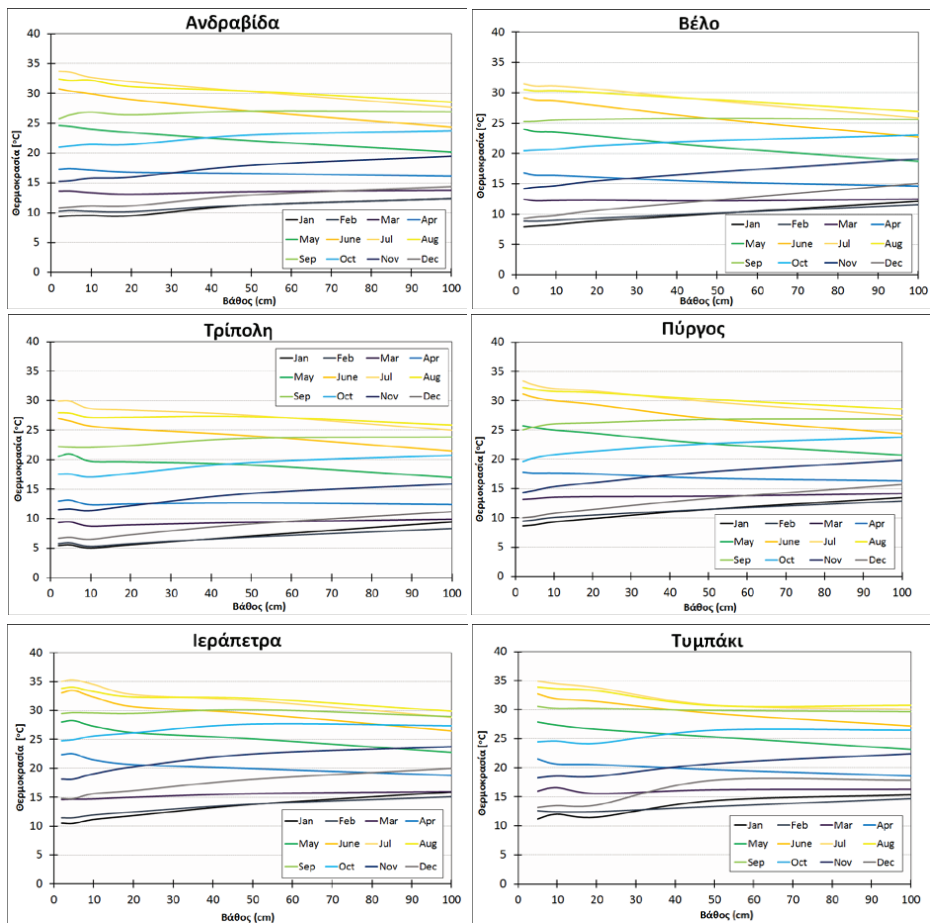
Η μέγιστη μέση θερμοκρασία περιόδου εμφανίζεται στο Τυμπάκι ( $30,8^{\circ}\text{C}$ ) και ακολουθούν η Ιεράπετρα και ο Πύργος, ενώ η μικρότερη μέση θερμοκρασία περιόδου κατά τη θερινή περίοδο (Αύγουστος) εμφανίζεται στην Καλαμάτα με  $25,6^{\circ}\text{C}$  και ακολουθούν η Τρίπολη και το Βέλο.

Η ελάχιστη μέση θερμοκρασία περιόδου εμφανίζεται στην Τρίπολη ( $8,3^{\circ}\text{C}$ ) και ακολουθούν το Άργος και το Βέλο, ενώ η μεγαλύτερη μέση μηνιαία θερμοκρασία κατά τη χειμερινή περίοδο (Φεβρουάριος) εμφανίζεται στην Ιεράπετρα με  $15,1^{\circ}\text{C}$  και ακολουθούν το Τυμπάκι και ο Πύργος.

Το μέγιστο εύρος μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης μέσης θερμοκρασίας περιόδου για τα 100 cm εμφανίζει η Τρίπολη με 17,5 °C θερμοκρασιακή διαφορά, ενώ το ελάχιστο η Καλαμάτα με 12,9 °C θερμοκρασιακή διαφορά.

### 3.3. Μελέτη προφίλ θερμοκρασίας εδάφους

Στην Εικόνα 4 παρουσιάζονται τα μέσα μηνιαία θερμοκρασιακά προφίλ του εδάφους σε σχέση με το βάθος. Παρατηρείται ότι η επίδραση την οποία ασκούν οι εποχιακές μεταβολές του καιρού στην διαμόρφωση της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας του εδάφους μειώνεται με την αύξηση του βάθους και ως αποτέλεσμα παρουσιάζεται σταδιακή μείωση του θερμοκρασιακού εύρους που σημειώνεται.



Εικόνα 4: Θερμοκρασιακό προφίλ εδάφους σε εξεταζόμενους σταθμούς της ΕΜΥ στη Νότιο Ελλάδα

Σε σχέση με την κλίση των καμπυλών, μπορούμε να διακρίνουμε δύο κυρίως χαρακτηριστικές ομάδες καμπυλών. Μία που περιγράφει τους μήνες όπου ψύχεται το έδαφος, από Οκτώβριο έως Μάρτιο, κατά τους οποίους η επιφάνεια επηρεαζόμενη έντονα από την θερμοκρασία ατμοσφαιρικού αέρα και άλλους μετεωρολογικούς παράγοντες εμφανίζει χαμηλές θερμοκρασίες σε σχέση με τα βαθύτερα στρώματα, τα οποία παρουσιάζουν μια αδράνεια/υστέρηση, που καθώς προχωρώντας σε μεγαλύτερα βάθη η επιρροή αυτή εξασθενεί και εμφανίζονται μεγαλύτερες θερμοκρασίες εδάφους. Παράλληλα μπορούμε να διακρίνουμε μία δεύτερη ομάδα καμπυλών, που περιγράφουν τους μήνες κατά τους

οποίους θερμαίνεται το έδαφος, από Απρίλιο έως Σεπτέμβριο, και κατά τους οποίους η επιφάνεια εμφανίζει υψηλότερες θερμοκρασίες, οι οποίες ελαττώνονται με την αύξηση του βάθους.

Παράμετροι που επιδρούν στο εύρος και στην ταχύτητα μεταβολής της θερμοκρασίας του εδάφους, αλλά δεν εξετάζονται στην παρούσα εργασία, είναι κυρίως το πορώδες και η περιεχόμενη υγρασία. Εδάφη με αδρομερή ή έντονα συμπαγή υφή επηρεάζονται ταχύτερα από την περιεχόμενη υγρασία. Όσο πιο υγρό είναι το έδαφος, τόσο μικρότερες είναι οι μεταβολές της θερμοκρασίας, διότι η ειδική θερμότητα του νερού είναι πενταπλάσια της ειδικής θερμότητας των ανόργανων σωματιδίων του εδάφους.

### 3.4. Θερμοκρασιακό προφίλ εδάφους

Η Εικόνα 5 παρουσιάζει τις μέγιστες, μέσες και ελάχιστες τιμές των μέσων θερμοκρασιών της περιόδου 1999-2003 για τους μετεωρολογικούς σταθμούς της Ανδραβίδας, του Πύργου, του Βέλου Κορινθίας, της Τρίπολης, της Ιεράπετρας και του Τυμπακίου. Παρατηρείται σε όλους τους σταθμούς ότι η μέση θερμοκρασία του εδάφους είναι μεγαλύτερη από τη μέση θερμοκρασία του ατμοσφαιρικού αέρα. Το φαινόμενο αυτό είναι πιο έντονο στην επιφάνεια του εδάφους. Επίσης, σε όλους τους σταθμούς όσο το βάθος μεγαλώνει μειώνεται το εύρος μεταξύ μέσης μέγιστης και μέσης ελάχιστης θερμοκρασίας. Ακόμη, υπάρχει έντονη διακύμανση της θερμοκρασίας του εδάφους μεταξύ 2 cm και 5 cm, καθώς στην επιφάνεια του εδάφους η θερμοκρασία επηρεάζεται και από άλλους παράγοντες, όπως κατακρημνίσεις, άνεμος, κ.α.

Λόγω της υψηλής θερμικής αδράνειας του εδάφους, οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας που παρατηρούνται στην επιφάνεια του εδάφους μειώνονται καθώς το βάθος του εδάφους αυξάνεται.

Η μέση θερμοκρασία εδάφους μέχρι 100 cm στο σταθμό της Ανδραβίδας και του Πύργου είναι γύρω στους 20 °C, ενώ στο σταθμό του Βέλου γύρω στους 19 °C. Στο σταθμό της Τρίπολης η μέση θερμοκρασία εδάφους μέχρι 100 cm είναι γύρω στους 16,5 °C, τιμή αναμενόμενη καθώς πρόκειται για τον εξεταζόμενο σταθμό στο μεγαλύτερο υψόμετρο.

Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται οι διαφορές της ελάχιστης μέσης από τη μέγιστη μέση θερμοκρασία εδάφους για κάθε βάθος, αλλά και για τον ατμοσφαιρικό αέρα ανά πόλη. Φαίνεται ότι διαφορά αυτή μειώνεται με το βάθος, σημειώνοντας στα 100 cm μείωση κατά 6-12 °C.

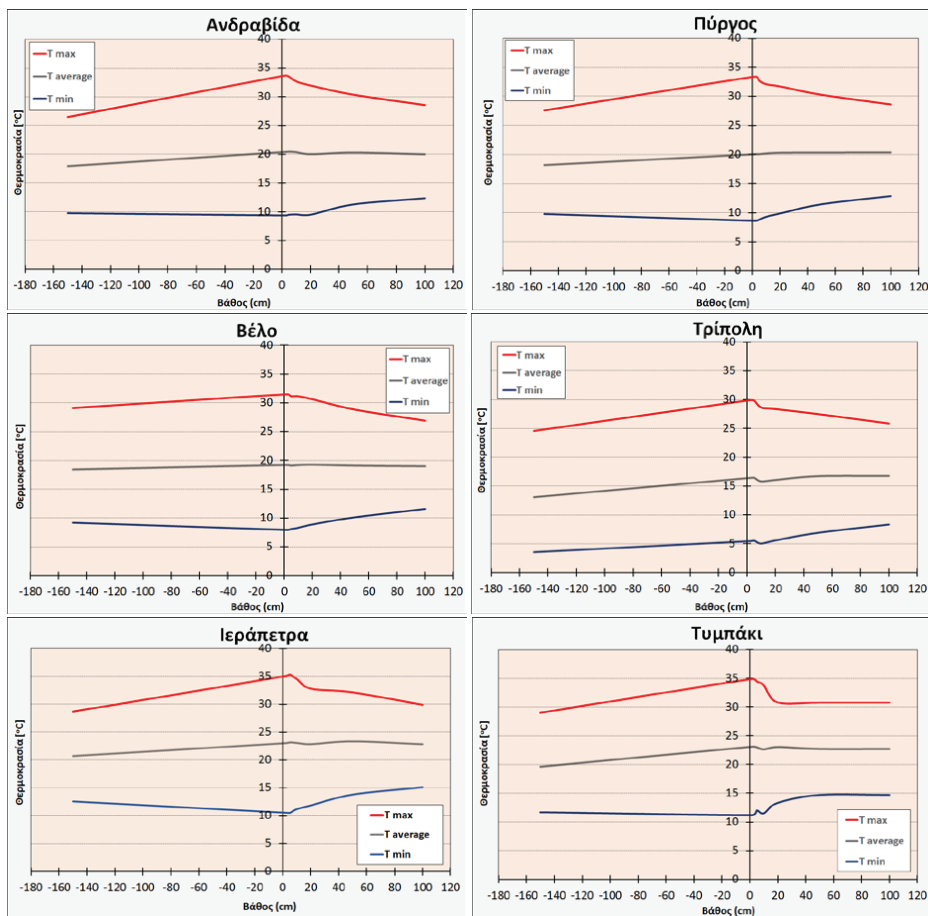
Πίνακας 1: Οι διαφορές μεταξύ ελάχιστης μέσης και μέγιστης μέσης θερμοκρασίας περιόδου ατμοσφαιρικού αέρα και εδάφους ανά πόλη

	$\Delta T_{(\max-\min)}$ ατ. αέρας	$\Delta T_{(\max-\min)}$ (2cm)	$\Delta T_{(\max-\min)}$ (5cm)	$\Delta T_{(\max-\min)}$ (10cm)	$\Delta T_{(\max-\min)}$ (20cm)	$\Delta T_{(\max-\min)}$ (50cm)	$\Delta T_{(\max-\min)}$ (100cm)
Ανδραβίδα	16,74	24,33	24,02	23,14	22,48	19,09	16,21
Πύργος	17,80	24,74	23,88	22,76	21,81	18,79	15,72
Καλαμάτα	17,38	18,92	18,46	18,13	17,19	14,85	12,93
Βέλο	19,91	23,54	23,04	22,83	21,74	18,71	15,33
Άργος	20,72	28,68	27,71	25,99	24,07	20,60	16,10
Τρίπολη	21,04	24,46	24,33	23,61	22,81	20,61	17,54
Ιεράπετρα	16,11	24,55	24,86	23,36	20,96	18,35	14,81
Τυμπάκι	17,32	---	23,73	22,44	22,28	17,47	16,08

### 3.5. Σύγκριση μέσων μηνιαίων τιμών θερμοκρασίας εδάφους και ατμοσφαιρικού αέρα

Στην Εικόνα 6 δίνεται η θερμοκρασία του εδάφους στα διάφορα βάθη για κάθε εξεταζόμενο σταθμό μέτρησης. Είναι εμφανές ότι οι υψηλότερες και οι χαμηλότερες θερμοκρασίες που εντοπίζονται, αφορούν το βάθος των 2 cm, καθώς το έδαφος στο βάθος αυτό είναι πλησιέστερα στην επιφάνεια και επηρεάζεται άμεσα από τις συνθήκες που επικρατούν σε αυτήν, ιδίως από την προοπτιπτούσα ηλιακή ακτινοβολία. Παράλληλα είναι εμφανές ότι καθώς το βάθος αυξάνει αφενός σε όλους τους εξεταζόμενους σταθμούς η μέγιστη/ελάχιστη θερμοκρασία φθίνει/αυξάνει, και αφετέρου καθυστερεί η εμφάνιση του μεγίστου/ελάχιστου της θερμοκρασίας.

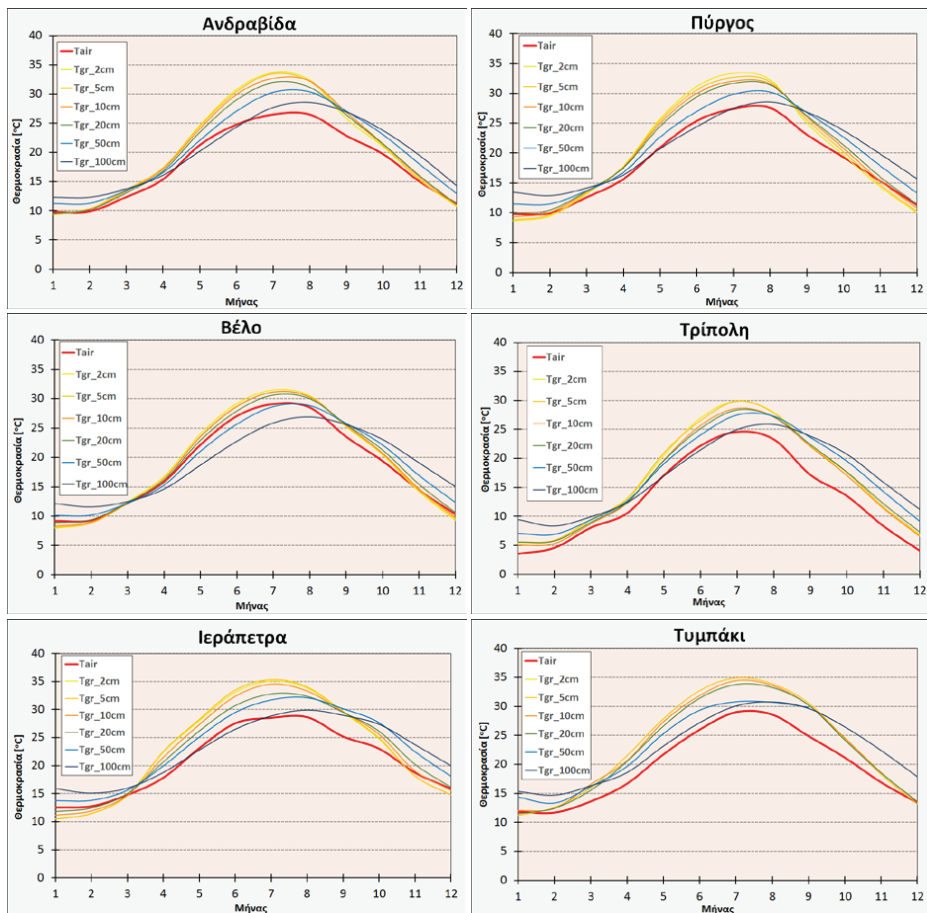
Στην Ανδραβίδα η μέγιστη μέση θερμοκρασία ατμοσφαιρικού αέρα περιόδου εμφανίζεται το μήνα Ιούλιο και είναι 26,49 °C, ενώ η μέγιστη μέση θερμοκρασία εδάφους στα 50 cm και στα 100 cm εμφανίζονται το μήνα Αύγουστο και είναι 30,37 °C και 28,56 °C, αντίστοιχα. Στα υπόλοιπα βάθη η μέγιστη μέση θερμοκρασία περιόδου εμφανίζεται ταυτόχρονα με τη μέση μέγιστη θερμοκρασία ατμοσφαιρικού αέρα. Η ελάχιστη μέση θερμοκρασία ατμοσφαιρικού αέρα εμφανίζεται σε όλα τα βάθη, πλην των 100 cm, το μήνα Ιανουάριο, και είναι 9,75 °C, ενώ στα 100 cm εμφανίζεται το Φεβρουάριο και είναι 12,35 °C.



Εικόνα 5: Μέσες, ελάχιστες και μέγιστες τιμές των μέσων θερμοκρασιών περιόδου του εδάφους και του ατμοσφαιρικού αέρα σε εξεταζόμενους σταθμούς της ΕΜΥ στη Νότιο Ελλάδα

Στο Βέλο Κορινθίας η μέγιστη μέση θερμοκρασία περιόδου ατμοσφαιρικού αέρα εμφανίζεται το μήνα Ιούλιο και είναι 29,1 °C. Η μέγιστη μέση θερμοκρασία εδάφους εμφανίζεται για όλα τα βάθη πλην 50 cm και 100 cm επίσης τον ίδιο μήνα, ενώ στα βάθη αυτά το μέγιστο εμφανίζεται με υστέρηση ενός μηνός τον μήνα Αύγουστο. Στα 100 cm η μέση μέγιστη θερμοκρασία περιόδου είναι 26,9 °C. Στο Βέλο η μέση ελάχιστη θερμοκρασία περιόδου εμφανίζεται όπως και στην Ανδραβίδα τον μήνα Ιανουάριο και το ίδιο συμβαίνει σε όλα τα βάθη εκτός των 100 cm όπου η μέση ελάχιστη τιμή της θερμοκρασίας εμφανίζεται το μήνα Φεβρουάριο. Παρόμοια συμπεριφορά παρουσιάζουν όλοι οι εξεταζόμενοι σταθμοί. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην Τρίπολη η μέση θερμοκρασία εδάφους περιόδου είναι για όλα τα βάθη μεγαλύτερη σε σχέση με τη μέση θερμοκρασία περιόδου ατμοσφαιρικού αέρα, εκτός από την

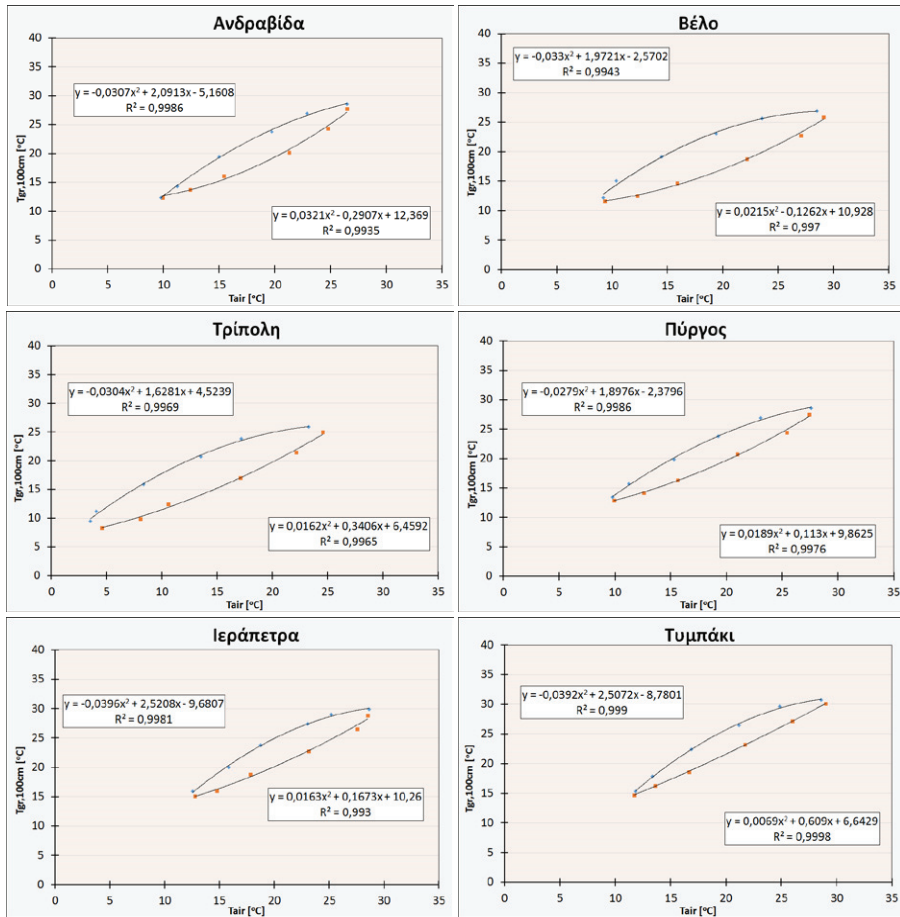
περίπτωση των 100 cm, όπου τους μήνες Μάιο και Ιούνιο η θερμοκρασία εδάφους στο συγκεκριμένο βάθος είναι μικρότερη.



Εικόνα 6: Θερμοκρασία εδάφους σε διάφορα βάθη σε σύγκριση με τη θερμοκρασία ατμοσφαιρικού αέρα σε εξεταζόμενους σταθμούς της ΕΜΥ στη Νότιο Ελλάδα

### 3.6. Συσχέτιση θερμοκρασίας εδάφους και ατμοσφαιρικού αέρα

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 [16].



Εικόνα 8: Συσχέτιση της θερμοκρασίας εδάφους σε βάθος 100 cm με τη θερμοκρασία ατμοσφαιρικού αέρα σε εξεταζόμενους σταθμούς της ΕΜΥ στη Νότιο Ελλάδα

Στην Εικόνα 8 φαίνεται η συσχέτιση των μέσων μηνιαίων τιμών της εξεταζόμενης περιόδου σε βάθος 100 cm μαζί με την εξίσωση της γραμμής τάσης και τις τιμές του συντελεστή προσδιορισμού ( $R^2$ ) για τους σταθμούς της Ανδραβίδας, του Βέλου Κορινθίας, της Τρίπολης, του Πύργου, της Ιεράπετρας και του Τυμπακίου. Η συσχέτιση εξετάζεται για δύο χρονικές περιόδους ξεχωριστά, ψύξης/θέρμανσης του εδάφους. Από τις εικόνες φαίνεται ότι η συσχέτιση είναι πολύ υψηλή (μεγαλύτερη από 0,99), γεγονός που σημαίνει ότι η θερμοκρασία του εδάφους μπορεί να προσδιορισθεί 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.

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στους εξεταζόμενους μετεωρολογικούς σταθμούς και στα εξεταζόμενα βάθη (έως 100 cm) η θερμοκρασία του εδάφους επηρεάζεται άμεσα από τη θερμοκρασία του ατμοσφαιρικού αέρα, γεγονός το οποίο είναι έντονο σε μικρότερα βάθη και εξασθενεί με την αύξηση του βάθους.

Κατά την εποχική διακύμανση της θερμοκρασίας, η εμφάνιση των μέγιστων/ελάχιστων τιμών της θερμοκρασίας του εδάφους παρουσιάζει μια υστέρηση σε σχέση με τις αντίστοιχες του αέρα, που στα μεγαλύτερα βάθη (100 cm, 50 cm) είναι ίσης τάξης του ενός μήνα.

Η συσχέτιση των μέσων μηνιαίων τιμών της θερμοκρασίας του εδάφους με τις αντίστοιχες του ατμοσφαιρικού αέρα είναι πολύ υψηλή, γεγονός που σημαίνει ότι η θερμοκρασία του εδάφους (ιδιαίτερα στα μεγαλύτερα εξεταζόμενα βάθη) μπορεί να προσδιορισθεί σχεδόν αποκλειστικά από τη θερμοκρασία του αέρα και ότι οι εξισώσεις συσχέτισης που προσδιορίστηκαν (για τα 100 cm) περιγράφουν τη σχέση της θερμοκρασίας του εδάφους με αυτήν την θερμοκρασία του αέρα.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

*Ευχαριστούμε την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία 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] International District Heating Association 1735 "Eye" 81. N.W., "A Design Guide, District Heating - Cooling Association" Washington, D.C. 20006.
- [3] El-Din M.S., "On the heat flow into the ground", Renewable Energy 18 (1999) 473-490.
- [4] Schmidt W., Gonsold W., Enz J., "A decade of air-ground exchange from Fargo North Dakota", Global and Planetary Change 29 (2001) 311-325.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Mazou E., Tsiros I., Alvertos N., Lykoudis S., Garofalakis I., "Estimation of soil temperature: time and frequency domain modeling", Proc. 10th COMECAP, 2010.
- [10] 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.
- [11] Saskia M. van Manen, Erin Wallin, "Ground temperature profiles and thermal rock properties at Wairakei, New Zealand", Renewable Energy 43 (2012) 313-321.
- [12] 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.
- [13] Beltrami H., Kellman L., "An examination of short- and long-term air-ground temperature coupling", Global and Planetary Change 38 (2003) 291-303.
- [14] 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.
- [15] Τσιλιγκιρίδης Γ., Σπαντιδάκης Γ., Χατζημωυσιδάκης Σ., "Μελέτη της θερμοκρασιακής συμπεριφοράς του εδάφους στο σταθμό μέτρησης του Α.Π.Θ.", πρακτικά 7ου Εθνικού Συνεδρίου για τις Ήπιες Μορφές Ενέργειας, τομ. Β', (2002) 115-124.
- [16] Tsilingiridis G., Papakostas K., "Investigating the relationship between air and ground temperature variations in shallow depths in northern Greece", Energy 73 (2014) 1007-1016.
- [17] Τσιμουρα Ι., Παπαδόπουλος Γ., Τσιλιγκιρίδης Γ., "Μελέτη της διακύμανσης της θερμοκρασίας του εδάφους στο σταθμό του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών την περίοδο 1999-2012.", πρακτικά 10ου Εθνικού Συνεδρίου για τις Ήπιες Μορφές Ενέργειας, τομ. Α3', (2014) 499-508.
- [18] Tsimoura I., Ikononou K., Mamaloukas A., Tsilingiridis G., "Study of ground temperature variations at depths up to 3 meters at the Meteorological Station of Aristotle University of Thessaloniki", proceedings of 6th International Conference on Renewable Energy Sources & Energy Efficiency (2016) 294-303.
- [19] Pielke, R. A., "Mesoscale Meteorological Modeling", 612 pp., Academic Press, London, (1984) 161-180.
- [20] A.K. Khatry, M.S. Sodha, M.A.S. Malik, "Periodic variation of ground temperature with depth", Solar Energy 20:5 (1978) 425-427.
- [21] Popiel C., Wojtkowiak J., Biernacka B., "Measurements of temperature distribution in ground". Experimental Thermal and Fluid Science Vol. 25, (2001) pp 301-309.



**Φυσική κτιρίων**

---



## ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΥΠΙΚΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ ΔΕΥΤΕΡΟΒΑΘΜΙΑΣ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ

**Β. Κικίδου<sup>1\*</sup>, Δ. Μπόζης<sup>2</sup>, Γ. Μαρτινόπουλος<sup>1</sup>**

<sup>1\*</sup> Διεθνές Πανεπιστήμιο Ελλάδος, Σχολή Επιστημών Τεχνολογίας, Θεσσαλονίκη,  
e-mail: [v.kikidou@ihu.edu.gr](mailto:v.kikidou@ihu.edu.gr)

<sup>2</sup> Γραφείο Μελετών Ηλεκτρομηχανολογικών Έργων

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην προσπάθεια για την επίτευξη των στόχων που έχουν τεθεί για την εξοικονόμηση ενέργειας, τη μείωση της εκπομπής αέριων ρύπων και τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ιδιαίτερη βαρύτητα δίνεται στον κτιριακό τομέα, ο οποίος παρουσιάζει τη μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας. Ειδικά για τα δημόσια κτίρια, η εφαρμογή παρεμβάσεων επιβάλλεται να πραγματοποιηθεί άμεσα, τόσο λόγω των υφιστάμενων δεσμεύσεων στα πλαίσια της Ευρωπαϊκής Ένωσης, όσο και για να αποτελέσουν παράδειγμα προς μίμηση για τον ιδιωτικό τομέα.

Από τα δημόσια κτίρια ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα κτίρια εκπαίδευσης, κυρίως λόγω του μεγάλου αριθμού τους. Είναι κτίρια τα οποία στη χώρα μας έχουν χτιστεί σε διαφορετικές χρονικές περιόδους, είναι επαρκώς συντηρημένα, ενώ τα περισσότερα έχουν δεχτεί επεμβάσεις, προσθήκες και τροποποιήσεις. Η ανάγκη για εξοικονόμηση ενέργειας στα κτίρια εκπαίδευσης είναι εμφανής, καθώς πρόκειται για σημαντικούς καταναλωτές ενέργειας. Τα δεδομένα κατανάλωσης ενέργειας που είναι διαθέσιμα είναι πολύ δύσκολο να χρησιμοποιηθούν για συγκρίσεις και αδύνατο να οδηγήσουν στη σύνταξη βασικών προτάσεων για την εξοικονόμηση ενέργειας στα νέα ή τα παλαιά σχολικά κτίρια. Απαντήσεις σε ερωτήματα όπως: ποιος είναι ο σωστός προσανατολισμός στα σχολεία, πού πρέπει να μπαίνει η θερμομόνωση των αδιαφανών στοιχείων, πώς πρέπει να λειτουργεί το σύστημα θέρμανσης και εάν έχει νόημα η εγκατάσταση μηχανικού αερισμού και εξαερισμού με ανάκτηση θερμότητας, φαίνεται ότι ακόμη εκκρεμούν.

Με επιδίωξη την απάντηση στα παραπάνω ερωτήματα, διερευνήθηκε η θερμική συμπεριφορά τυπικού κτιρίου δευτεροβάθμιας εκπαίδευσης, το οποίο βρίσκεται στην περιοχή της Θεσσαλονίκης. Σχεδιαστικοί παράγοντες, όπως η έκταση των ανοιγμάτων και η θερμική μάζα, καθώς και εναλλακτικές κατασκευαστικές λύσεις, όπως η θέση των θερμομονωτικών στρώσεων των δομικών στοιχείων του κτιρίου, συγκρίθηκαν μεταξύ τους ως προς τις ετήσιες απαιτήσεις για τη θέρμανση και τον αερισμό των χώρων του κτιρίου καθώς και ως προς τη μέγιστη απαιτούμενη ισχύ του συστήματος θέρμανσης. Εξετάστηκαν επίσης, ως προς την αποδοτικότητά τους, εναλλακτικά σενάρια λειτουργίας του συστήματος θέρμανσης (αναθέρμανση τις πρωινές ώρες) για την κάλυψη των απαιτήσεων αιχμής καθώς και η σκοπιμότητα ύπαρξης ή όχι διατάξεων μηχανικού αερισμού-εξαερισμού με εναλλάκτες ανάκτησης θερμότητας αέρα-αέρα.

Για τους υπολογισμούς καταναλώσεων ενέργειας και απαιτήσεων ισχύος των εναλλακτικών σεναρίων που διερευνήθηκαν, έγινε χρήση του λογισμικού EnergyPlus με ωριαίο βήμα προσομοίωσης της θερμικής συμπεριφοράς του κτιρίου για το έτος αναφοράς.

**Λέξεις Κλειδιά:** κτίρια εκπαίδευσης, θέρμανση, θερμομόνωση, EnergyPlus

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η κλιματική αλλαγή και η υπερθέρμανση του πλανήτη λόγω ανθρωπογενών παραγόντων, όπως η αύξηση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, είναι μερικές από τις μεγαλύτερες προκλήσεις που οι σύγχρονοι άνθρωποι καλούνται να αντιμετωπίσουν. Στην Ευρώπη τα τελευταία χρόνια, ο κτιριακός τομέας καταναλώνει το 40% της συνολικής τελικής ενέργειας, που εκλύει το 36% των συνολικών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα [1,2]. Επομένως η ανάγκη για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων, τη μείωση της ζήτησης ενέργειας και την εγκατάσταση συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι επιτακτική. Ιδιαίτερα για τα δημόσια κτίρια, οι επικείμενες παρεμβάσεις επιβάλλεται να πραγματοποιηθούν άμεσα, τόσο λόγω των υφιστάμενων δεσμεύσεων στα πλαίσια της Ευρωπαϊκής Ένωσης, όσο και για να αποτελέσουν παράδειγμα προς μίμηση για τον ιδιωτικό τομέα.

Μεταξύ των δημοσίων κτιρίων στην Ελλάδα, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα κτίρια εκπαίδευσης, τα οποία διακρίνονται από μεγάλη ετερογένεια λόγω των διαφορετικών χρονικών περιόδων κατασκευής τους και της χωρικής τους κατανομής. Επιπλέον, ένα σημαντικό μέρος του αποθέματος σχολικών κτιρίων είναι κατακερματισμένο σε ορεινά χωριά και απομονωμένα νησιά. Τα εν λόγω σχολεία, συνήθως παρουσιάζουν εξαιρετικά χαμηλή ενεργειακή απόδοση και ανεπαρκείς συνθήκες θερμικής άνεσης, καθώς πρόκειται για παλιά, μη θερμομονωμένα κτίρια, με υπερδιστασιολογημένα συστήματα θέρμανσης που συχνά είναι εκτός λειτουργίας.

Τα δημόσια κτίρια εκπαίδευσης στην Ελλάδα είναι περισσότερα από 15.000 και στεγάζουν πάνω από 1.600.000 μαθητές και σπουδαστές όλων των βαθμίδων. Η εκτιμώμενη κατανάλωση ενέργειας που αντιστοιχεί στο σύνολο των σχολικών κτιρίων είναι της τάξης των 270.000 MWh ετησίως [3]. Η μέση κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας ανά κατηγορία χρήσης κτιρίου παρουσιάζεται αναλυτικά στον Πίνακα 1. Συγκεκριμένα όσον αφορά στα κτίρια δευτεροβάθμιας εκπαίδευσης, αυτή είναι περίπου 180 kWh/m<sup>2</sup>, με τις 94 kWh/m<sup>2</sup> να αντιστοιχούν στη θέρμανση, τις 15 kWh/m<sup>2</sup> στην ψύξη, τις 57 kWh/m<sup>2</sup> στον φωτισμό και τις 14 kWh/m<sup>2</sup> στην παραγωγή ζεστού νερού χρήσης (ZNX). Η συνεισφορά ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ), καθώς και η συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας (ΣΗΘ) στο ενεργειακό ισοζύγιο είναι αμελητέα [4].

Πίνακας 1: Μέση κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας ανά κατηγορία χρήσης, σε kWh/m<sup>2</sup>[4]

Κατηγορία χρήσης κτιρίου	Θέρμανση	Ψύξη	Φωτισμός	ZNX	ΑΠΕ & ΣΗΘ	Σύνολο
Νηπιαγωγεία	109,02	3,85	49,19	5,96	0,44	167,58
1 <sup>ο</sup> βάρθμια εκπαίδευση	98,61	12,98	57,21	15,55	0,38	183,97
2 <sup>ο</sup> βάρθμια εκπαίδευση	93,88	15,30	56,88	14,10	0,03	180,13
3 <sup>ο</sup> βάρθμια εκπαίδευση	95,69	48,10	148,39	8,70	0,00	300,88
Αίθουσες διδασκαλίας	114,78	35,02	133,88	15,43	0,00	299,11
Ωδεία	216,76	20,74	68,66	0,89	0,00	307,05

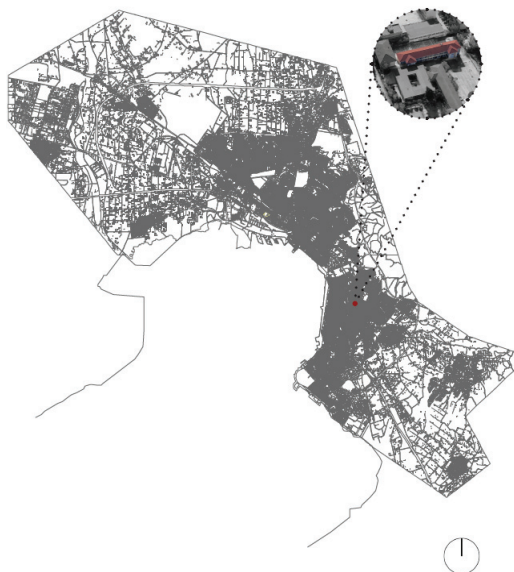
Τα προβλήματα που καταγράφονται στα περισσότερα σχολικά κτίρια και έχουν σχέση με τη θερμική συμπεριφορά κτιρίων και συστημάτων είναι οι ελλειπείς συνθήκες θερμικής άνεσης, η χαμηλή ποιότητα αέρα και οι υψηλές ανάγκες ενέργειας για θέρμανση. Ο ακατάλληλος προσανατολισμός, οι ελλειπείς θερμομονώσεις των δομικών στοιχείων, η ανεξέλεγκτη διείσδυση αέρα από τις χαραμάδες των κουφωμάτων, η υπερδιστασιολόγηση των συστημάτων θέρμανσης και η λανθασμένη λειτουργία τους είναι προτάσεις που ακούγονται συχνά ως αιτίες που οδηγούν στην υπερκατανάλωση ενέργειας στα σχολικά κτίρια.

Με αφετηρία τα παραπάνω, στην παρούσα μελέτη διερευνάται η θερμική συμπεριφορά ενός τυπικού κτιρίου δευτεροβάθμιας εκπαίδευσης, στην περιοχή της Θεσσαλονίκης. Σχεδιαστικοί παράγοντες, όπως ο προσανατολισμός των ανοιγμάτων και η ύπαρξη θερμικής μάζας, καθώς και εναλλακτικές κατασκευαστικές λύσεις, όπως η θέση των θερμομονωτικών στρώσεων των αδιαφανών δομικών στοιχείων, συγκρίνονται μεταξύ τους ως προς τις ετήσιες απαιτήσεις για τη θέρμανση του κτιρίου αλλά

και ως προς τις απαιτήσεις ισχύος (μέγιστη απόδοση θερμικής ισχύος). Επιπλέον, εξετάζονται ως προς την αποδοτικότητά τους εναλλακτικά σενάρια πρωινής αναθέρμανσης του σχολείου καθώς και οι τελικές μειώσεις στην κατανάλωση ενέργειας και στην ισχύ του συστήματος που θα επιφέρει η ύπαρξη ή όχι διατάξεων μηχανικού αερισμού-εξαερισμού με εναλλάκτες ανάκτησης θερμότητας.

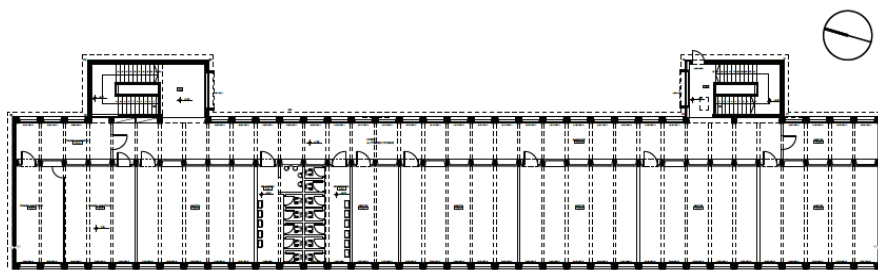
## 2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΤΙΡΙΟΥ

Το μελετώμενο κτίριο είναι ένα κτίριο δευτεροβάθμιας εκπαίδευσης, κατασκευασμένο το 1978 και αποτελεί μέρος ενός σχολικού συγκροτήματος στην περιοχή της Κάτω Τούμπας, στη Θεσσαλονίκη, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.



Εικόνα 1: Ακριβής τοποθεσία του μελετώμενου κτιρίου στη Θεσσαλονίκη

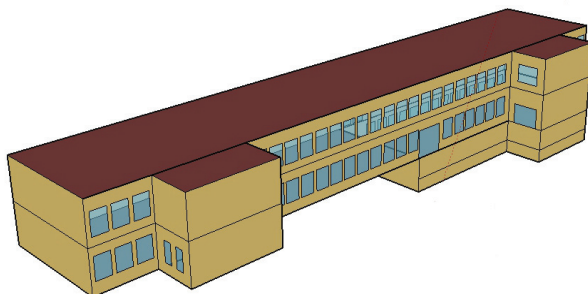
Το κτίριο αποτελείται από δύο ορόφους και ένα υπόγειο. Έχει συνολική θερμαινόμενη επιφάνεια  $1.647 \text{ m}^2$  και όγκο  $6.005 \text{ m}^3$ . Η κάτοψη του τυπικού ορόφου παρουσιάζεται στην Εικόνα 2. Πρόκειται για ένα τυπικό παράδειγμα σχολικού κτιρίου, κατασκευασμένο με προκατασκευασμένα στοιχεία σκυροδέματος, δώμα με πλάκα σκυροδέματος στην οποία εκ των υστέρων προστέθηκε κεραμοσκεπή, και εσωτερικούς τοίχους με οπτοπλινθοδομή. Στην υφιστάμενη κατάσταση, το κτίριο είναι χωρίς θερμομόνωση ενώ στη συνέχεια θεωρήθηκε ότι έγινε προσθήκη θερμομόνωσης με βάση δύο σενάρια.



Εικόνα 2: Κάτοψη τυπικού ορόφου

### 3. ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ

Για την προσομοίωση της θερμικής συμπεριφοράς του κτιρίου χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό EnergyPlus με ωριαίο βήμα για το έτος αναφοράς [5]. Η τρισδιάστατη απεικόνιση του υπό μελέτη κτιρίου φαίνεται στην Εικόνα 3. Τα ωριαία κλιματικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από τη βάση δεδομένων του EnergyPlus (αρχείο EPW) για τη Θεσσαλονίκη [6]. Οι θερμοκρασίες εδάφους προέκυψαν από τη χρήση του "basement utility program" του EnergyPlus, για την καλύτερη προσομοίωση της μεταφοράς θερμότητας στο έδαφος.



Εικόνα 3: Τρισδιάστατη απεικόνιση του μελετώμενου κτιρίου

Στη μελέτη των σεναρίων που σχετίζονται με το κέλυφος του κτιρίου, τη λειτουργία του συστήματος θέρμανσης και τον μηχανικό αερισμό χρησιμοποιήθηκε ο τυχαίος προσανατολισμός των 50° από το βορρά. Επιπλέον, στην ενεργειακή προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν 100 ημέρες προθέρμανσης ("warmup days") προτού εξαχθούν τα πρώτα αποτελέσματα, ώστε το κτίριο να έχει φτάσει σε κατάσταση θερμικής ισορροπίας.

Ως περίοδος θέρμανσης θεωρείται το διάστημα από 20 Οκτωβρίου μέχρι 20 Απριλίου. Το ωράριο λειτουργίας του σχολείου είναι 08:00 π.μ. - 15:00 μ.μ. ενώ τα Σαββατοκύριακα καθώς και κατά τη διάρκεια των επίσημων αργιών το σχολείο θεωρείται ότι παραμένει τελείως κλειστό. Στο τυπικό έτος λοιπόν δημιουργήθηκε ένα ημερολόγιο λειτουργίας του σχολείου, στο οποίο συνολικά την περίοδο θέρμανσης προβλέπονται 130 ημέρες λειτουργίας και 81 ημέρες μη λειτουργίας.

Πίνακας 2: Δομικά στοιχεία του κτιρίου

Κωδικός	Περιγραφή	U-value
EW1A	Εξωτερικός τοίχος από 40cm οπλισμένο σκυρόδεμα και 7cm εξωτερική θερμομόνωση από εξηλασμένη πολυστερίνη	0,405 W/m <sup>2</sup> K
EW1B	Εξωτερικός τοίχος από 40cm οπλισμένο σκυρόδεμα και 8cm εσωτερική θερμομόνωση από πετροβάμβακα, ισοδύναμος με τον EW1A	0,405 W/m <sup>2</sup> K
EW2A	Εξωτερικός τοίχος από 30cm οπλισμένο σκυρόδεμα, 5cm εσωτερική θερμομόνωση από πετροβάμβακα και 7cm εξωτερική θερμομόνωση από εξηλασμένη πολυστερίνη	0,260 W/m <sup>2</sup> K
EW2B	Εξωτερικός τοίχος από 30cm οπλισμένο σκυρόδεμα και 13cm εσωτερική θερμομόνωση από πετροβάμβακα, ισοδύναμος με τον EW2A	0,260 W/m <sup>2</sup> K
EW3	Τοίχος σε επαφή με το έδαφος, από 30cm οπλισμένο σκυρόδεμα και 5cm εσωτερική θερμομόνωση από πετροβάμβακα	0,586 W/m <sup>2</sup> K
ER1	Κεραμοσκεπή με σανίδωμα και 7cm θερμομόνωση από εξηλασμένη πολυστερίνη	0,364 W/m <sup>2</sup> K
EF1	Δάπεδο στο έδαφος από 20cm οπλισμένο σκυρόδεμα, 7cm γκρο μπετόν και 4cm θερμομόνωση από εξηλασμένη πολυστερίνη	0,643 W/m <sup>2</sup> K
WD1	Παράθυρα με διπλό υαλοπίνακα, κενό αέρα 16mm και συντελεστή σκίασης SHCO=0,703	2,673 W/m <sup>2</sup> K

Τα δομικά στοιχεία του κελύφους του κτιρίου που χρησιμοποιήθηκαν για την ενεργειακή προσομοίωση αποτελούν έναν συνδυασμό των υφιστάμενων υλικών και νέων θερμομονωτικών στρώσεων ώστε να καλύπτονται οι απαιτήσεις του ΚΕΝΑΚ [7] για την κλιματική ζώνη Γ. Όσον αφορά στις εξωτερικές τοιχοποιίες του κτιρίου, αυτές θεωρήθηκαν είτε με εξωτερική είτε με εσωτερική θερμομόνωση, με ισοδύναμους μεταξύ τους συνολικούς συντελεστές θερμοπερατότητας. Τα δομικά στοιχεία με τα χαρακτηριστικά τους παρατίθενται στον Πίνακα 2. Ολόκληρο το κτίριο αντιμετωπίστηκε ως μία θερμική ζώνη, καθώς παρουσιάζει ομοιογένεια ως προς τη διαρρύθμιση και τη χρήση των χώρων του. Παρ' όλα αυτά, έχει ληφθεί υπόψη η ανταλλαγή θερμότητας της εσωτερικής θερμικής μάζας λόγω των εσωτερικών τοίχων και των πλακών δαπέδων και οροφής, όπως συνοψίζονται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3: Δομικά στοιχεία εσωτερικής θερμικής μάζας

Κωδικός	Περιγραφή	Εμβαδό
IW1	Εσωτερικός τοίχος από 10 cm οπτοπλινθοδομή και επίχρισμα	2.100 m <sup>2</sup>
IF1	Εσωτερικό δάπεδο από μωσαϊκό, 20 cm οπλισμένο σκυρόδεμα και επίχρισμα	1.944 m <sup>2</sup>

Ο φωτισμός του κτιρίου θεωρήθηκε ότι γίνεται με φωτιστικά σώματα με ηλεκτρονικά ballast και λαμπτήρες φθορισμού T5. Η συνολική μέγιστη ισχύς φωτισμού και η τιμή της μέγιστης αποδιδόμενης θερμότητας στο χώρο από το φωτισμό θεωρήθηκε 11,69 kW. Το κτίριο διαθέτει επίσης εσωτερικές συσκευές όπως εκτυπωτές, ηλεκτρονικούς υπολογιστές και διαδραστικούς πίνακες με μέγιστη ισχύ 9,4kW.

Κατά την προσομοίωση, για τον υπολογισμό της αποδιδόμενης θερμότητας από άτομα στο χώρο και για τον υπολογισμό της απαραίτητης παροχής νωπού αέρα (αερισμός), χρησιμοποιήθηκε ως μέγιστος αριθμός των μαθητών, των καθηγητών και του ευρύτερου προσωπικού του συγκεκριμένου σχολείου, τα 144 άτομα.

Οι απαιτήσεις αερισμού του κτιρίου προσδιορίστηκαν από τον μέγιστο αριθμό ατόμων και την ειδική απαίτηση αερισμού κατά ΚΕΝΑΚ που είναι 22 m<sup>3</sup>/h/άτομο, δηλαδή 3.168 m<sup>3</sup>/h, ποσότητα που αντιστοιχεί σε 1,9 ACH (αλλαγές αέρα χώρου την ώρα). Αυτός ο ρυθμός θεωρήθηκε ως ο ρυθμός είτε διείσδυσης αέρα από χαραμάδες και παράθυρα (φυσικός) είτε επιβαλλόμενος από το σύστημα μηχανικού αερισμού κατά το ωράριο λειτουργίας του σχολείου.

Τα προφίλ απόδοσης θερμότητας στο χώρο από άτομα, φωτισμό, συσκευές και οι ρυθμοί αερισμού που τελικά θεωρήθηκαν ότι επικρατούν σε μια ημέρα κανονικής λειτουργίας του σχολείου, ως ποσοστό επί των μέγιστων τιμών των αντίστοιχων μεγεθών, φαίνονται στον Πίνακα 4.

Πίνακας 4: Προφίλ λειτουργίας

Ωρα	Άνθρωποι %	Φωτισμός %	Συσκευές %	Εξαερισμός %
1-7	0	0	0	15
8	10	40	10	25
9	78	100	100	100
10	78	80	100	100
11-13	85	40	100	100
14	93	40	100	100
15	50	40	50	100
16	0	0	0	100
17-24	0	0	0	15

Για τις ανάγκες της προσομοίωσης του συστήματος θέρμανσης χρησιμοποιήθηκε το σύστημα "Ideal Loads Air System" του EnergyPlus, για τον υπολογισμό των φορτίων χωρίς την ανάγκη αναλυτικής εισαγωγής κάθε κόμβου του συστήματος θέρμανσης, αερισμού και κλιματισμού, όπως και σε άλλες εργασίες [8,9]. Το εργαλείο αυτό χρησιμοποιεί ένα «ιδανικό στοιχείο» το οποίο μπορεί να θεωρηθεί ως μία ιδανική μονάδα που αναμιγνύει τον εσωτερικό αέρα με μία καθορισμένη ποσότητα εξωτερικού αέρα, και προσθέτοντας ή αφαιρώντας θερμότητα με απόδοση 100% ικανοποιεί τους καθορισμένους ελέγχους. Στη συνέχεια, εξάγονται ως αποτελέσματα η ενέργεια που καταναλώνεται σε ωριαία βάση, σε kWh. Στην παρούσα μελέτη δεν έχουν ληφθεί υπόψη οι απαιτήσεις για ύγρανση ή αφύγρανση του χώρου.

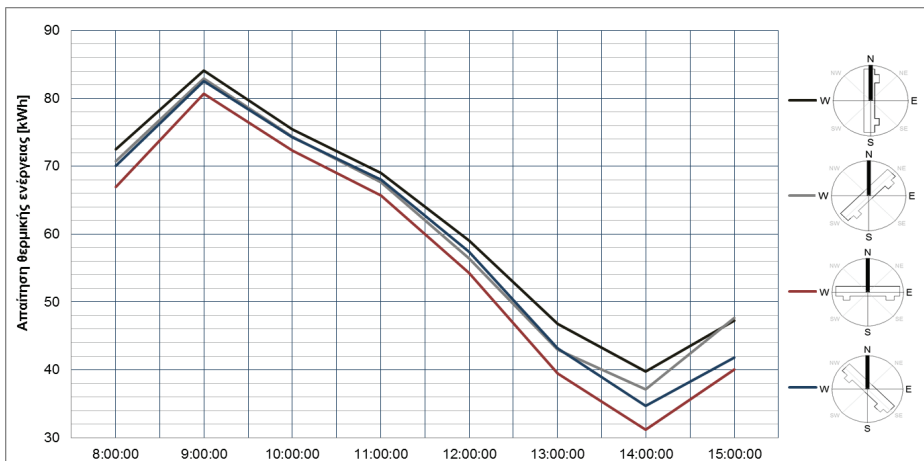
### 3.1. Προσανατολισμός του κτιρίου

Στο υπό μελέτη κτίριο όλα σχεδόν τα ανοίγματα είναι τοποθετημένα στις δύο μεγάλες όψεις του, περίπου σε ίσα μέρη. Επομένως, η μελέτη τεσσάρων βασικών προσανατολισμών είναι αρκετή για να εξαχθούν αντιπροσωπευτικά συμπεράσματα. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη περιστροφή του κτιρίου στους τέσσερις αυτούς προσανατολισμούς για κάθε τυπική μέρα του έτους, οδηγούν αδιαμφισβήτητα στο συμπέρασμα ότι ο πιο ευνοϊκός προσανατολισμός είναι εκείνος κατά τον οποίο ο βασικός άξονας του κτιρίου ταυτίζεται με αυτόν της ανατολής-δύσης.

Στον Πίνακα 5 παρουσιάζονται οι ετήσιες απαιτήσεις θερμικής ενέργειας στους μελετώμενους προσανατολισμούς, ενώ στην Εικόνα 4 παρουσιάζεται ενδεικτικά η επίδραση του προσανατολισμού του κτιρίου στην ωριαία απαίτηση θερμικής ενέργειας μία τυπική μέρα του Ιανουαρίου. Ο ανατολικός-δυτικός προσανατολισμός οδηγεί στην υψηλότερη ενεργειακή κατανάλωση, με μέγιστη ωριαία τιμή τις 84 kWh, ενώ ο βόρειος-νότιος φαίνεται ο καταλληλότερος από άποψη κατανάλωσης, καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του σχολείου τη συγκεκριμένη ημέρα.

Πίνακας 5: Ετήσια απαίτηση θερμικής ενέργειας στους μελετώμενους προσανατολισμούς, σε kWh

Προσανατολισμός	Ανατολικός	Νοτιοανατολικός	Νότιος	Νοτιοδυτικός
Απαίτηση θερμικής ενέργειας	33.652	32.600	31.715	33.356

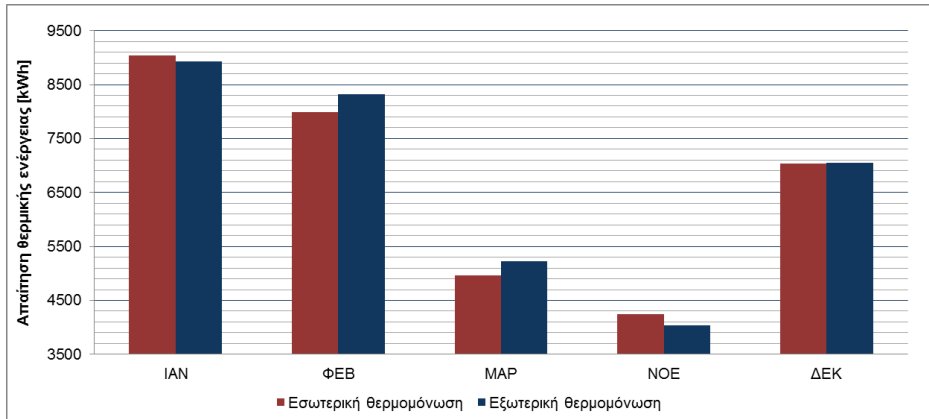


Εικόνα 4: Επίδραση του προσανατολισμού του κτιρίου στην ωριαία απαίτηση θερμικής ενέργειας μία τυπική μέρα του Ιανουαρίου

Βέβαια, στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι το συμπέρασμα αυτό αφορά μόνον στις καθαρές απαιτήσεις για τη θέρμανση των κτιρίων μέσα στη θερμαντική περίοδο. Δεν συγκρίνονται δηλαδή απαιτήσεις θερμικής ενέργειας εκτός περιόδου θέρμανσης για θέρμανση ή ψύξη, όπως και δεν προσδιορίζονται ώρες πιθανής υπερθέρμανσης χώρων.



Στην Εικόνα 6 παρουσιάζεται η ενδεικτικά η μηνιαία απαίτηση θερμικής ενέργειας στους βασικούς μήνες θέρμανσης κατά τη λειτουργία του πρώτου σεναρίου. Οι ετήσιες απαιτήσεις ενέργειας για τη θέρμανση του σχολείου για τα διάφορα σενάρια λειτουργίας συνοψίζονται στον Πίνακα 7.



Εικόνα 6: Μηνιαία απαίτηση θερμικής ενέργειας στους βασικούς μήνες θέρμανσης κατά τη λειτουργία του σεναρίου 1

Εκτός από τις ετήσιες και μηνιαίες τιμές κατανάλωσης ενέργειας, εξετάστηκε η διακύμανση της κατανάλωσης ενέργειας και της θερμοκρασίας χώρων του κτιρίου κατά τη διάρκεια κάποιων τυπικών ημερών λειτουργίας του σχολείου, για τη διεξαγωγή ακριβέστερων συμπερασμάτων. Αυτές είναι, η πρώτη ημέρα λειτουργίας τον Ιανουάριο, μετά τις διακοπές των Χριστουγέννων, η πιο κρύα ημέρα του χρόνου, που εντοπίζεται το μήνα Φεβρουάριο, καθώς και κάποιες τυπικές Δευτέρες και Παρασκευές στο μέσο των μηνών Ιανουαρίου, Φεβρουαρίου, Νοεμβρίου και Δεκεμβρίου.

Πίνακας 7: Μηνιαίες, ετήσιες και τιμές αιχμής για την απαίτηση θερμικής ενέργειας για κάθε σενάριο και τύπο κτιρίου, σε kWh

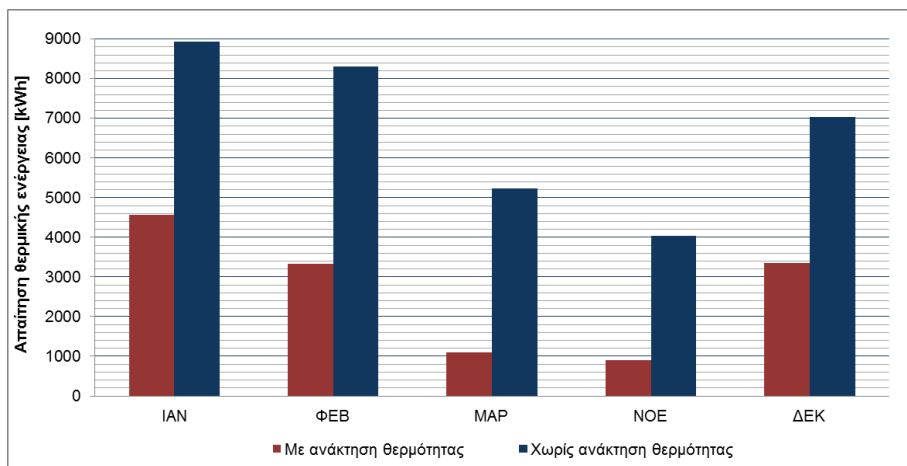
Μήνας	Σενάριο 1: ρύθμιση 8πμ-15μμ		Σενάριο 2: 24ωρη ρύθμιση		Σενάριο 3: 2 ώρες αναθέρμανση	
	Εσωτερική μόνωση	Εξωτερική μόνωση	Εσωτερική μόνωση	Εξωτερική μόνωση	Εσωτερική μόνωση	Εξωτερική μόνωση
ΙΑΝ	9.037	8.930	9.075	8.948	9.399	9.188
ΦΕΒ	7.993	8.318	8.003	8.318	8.249	8.488
ΜΑΡ	4.968	5.227	4.968	5.227	5.073	5.278
ΑΠΡ	21	41	21	41	22	40
ΟΚΤ	190	16	190	16	200	16
ΝΟΕ	4.243	4.042	4.243	4.042	4.353	4.106
ΔΕΚ	7.037	7.044	7.039	7.045	7.279	7.220
ΣΥΝΟΛΟ	33.489	33.618	33.539	33.637	34.575	34.336
ΑΙΧΜΗ	140	141	140	141	130	131

#### 3.4. Μηχανικός αερισμός με διατάξεις ανάκτησης

Στη συνέχεια διερευνήθηκε το πιθανό ενεργειακό όφελος από την εγκατάσταση διατάξεων μηχανικού αερισμού-εξαερισμού με ανάκτηση θερμότητας και απόδοση εναλλαγής 65% στο σχολείο. Η λειτουργία αυτών των διατάξεων θεωρήθηκε ότι εξασφαλίζει πλήρως τους ρυθμούς που απαιτούνται

και είναι ίσοι με αυτούς του φυσικού αερισμού. Κατά τη λειτουργία των διατάξεων μηχανικού αερισμού δεν υπάρχει παράλληλα και φυσικός αερισμός. Το κτίριο στο οποίο εφαρμόστηκε το συγκεκριμένο κομμάτι της προσομοίωσης είναι εκείνο με την εξωτερική θερμομόνωση του κελύφους.

Λόγω του σημαντικού περιορισμού των απωλειών αερισμού, η συνολική ετήσια απαίτηση θερμικής ενέργειας μειώθηκε κατά 61% στο πρώτο και στο δεύτερο σενάριο και κατά 63% στο τρίτο σενάριο λειτουργίας του συστήματος θέρμανσης. Επίσης η μέγιστη ζήτηση αιχμής μειώθηκε, από τα 141 kW στα 83 kW στο πρώτο και το δεύτερο, και από τα 131 kW στα 60 kW στο τρίτο σενάριο. Στην Εικόνα 7 παρουσιάζεται ενδεικτικά η μηνιαία απαίτηση θερμικής ενέργειας στους βασικούς μήνες θέρμανσης κατά τη λειτουργία του πρώτου σεναρίου.



Εικόνα 7: Μηνιαία απαίτηση θερμικής ενέργειας στους βασικούς μήνες θέρμανσης κατά τη λειτουργία του σεναρίου 1

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα μελέτη είχε ως στόχο να απαντηθούν ερωτήματα που προκύπτουν κατά το σχεδιασμό ενός σχολικού κτιρίου, καθώς και να βρεθούν οι ενεργειακά αποδοτικότερες λύσεις σε πιο σύνθετα προβλήματα που σχετίζονται με την επιλογή και τη λειτουργία των συστημάτων του. Τα ερωτήματα αυτά αφορούν στον ορθό προσανατολισμό του κτιρίου, τη θερμομόνωσή του, τη λειτουργία του συστήματος θέρμανσης και την αναγκαιότητα ή μη εγκατάστασης συστημάτων μηχανικού αερισμού-εξαερισμού με ανάκτηση.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν επιβεβαιώνουν το ότι ο ευνοϊκότερος προσανατολισμός των κτιρίων είναι αυτός, στον οποίο ο βασικός τους άξονας ταυτίζεται με τον άξονα ανατολής-δύσης.

Η εφαρμογή θερμικής μόνωσης από την εσωτερική πλευρά των αδιαφανών δομικών στοιχείων είναι ελαφρώς ευνοϊκότερη σε σχέση με την εξωτερική, από την άποψη των τελικών απαιτήσεων ενέργειας για τη θέρμανση των χώρων. Η διαφορά όμως είναι πολύ μικρή για να δικαιολογήσει το αυξημένο κόστος εφαρμογής και τα προβλήματα που επιφέρει.

Σχετικά με τη λειτουργία του συστήματος θέρμανσης, καταδείχτηκε ότι εάν εφαρμοστούν τα ελάχιστα όρια θερμομόνωσης που επιβάλλονται από τον ΚΕΝΑΚ στα κτίρια, η θερμοκρασία στο εσωτερικό των χώρων του κτιρίου σπάνια πέφτει σε τιμές κάτω από τους 15 °C, ανεξάρτητα από το σενάριο ρύθμισης του θερμοστάτη που θα ακολουθηθεί. Έτσι δεν υπάρχει ανάγκη για θέρμανση κατά τη διάρκεια της νύχτας, ενώ δεν υπάρχουν ανάγκες και για πρωινή αναθέρμανση. Παρ' όλα αυτά, μία ή δύο ώρες πρωινής αναθέρμανσης μπορούν να περιορίσουν την απαίτηση εγκατεστημένης ισχύος από τα συστήματα θέρμανσης σχεδόν κατά 10% και να βελτιώσουν τις συνθήκες θερμικής άνεσης στους χώρους, επιβαρύνοντας ελάχιστα (περίπου κατά 2%) την κατανάλωση ενέργειας.

Ως προς την αναγκαιότητα ύπαρξης διατάξεων μηχανικού αερισμού-εξαερισμού με ανάκτηση, θα μπορούσε κανείς να πει ότι είναι το καθοριστικό βήμα για τη μείωση των απαιτήσεων και των

καταναλώσεων ενέργειας για τη θέρμανση των σχολείων (ιδιαίτερα στις δύσκολες κλιματικές ζώνες Γ και Δ της χώρας). Αυτό γιατί επιφέρουν 50% και πλέον μείωση της απαίτησης ενέργειας για θέρμανση και αντίστοιχη μείωση της απαίτησης ισχύος του συστήματος θέρμανσης. Παρ' όλα αυτά πρέπει να προηγηθεί μελέτη οικονομικής σκοπιμότητας (για τη Ζώνη Γ κυρίως), αφού η εγκατάσταση αυτών των συστημάτων είναι εξαιρετικά δαπανηρή (εξοπλισμός και δίκτυα) και η λειτουργία τους απαιτεί σειρά διαδικασιών και ελέγχων, ρυθμίσεων και συντήρησης που δεν υπάρχουν σήμερα στα σχολεία.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] EU (2010) "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*, pp. 13–35.
- [2] Commission, European. The Directorate-General for Energy. Available at: <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-effic>.
- [3] Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Κ.Α.Π.Ε.) και Ευρωπαϊκή Επιτροπή Γενική Διεύθυνση για την Ενέργεια (XVII) (1995) «Οδηγίες για Θερμική-Οπτική Ανεση και Εξοικονόμηση Ενέργειας σε Δημόσια Σχολεία».
- [4] Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας και Πετρολιόγκη, Μ. (2016) «Ενεργειακή Απόδοση Δημοσίων Κτιρίων».
- [9] Kikidou, V. (2017) "Energy Assessment of Building Physics Principles in Secondary Education Buildings". Μεταπτυχιακή εργασία, Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος.
- [8] EnergyPlus *Weather Data - Thessaloniki*. Available at: <https://energyplus.net/weather-search/thessaloniki>
- [7] Greek Parliament (2010) "Regulation for the Energy Performance of Buildings (K.EN.A.K.)," *Official Gazette of the Hellenic Republic*, pp. 5333–5356.
- [8] Solmaz, A. S. (2016) "An approach to identify the optimal solutions in the context of energy and cost criteria for buildings in different climates," *MEGARON / Yildiz Technical University, Faculty of Architecture E-Journal*, 11(4), pp. 592–606.
- [9] Lee, K. H. (2013) "Heat Balance Analysis of Low-E Window Impacts on Thermal Load in Buildings," pp. 306–311.

## ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΜΕΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΦΩΤΙΣΜΟΥ ΛΟΓΩ ΧΡΗΣΗΣ ΦΥΣΙΚΟΥ ΦΩΤΙΣΜΟΥ

**Α. Τσαγκρασούλης<sup>1,\*</sup>, Λ. Δούλος<sup>1,2</sup>, Α. Κονταδάκης<sup>1</sup>, Φ. Τοπαλής<sup>2</sup>**

<sup>1\*</sup> Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, Παν. Θεσσαλίας, Πεδίο Αρεως 38443, Βόλος,  
e-mail: atsagras@uth.gr

<sup>2</sup> Εργαστήριο Φωτοτεχνίας, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχ. Υπολογιστών,  
ΕΜΠ

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η χρήση του φυσικού φωτισμού αποτελεί κυρίαρχη στρατηγική μείωσης της ενεργειακής κατανάλωσης σε κτίρια γραφείων. Ο μετασχηματισμός της στρατηγικής αξιοποίησης φυσικού φωτισμού σε εξοικονόμηση ενέργειας προϋποθέτει την υιοθέτηση κάποιου συστήματος ρύθμισης της φωτεινής ροής των φωτιστικών με τη βοήθεια αισθητήρων φωτισμού. Η ευρεία υιοθέτηση αυτών των συστημάτων, παρόλο το εξαιρετικά μεγάλο δυναμικό εξοικονόμησης, επηρεάζεται δυσμενώς από μια σειρά αιτιών, όπως η σύνθετη διαδικασία σχεδιασμού, λόγω της μοναδικότητας του κάθε χώρου και των παραμέτρων σχεδιασμού (προσανατολισμός, χαρακτηριστικά εξωτερικών ανοιγμάτων, σκίαση κλπ κλπ), η αναξιοπιστία των υπολογιστικών μεθόδων αλλά και η μη αποδοχή των συστημάτων ρύθμισης από τους χρήστες του χώρου όταν αυτά δεν έχουν τεθεί σε λειτουργία κατάλληλα. Συνεπώς η διαθεσιμότητα του φυσικού φωτισμού και τα πιθανά εργαλεία εκτίμησης της εξοικονόμησης ενέργειας είναι κρίσιμα για την τελική απόφαση. Είναι προφανές ότι η χρήση διαφορετικών εργαλείων στα διάφορα στάδια σχεδιασμού, ξεκινώντας από τα απλά στην αρχή του σχεδιασμού και καταλήγοντας στα περισσότερο πολύπλοκα στο τέλος, μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την εκτίμηση της συνολικής εξοικονόμησης. Στην παρούσα εργασία εξετάζονται μια σειρά μεθόδων υπολογισμού και τα αποτελέσματα της εξοικονόμησης συγκρίνονται με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την πλήρη προσομοίωση ενός συστήματος ρύθμισης της φωτεινής ροής συμπεριλαμβάνοντας και τα φωτιστικά σώματα και το σύστημα ελέγχου με τους αισθητήρες φωτισμού. Η πλήρης προσομοίωση απαιτεί α) τον ακριβή υπολογισμό του φυσικού φωτισμού, β) την ακριβή προσομοίωση της απόδοσης του αισθητήρα και γ) την αξιόπιστη προσομοίωση της εξόδου του συστήματος τεχνητού φωτισμού σε σχέση με την τάση ελέγχου. Τα δυο τελευταία χαρακτηριστικά έχουν μετρηθεί εργαστηριακά. Τα αποτελέσματα εμφανίζουν σημαντικές διαφορές οι οποίες εξαρτώνται από την μεθοδολογία με τις μεγαλύτερες κατ' απόλυτη τιμή (74%) να εμφανίζονται ανάμεσα στην πλήρη προσομοίωση και την εκτίμηση του δυναμικού εξοικονόμησης με χρήση Παραγόντων Φυσικού Φωτισμού και τις μικρότερες μεταξύ των μεθοδολογιών προσομοίωσης (~1%).

**Λέξεις Κλειδιά:** *Εξοικονόμηση, ηλεκτροφωτισμός, φυσικός φωτισμός*

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η επίδραση του φωτισμού στο συνολικό ενεργειακό ισοζύγιο των κτηρίων γραφείων είναι εξαιρετικά σημαντική με την κατανάλωση για φωτισμό να αντιστοιχεί στο 17% της συνολικής ηλεκτρικής κατανάλωσης σε κτίρια γραφείων [1]. Από την ανάλυση των ενεργειακών πιστοποιητικών στην Ελλάδα από το 2011 έως το 2015 η κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας από φωτισμό σε κτίρια γραφείων αντιστοιχεί σε 39% της συνολικής κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας [2]. Συνεπώς φαίνεται ότι υπάρχει ένα σημαντικό δυναμικό εξοικονόμησης λόγω υιοθέτησης πιο αποδοτικών τεχνολογιών ή/και μείωσης των ωρών λειτουργίας λόγω υιοθέτησης κάποιου αυτοματισμού (π.χ. αισθητήρες παρουσίας, φωτισμού). Η χρήση του φυσικού φυσικού φωτισμού μπορεί να οδηγήσει σε εξοικονόμηση από 22-70% [3]. Έχουν προταθεί διάφορες μεθοδολογίες υπολογισμού της συγκεκριμένης εξοικονόμησης οι οποίες καθώς η υπολογιστική ισχύς αυξανόταν γινόταν περισσότερο ακριβείς και συγχρόνως χρονοβόρες. Προφανώς ανάλογα με την μεθοδολογία που χρησιμοποιείται είτε στα αρχικά στάδια σχεδιασμού είτε στην τελική φάση εκτίμησης της ενεργειακής κατανάλωσης κάποιου κτιρίου, τα αποτελέσματα που αφορούν την εξοικονόμηση από το σύστημα φωτισμού λόγω χρήσης του φυσικού φωτισμού δεν είναι ίδια. Αυτό –μεταξύ άλλων- είναι ένα από τα προβλήματα της μειωμένης διείσδυσης συστημάτων ελέγχου φωτισμού.

Στην παρούσα εργασία συγκρίνονται έξι μέθοδοι υπολογισμού αυτής της εξοικονόμησης που καλύπτουν όλο το εύρος των διαθέσιμων τεχνικών από απλές εμπειρικές σχέσεις μέχρι την πλήρη προσομοίωση του συστήματος ελέγχου.

## 2. ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΦΩΤΙΣΜΟΥ ΛΟΓΩ ΧΡΗΣΗΣ ΦΥΣΙΚΟΥ ΦΩΤΙΣΜΟΥ

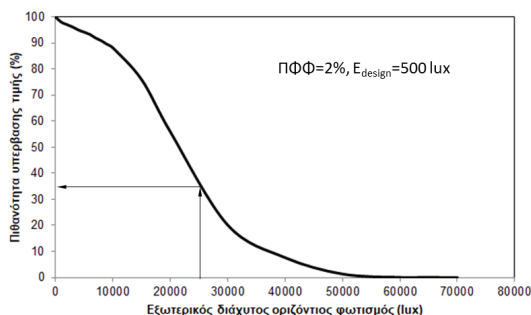
Είναι προφανές ότι η εκτίμηση της εξοικονόμησης από τη χρήση του φυσικού φωτισμού πραγματοποιείται σε περιοχή του κτιρίου που έχει πρόσβαση στο φυσικό φωτισμό. Συνήθως είναι περιοχές κοντά σε ανοίγματα (περιμετρικές ζώνες). Για την εκτίμηση του βάθους των περιμετρικών ζωνών χρησιμοποιούνται είτε μόνο γεωμετρικά δεδομένα είτε υπολογισμός της κατανομής της έντασης φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας [4]. Η εισαγωγή της περιμετρικής περιοχής συνδέεται και με τον έλεγχο των φωτιστικών αφού όλα ανήκουν σε αυτή μπορούν να ελεγχονται με κοινό τρόπο.

Ετσι, η εκτίμηση της εξοικονόμησης από το σύστημα ηλεκτροφωτισμού μπορεί να πραγματοποιηθεί με τον υπολογισμό των επιπέδων φυσικού φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας εντός της περιμετρικής ζώνης. Σε αυτή την περίπτωση βέβαια αυτό που εκτιμάται είναι το δυναμικό εξοικονόμησης αφού δεν λαμβάνεται καθόλου υπόψη η περιγραφή του συστήματος ρύθμισης της φωτεινής ροής των φωτιστικών (δηλ. αισθητήρας, ελεγκτής και ρυθμιστικές διατάξεις έναυσης των λαμπτήρων). Έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές για τον υπολογισμό της προαναφερθείσας εξοικονόμησης με την πιο απλή από αυτές να βασίζεται στην κατανομή των Παραγόντων Φυσικού Φωτισμού (ΠΦΦ). Ετσι οι Li & Tsang [5] θεωρούν ότι η επίτευξη μέσων τιμών ΠΦΦ μεγαλύτερων του 5% συνεπάγεται τη μη χρήση του συστήματος ηλεκτροφωτισμού, μεταξύ 2-5% η εξοικονόμηση είναι 50% και στην περίπτωση που ο μέσος ΠΦΦ είναι μικρότερος του 2% η εξοικονόμηση είναι μηδενική. Παρότι απλή σαν προσέγγιση έχει το μειονέκτημα ότι στην πλειοψηφία των περιπτώσεων το σύστημα φωτισμού δεν χωρίζεται σε τρεις διαφορετικές περιοχές οι οποίες ελέγχονται/ρυθμίζονται ξεχωριστά και συνεπώς η εκτίμηση της εξοικονόμησης δεν είναι πολύ ακριβής. Γενικά λόγω της απλότητας του υπολογισμού των ΠΦΦ, χρησιμοποιούνται και στην πρόταση του CEN/TC 169/WG 11 –«Daylight» για την κατηγοριοποίηση των συνθηκών φυσικού φωτισμού στο εσωτερικό κάποιου χώρου. Η κατηγοριοποίηση βασίζεται σε δύο τιμές ΠΦΦ, μια που χρειάζεται να επιτευχθεί στο 50% της επιφάνειας εργασίας (0.8μ) στο 50% του χρόνου (δηλ. ~ 4380 ώρες ανά έτος) και μια μικρότερη που πρέπει να επιτευχθεί στο 100% της επιφάνειας εργασίας πάλι στο 50% του χρόνου. Επίσης έχει προταθεί και ένας αριθμός τεχνικών οι οποίες έχουν προκύψει από επεξεργασία αποτελεμάτων προσομοιώσεων [6]. Στην παρούσα εργασία έχουν επιλεγεί πέντε μέθοδοι που αντιπροσωπεύουν τεχνικές που χρησιμοποιούνται σήμερα καλύτερα από τις άλλες από την αρχική σχεδίαση μέχρι την προσομοίωση και τα αποτελέσματά τους συγκρίνονται με αποτελέσματα που προκύπτουν από μέθοδο πλήρους προσομοίωσης του συστήματος ρύθμισης (μέθοδος 6).

### 2.1. Μέθοδος 1: Χρήση ΠΦΦ

Η μέση τιμή του ΠΦΦ μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της εξοικονόμησης σε συνδυασμό με δεδομένα οριζόντιου διάχυτου φωτισμού. Χρειάζεται να υπολογισθεί η πιθανότητα υπέρβασης τιμών του εξωτερικού διάχυτου φωτισμού για κάποιο χρονικό διάστημα στο έτος (π.χ.

8:00-17:00). Συνεπώς αν η ένταση φωτισμού σχεδιασμού είναι 500 lux μπορεί να υπολογισθεί και το ποσοστό των ωρών που η ένταση φωτισμού είναι μεγαλύτερη από την τιμή σχεδιασμού. Το συγκεκριμένο ποσοστό προσεγγίζει και τη σχετική εξοικονόμηση [7]. Επειδή η κατανομή της λαμπρότητας στον ουράνιο θόλο εξαρτάται από το αζιμούθιο έχουν προταθεί συντελεστές διόρθωσης των ΠΦΦ στους τέσσερις κύριους προσανατολισμούς [8] αλλά αυτοί εφαρμόζονται μόνο σε περιπτώσεις χειροκίνητης εναυσης/σβέσης του συστήματος. Ο τρόπος υπολογισμού παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα. Ο μέσος ΠΦΦ σε κάποιο χώρο είναι 2% με την τιμή έντασης φωτισμού σχεδιασμού 500 lux. Να τονισθεί εδώ ότι στην πρόταση του CEN/TC 169/WG 11 –«Daylight» για την Αθήνα ο ΠΦΦ που χρειάζεται ώστε να επιτευχθούν τιμές φωτισμού  $\geq 500$  lux στο 50% του χρόνου είναι 2.6%.



Σχήμα 1. Εκτίμηση του ποσοστού των ωρών στο οποίο η τιμή φωτισμού είναι μεγαλύτερη από 25000 lux. Η τιμή αυτή υπολογίσθηκε από την διαίρεση της τιμής σχεδιασμού με τον ΠΦΦ. Η καμπύλη αναφέρεται στην Αθήνα για ωράριο λειτουργίας 8:00-17:00

## 2.2. Μέθοδος 2: Χρήση ΠΦΦ και μέσης μηνιαίας ηλιοφάνειας

Μια παραλλαγή της παραπάνω μεθόδου είναι και αυτή που βασίζει τον υπολογισμό της εξοικονόμησης με βάση την μέση τιμή του ΠΦΦ και την μέση μηνιαία ηλιοφάνεια [9].

## 2.3. Μέθοδος 3: EN 15193

Η χρήση του ΠΦΦ προτείνεται και από το EN15193:2017 [10]. Εδώ ο υπολογισμός της μέσης τιμής πραγματοποιείται στην περιμετρική ζώνη με απλή μέθοδο που παρέχεται από το πρότυπο ή εναλλακτικά μπορεί να υπολογισθεί και με κάποιο εξωτερικό λογισμικό. Η κατανάλωση ενέργειας για φωτισμό ( $W_{L,t}$ ) υπολογίζεται με βάση την παρακάτω εξίσωση:

$$W_{L,t} = \Sigma \{ (P_n \cdot F_c) \cdot [(t_b \cdot F_o \cdot F_D) + (t_n \cdot F_o)] \} / 1000 \text{ (kWh)} \quad (1)$$

Όπου :

$P_n$  η εγκατεστημένη ισχύς του συστήματος φωτισμού,  $F_c$  ο συντελεστής διατήρησης σταθερών επιπέδων φωτισμού,  $t_b$  ο χρόνος λειτουργίας του συστήματος ηλεκτροφωτισμού κατά τη διάρκεια της ημέρας (σε ώρες),  $F_o$  ο συντελεστής επίδρασης χρηστών,  $F_D$  ο συντελεστής επίδρασης φυσικού φωτισμού,  $t_n$  ο χρόνος λειτουργίας κατά τη διάρκεια της νύχτας (σε ώρες). Στην προαναφερθείσα κατανάλωση ενέργειας προστίθεται και η παρασιτική κατανάλωση που οφείλεται στη φόρτιση του συστήματος ασφαλείας και στο σύστημα ελέγχου.

Καθοριστικής σημασίας στον υπολογισμό της κατανάλωσης αποτελεί η εκτίμηση του συντελεστή  $F_D$  ο οποίος εκτιμάται με την βοήθεια του συντελεστή παροχής φυσικού φωτισμού ( $F_{DS}$ ) και του συντελεστή απόδοσης συστήματος ελέγχου του φωτισμού ( $F_{DC}$ ). Ο τελευταίος καθορίζει και την ικανότητα του συστήματος ελέγχου να εκμεταλλευθεί τον φυσικό φωτισμό.

$$F_D = 1 - F_{DS} \cdot F_{DC} \quad (2)$$

Αν ο υπολογισμός γίνεται σε μηνιαία βάση τότε ο παραπάνω τύπος τροποποιείται λαμβάνοντας υπόψη την μηνιαία διανομή μέσω του συντελεστή  $v$  με αποτέλεσμα η προηγούμενη εξίσωση να τροποποιηθεί σε :

$$F_{D,j} = 1 - v_j \cdot F_{DS} \cdot F_{DC} \quad (3)$$

Όπου  $j$  ο μήνας.

Ο συντελεστής  $F_{DS}$ , μπορεί να υπολογισθεί είτε με την βοήθεια της μέσης τιμής του ΠΦΦ στην περιμετρική ζώνη είτε με τη βοήθεια προσομοίωσης. Στην εργασία [11] για την προηγούμενη έκδοση του πρότυπου EN 15193, είχε εκτιμηθεί ο συντελεστής  $F_{DS}$  με προσομοίωση χρησιμοποιώντας την παρακάτω εξίσωση:

$$F_{DS} = \frac{\int_0^{t_A} E_D dt}{E_s * t_A} \quad (4)$$

Όπου  $E_D$  είναι η ένταση φωτισμού λόγω φυσικού φωτισμού,  $E_s$  η ένταση φωτισμού σχεδιασμού (π.χ. 500 lux) και  $t_A$  ο χρόνος λειτουργίας. Στην εξίσωση όταν ισχύει  $E_D < E_s$  τότε  $E_D = E_D$  διαφορετικά  $E_D = E_s$ . Φαίνεται ότι η τιμή του  $F_{DS}$  που υπολογίζεται από την προσομοίωση είναι μεγαλύτερη από αυτή που υπολογίζεται με χρήση του ΠΦΦ. Στην νέα έκδοση του πρότυπου προτείνεται μια μεθοδολογία η οποία λαμβάνει υπόψη της τον χρόνο στον οποίο υπάρχει πιθανότητα να χρησιμοποιηθεί ένα σύστημα σκίασης. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία χρησιμοποιεί τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος ρύθμισης ή έναυσης/σβέσης του συστήματος φωτισμού μέσω της επιλογής των προαναφερθέντων συντελεστών αλλά τελικά η εξοικονόμηση υπολογίζεται με βάση την ένταση φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας.

Η χρήση του ΠΦΦ για την εκτίμηση της έντασης φωτισμού είναι μεν ένας απλός στην εκτέλεσή του υπολογισμός δεν παύει όμως να αντιπροσωπεύει ένα υπολογισμό που βασίζεται στη δυσμενέστερη περίπτωση (νεφοσκεπής ουρανό). Σήμερα υπάρχει η δυνατότητα πλέον με χρήση τυπικών κλιματικών αρχείων να πραγματοποιηθεί υπολογισμός της έντασης φωτισμού στο εσωτερικό χώρων πολύπλοκης γεωμετρίας ετησίως με ωριαίο βήμα (ή και μικρότερο) [12,13,14].

#### 2.4. Μέθοδος 4<sup>η</sup>: Συνεχής αυτονομία φωτισμού (cDA)

Ετσι μπορεί να χρησιμοποιηθεί η συνεχής αυτονομία φωτισμού (cDA) η οποία είναι μια τροποποιημένη έκδοση της αυτονομίας φωτισμού (DA). Η τελευταία ορίζεται σαν το ποσοστό ωρών στο έτος (φυσικά εντός του ωραρίου λειτουργίας) στο οποίο η ένταση φωτισμού στο επίπεδο εργασίας είναι μεγαλύτερη από μια προεπιλεγμένη τιμή σχεδιασμού (π.χ. 500 lux). Προφανώς αν είναι μικρότερη από αυτή την τιμή τότε δεν λαμβάνεται καθόλου υπόψη η συγκεκριμένη ώρα. Στον υπολογισμό όμως της cDA υπολογίζεται ο λόγος της έντασης φωτισμού προς την αντίστοιχη σχεδιασμού και αυτός αθροίζεται στις τιμές των υπολοίπων ωρών [15].

#### 2.5. Μέθοδος 5: Energy+ a)Split flux b)DELIGHT

Από την στιγμή που είναι πλέον δυνατός ο υπολογισμός των ωριαίων τιμών φωτισμού στο εσωτερικό του κτιρίου είναι προφανές ότι τα αποτελέσματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε να πραγματοποιηθεί η επίδραση της όποιου εξοικονόμησης από το σύστημα φωτισμού στο ενεργειακό ισοζύγιο του κτιρίου. Συνεπώς οι αλγόριθμοι ενεργειακής προσομοίωσης κτιρίων περιλαμβάνουν και την δυνατότητα υπολογισμού του φυσικού φωτισμού μαζί με τον αλγόριθμο ελέγχου. Το EnergyPlus [16] χρησιμοποιεί τα κλάσματα φωτισμού (λόγος εσωτερικού προς εξωτερικό οριζόντιο φωτισμό). Υπάρχουν δύο κλάσματα, ένα για τον διάχυτο φωτισμό και ένα για τον άμεσο ηλιακό φωτισμό ο οποίος υπολογίζεται για ένα προκαθορισμένο αριθμό θέσεων του ήλιου. Τα προαναφερθέντα κλάσματα υπολογίζονται με την βοήθεια της μεθόδου Split Flux [17] η οποία έχει μεν το πλεονέκτημα της ταχύτητας υπολογισμού αλλά υστερεί σε ακρίβεια ιδίως στο τμήμα των υπολογισμών που σχετίζονται με τις εσωτερικές ανακλάσεις. Εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος DELIGHT [18] η οποία βασικά είναι μια μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (radiosity).

Μετα τον υπολογισμό των επιπέδων φυσικού φωτισμού σε κάποιο σημείο μπορεί να εκτιμηθεί η εξοικονόμηση από το σύστημα φωτισμού -το οποίο ελέγχεται από το συγκεκριμένο σημείο- με τη βοήθεια ενός ιδεατού συστήματος ρύθμισης (integral reset). Σε αυτό το ποσοστό της ισχύος του συστήματος φωτισμού  $f_p$  έχει μια γραμμική σχέση με το ποσοστό της εκπεμπόμενης φωτεινής ροής  $f_L$ . Αυτή η ροή υπολογίζεται ως εξής όταν η ένταση φωτισμού σχεδιασμού είναι 500 lux:

$$f_L = \max[0, (500 - E)/500] \quad (5)$$

$E$  είναι η τιμή της έντασης φωτισμού στο σημείο ελέγχου επί της επιφάνειας εργασίας. Το ελάχιστο ποσοστό της εκπεμπόμενης φωτεινής ροής ( $f_{Lmin}$ ) αντιστοιχεί σε ένα ελάχιστο ποσοστό ισχύος  $f_{Pmin}$ . Αυτά τα ελάχιστα ποσοστά εξαρτώνται από το είδος της ρυθμιστικής διάταξης. Η σχέση μεταξύ  $f_p$  και  $f_L$  είναι η εξής :

$$\text{Εαν } f_L < f_{Lmin} \text{ τότε } f_p = f_{pmin} \quad (6)$$

$$\text{Εαν } f_{Lmin} \leq f_L \leq 1 \text{ τότε } f_p = (f_L + (1 - f_L) * f_{pmin} - f_{Lmin}) / (1 - f_{Lmin}) \quad (7)$$

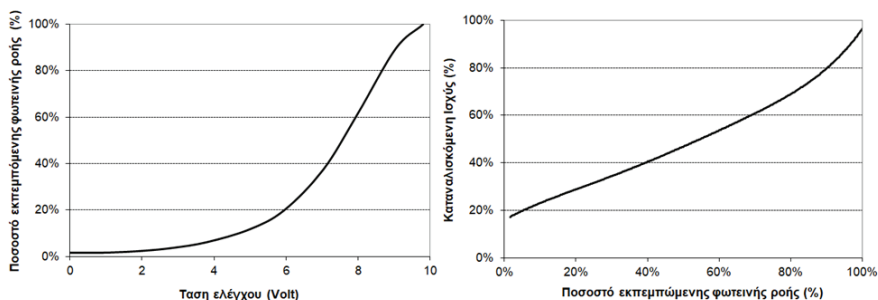
Ακριβώς η ίδια προαναφερθείσα μεθοδολογία μπορεί να επαναληφθεί με χρήση του RADIANCE ή του DAYSIM για τον υπολογισμό των ωριαίων τιμών φωτισμού σε κάποιο σημείο το οποίο θα χρησιμοποιηθεί σαν σημείο ελέγχου για το σύστημα ηλεκτροφωτισμού.

Όλες οι προαναφερθείσες μέθοδοι υπολογισμού βασίζονται στην εκτίμηση των επιπέδων φυσικού φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας είτε λαμβάνοντας υπόψη την μέση τιμή σε κάποια περιοχή είτε σε κάποιο σημείο. Η θέση του σημείου απομακρυσμένη από το άνοιγμα η εξοικονόμηση ενέργειας απτο το σύστημα φωτισμού μειώνεται, βελτιώνεται όμως το ποσοστό των ωρών σο χρόνο που οι τιμές φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας είναι μεγαλύτερες από την τιμή σχεδιασμού [19].

Προφανώς η απάντηση στα προβλήματα που προαναφέρθηκαν βρίσκεται στην πλήρη προσομοίωση του συστήματος ελέγχου του φωτιστικού λαμβάνοντας υπόψη τις ρυθμιστικές διατάξεις αλλά και την χωρική ευαισθησία του αισθητήρα ο οποίος και τοποθετείται στην οροφή. Ήδη υπάρχουν λογισμικά που λαμβάνουν υπόψη τις ιδιότητες του αισθητήρα φωτισμού [20,21]. Συνεπώς αυτό που λείπει από μια πλήρη μεθοδολογία σήμερα είναι η δημιουργία μέσω μετρήσεων της σχέσης ανάμεσα στην τάση ελέγχου μιας ρυθμιστικής διάταξης (ballast, driver) και το ποσοστό της εκπεμπόμενης ροής από το φωτιστικό καθώς επίσης και η υιοθέτηση όλων των δυνατών αλγορίθμων ελέγχου μαζί φυσικά με την χωρική ευαισθησία των αισθητήρων. Στην συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιείται μια τέτοια μεθοδολογία και συγκρίνονται τα αποτελέσματα της εξοικονόμησης ενέργειας σε μηνιαία βάση με τις υπόλοιπες.

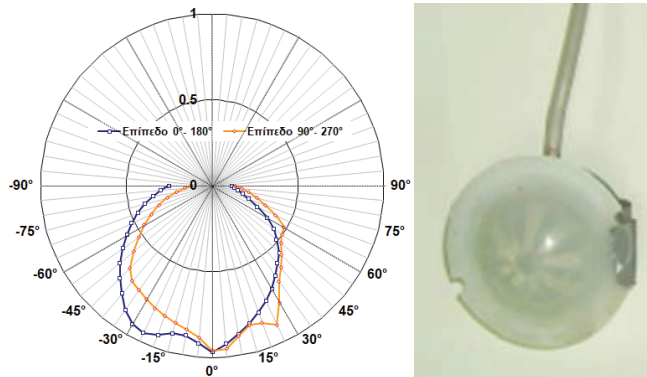
## 2.6. Μέθοδος 6: Πλήρης προσομοίωση συστήματος

Τα αποτελέσματα της εξοικονόμησης ενέργειας από το σύστημα ηλεκτροφωτισμού όπως αυτά υπολογισθηκαν από τις πέντε (5) παραπάνω μεθόδους συγκρίθηκαν με μια νέα μέθοδο (Μέθοδος 6) στην οποία προσομοιώνεται η πλήρης λειτουργία ενός συστήματος ρύθμισης της φωτεινής ροή των φωτιστικών. Η ηλεκτρονική διάταξη ρύθμισης της φωτεινής ροής του λαμπτήρα έχει μετρηθεί εργαστηριακά [22] και οι χαρακτηριστικές της καμπύλες παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 2. Στο αριστερό διάγραμμα είναι η καμπύλη μεταξύ ποσοστού εκπεμπόμενης ροής σε σχέση με την τάση ελέγχου ενώ στο δεξιό η καμπύλη μεταξύ ποσοστού καταναλισκόμενης ισχύος και ποσοστού εκπεμπόμενης ροής.

Ο αισθητήρας έχει τοποθετηθεί στο κέντρο του χώρου στην οροφή και η χωρική του ευαισθησία έχει μετρηθεί και παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 3. Χωρική απόκριση αισθητήρα φωτισμού

Η μοντελοποίηση του αισθητήρα στο Radiance πραγματοποιήθηκε με την εξής τεχνική. Γύρω από το σημείο τοποθέτησης του αισθητήρα χρησιμοποιήθηκε μια μικρή διαφανής σφαίρα ακτίνας 1 cm της οποίας η διαπερατότητα στο ορατό τροποποιείται με βάση το αρχείο που περιέχει την χωρική απόκριση του αισθητήρα [23].

Ο αλγόριθμος ελέγχου που χρησιμοποιήθηκε είναι ο ολοκληρωτικός κλειστού βρόχου (integral reset) ο οποίος ρυθμίζει την φωτεινή ροή των λαμπτήρων με τέτοιο τρόπο ώστε το συνολικό σήμα του αισθητήρα (που οφείλεται στην επίδραση τόσο του τεχνητού όσο και του φυσικού φωτισμού) να διατηρείται σταθερό. Το ποσοστό ( $f_{Lmin}$ ) κατά το οποίο ρυθμίζεται η φωτεινή ροή των φωτιστικών δίνεται από την σχέση :

$$f_L(t) = 1 - (S_D(t) / S_{Edesign}) \quad (8)$$

όπου  $S_D$  είναι το σήμα του αισθητήρα που οφείλεται στον φυσικό φωτισμό μόνο ενώ η παράμετρος  $S_{Edesign}$  είναι το σήμα από τον αισθητήρα την νύχτα (έλλειψη φυσικού φωτισμού) όταν το σύστημα λειτουργεί και ρυθμίζεται ώστε να παρέχει την ένταση φωτισμού σχεδιασμού στην επιφάνεια εργασίας. Με τη γνώση του ποσοστού  $f_{Lmin}$  μπορεί να υπολογισθεί το ποσοστό της καταναλισκόμενης ισχύος από το σύστημα με βάση την σχέση [22] :

$$f_p = 0.97 f_L^6 + 0.23 f_L^5 - 3.67 f_L^4 + 4.08 f_L^3 - 1.66 f_L^2 + 0.84 f_L + 0.15 \quad (9)$$

Όπως έχει ήδη αναφερθεί για το συγκεκριμένο σύστημα  $f_{Lmin}=5\%$  και  $f_{Pmin}=19\%$ .

### 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Για να πραγματοποιηθεί η σύγκριση των μεθόδων υπολογισμού της εξοικονόμησης ενέργειας από το σύστημα φωτισμού χρησιμοποιήθηκε ένα τυπικό δωμάτιο γραφείων του οποίου τα χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 1. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά τυπικού δωματίου γραφείων.

Διαστάσεις	3.4x5.4x2.7 m
Ποσοστό ανοίγματος επι της πρόσοψης (Glazing to Wall Ratio , GWR)	20%, 100% χωρίς να υπάρχουν πλαίσια. Το πρώτο ποσοστό αντιπροσωπεύει το μικρότερο άνοιγμα σύμφωνα με τον Κτιριοδομικό Κανονισμό ενώ το δεύτερο τη μέγιστη τιμή που μπορεί να έχει.
Διαπερατότητα υαλοπίνακα	0.64

Ανακλαστικότητα δαπέδου, οροφής, τοίχων	0.2,0.8,0.5
Προσανατολισμός	Εξετάσθηκαν δύο προσανατολισμοί, Νότιος και Βόρειος
Σύστημα φωτισμού	4 φωτιστικά με ένα λαμπτήρα το καθένα T16 54W. Εγκατεστημένη ισχύς 11.7 W/m <sup>2</sup>
Ένταση φωτισμού σχεδιασμού	500 lux
Αλγόριθμος ελέγχου	Integral reset
fL <sub>min</sub> / fP <sub>min</sub> (Ελάχιστο ποσοστό εκπεμπόμενης φωτεινής ροής /Ελάχιστη τιμή καταναλισκόμενης ισχύος)	0.05/0.19
Κλιματική περιοχή	Αθήνα
Ωράριο λειτουργίας εκτός Σαββάτου-Κυριακής	8:00-17:00
Αισθητήρας	Στο κέντρο της οροφής

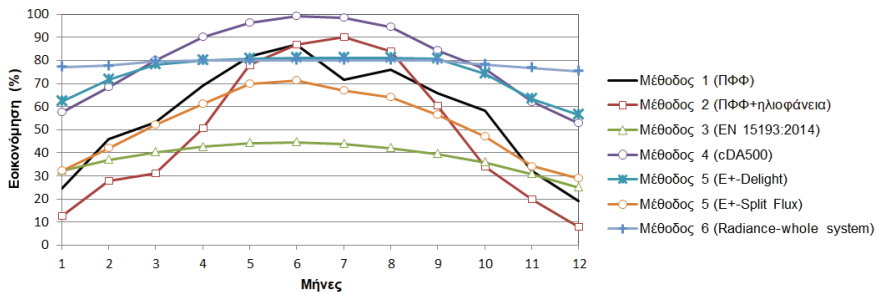
Οι παραδοχές που χρησιμοποιήθηκαν για τις προαναφερόμενες μεθόδους υπολογισμού βρίσκονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 2. Παραδοχές υπολογισμών στις μεθόδους που έχουν εξετασθεί.

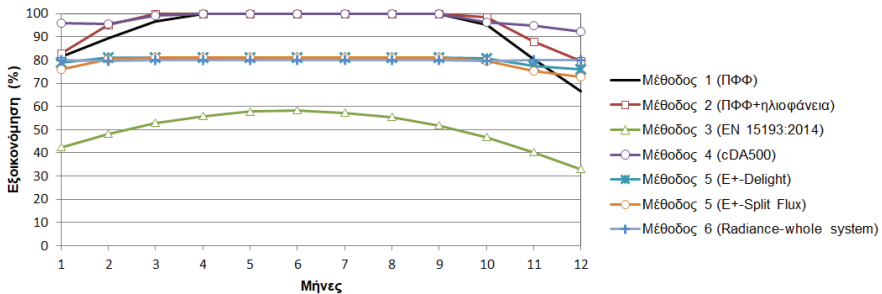
Μέθοδος	Παραδοχές
1	Έχει χρησιμοποιηθεί η μέση τιμή των ΠΦΦ χωρίς συντελεστές προσανατολισμού. Οι τελευταίοι χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις χειροκίνητης έναυσης/σβέσης. Η κατανομή των ΠΦΦ έχει υπολογισθεί χρησιμοποιώντας κάνναβο 198 σημείων με το Radiance.
2	Ο υπολογισμός έγινε με το λογισμικό Relux
3	Χρησιμοποιήθηκαν οι μέσες τιμές των ΠΦΦ στην περιμετρική ζώνη με δεδομένα από την μέθοδο 1. Η περιμετρική ζώνη περιέχει το σύνολο των φωτιστικών του χώρου και συνεπώς το σύνολο της ισχύος ελέγχεται από το σύστημα ρύθμισης. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι εξής: α) για GWR 20% και νότιο προσανατολισμό υπολογίσθηκε $F_{DS}=0.67$ , $F_{DC}=0.74$ , $F_C=1$ , $F_O=1$ β) για GWR 100% και νότιο προσανατολισμό υπολογίσθηκε $F_{DS}=0.80$ , $F_{DC}=0.81$ , $F_C=1$ , $F_O=1$ γ) για GWR 20% και βόρειο προσανατολισμό υπολογίσθηκε $F_{DS}=0.51$ , $F_{DC}=0.74$ , $F_C=1$ , $F_O=1$ και δ) για GWR 100% και βόρειο προσανατολισμό υπολογίσθηκε $F_{DS}=0.51$ , $F_{DC}=0.81$ , $F_C=1$ , $F_O=1$ .  Σε όλες τις περιπτώσεις έχει θεωρηθεί ωράριο λειτουργίας 8:00-17:00 χωρίς Σαβ-Κυρ. Συνολικά 2530 ώρες χωρίς να έχει θεωρηθεί λειτουργία του συστήματος φωτισμού βράδυ ( $t_N=0$ ). Επίπροσθετα επελέγη να μην ενεργοποιείται καθόλου κανένα σύστημα σκίασης. Δεν χρησιμοποιήθηκε λογισμικό για τον υπολογισμό αλλά απλώς εφαρμόστηκαν οι εξισώσεις από το πρότυπο.
4	Υπολογισμός της συνεχούς αυτονομίας φωτισμού ( $cDA_{500}$ ) σε σημείο στο κέντρο του δωματίου

5	Έχουν χρησιμοποιηθεί και οι δύο μεθοδολογίες (Split-Flux, DELight) με σημείο ελέγχου το κέντρο του δωματίου.
6	Πλήρης προσομοίωση του συστήματος ρύθμισης της φωτεινής ροής χρησιμοποιώντας μετρήσεις α) της χωρικής ευαισθησίας του αισθητήρα και β) της σχέσης ανάμεσα στο ποσοστό καταναλισκόμενης ισχύος και στο ποσοστό εκπεμπόμενης φωτεινής ροής (δηλ. τις χαρακτηριστικές καμπύλες της ηλεκτρονικής διάταξης ρύθμισης).

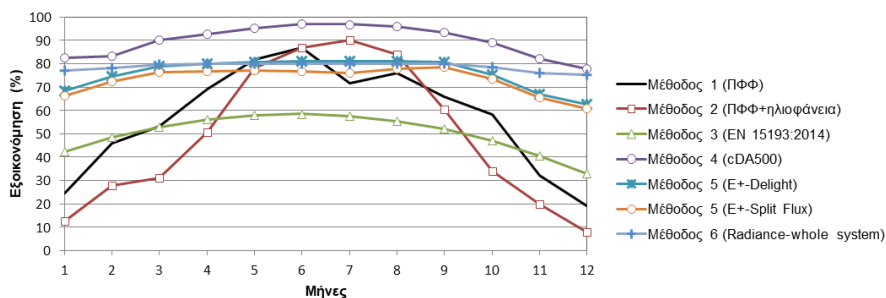
Ετσι η μηνιαία τιμή της εξοικονόμησης ενέργειας για τις τεσσereis περιπτώσεις (GWR 20% και 100% δύο προσανατολισμοί βόρειος και νότιος) παρουσιάζονται παρακάτω.



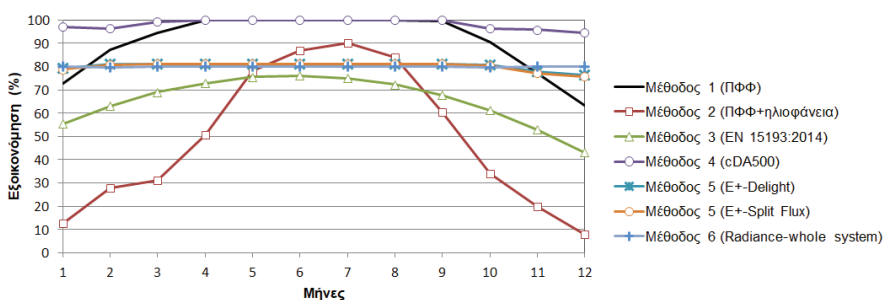
Σχήμα 4. Μηνιαία εξοικονόμηση ενέργειας για την περίπτωση με GWR20% και βορεινό προσανατολισμό.



Σχήμα 5. Μηνιαία εξοικονόμηση ενέργειας για την περίπτωση με GWR100% και βορεινό προσανατολισμό.



Σχήμα 6. Μηνιαία εξοικονόμηση ενέργειας για την περίπτωση με GWR20% και νότιο προσανατολισμό.



Σχήμα 7. Μηνιαία εξοικονόμηση ενέργειας για την περίπτωση με GWR100% και νότιο προσανατολισμό.

Οι μέθοδοι 1,2,4 βασίζονται μόνο στις τιμές φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας χωρίς να λαμβάνεται υπόψη χωρίς να λαμβάνεται υπόψη ο αλγόριθμος ελέγχου του ηλεκτροφωτισμού. Στην μέθοδο 3 απλώς επιλέγεται ένας αριθμός παραμέτρων ανάλογα με την γενική κατηγορία που ανήκει το σύστημα ελέγχου ενώ οι μέθοδοι 5 και 6 λαμβάνουν υπόψη το σύστημα ελέγχου. Η μέθοδος 5 θεωρεί ένα ιδεατό σύστημα ενώ η μέθοδος 6 βασίζεται σε δεδομένα μετρήσεων με τον έλεγχο να πραγματοποιείται λόγω υπολογισμού του φυσικού φωτισμού στο επίπεδο του αισθητήρα (οροφή) και λαμβάνοντας υπόψη την χωρική του ευαισθησία.

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Εξετάζοντας τις εξοικονομήσεις ενέργειας σε μηνιαία βάση που παρουσιάζονται στα σχήματα 4-7 εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

1. Τα αποτελέσματα των μεθόδων 5 (DELIGHT) και 6 παρουσιάζουν μικρές σχετικά διαφορές. Η μεγαλύτερη αυτών συμβαίνει στην περίπτωση βόρειου προσανατολισμού και μικρού ανοίγματος (-5.9%) ενώ σε όλες τις άλλες περιπτώσεις η μέση τιμή της σχετικής διαφοράς κυμαίνεται από 0.11%-3.7%. Σε επίπεδο ανάλυσης μηνών οι μικρότερες διαφορές (1.13-1.16% σε όλες τις περιπτώσεις) εμφανίζονται το καλοκαίρι ενώ οι μεγαλύτερες τον χειμώνα. Συνεπώς η εκτίμηση της εξοικονόμησης μπορεί να πραγματοποιηθεί και χρησιμοποιώντας την ένταση φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας αρκεί να μπορεί να μοντελοποιηθεί ο αλγόριθμος ελέγχου. Η μέθοδος 6 έχει πραγματικό πλεονέκτημα όταν χρειάζεται επιπρόσθετα να υπολογισθεί και η κατανομή της έντασης φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας.

2. Η μεγαλύτερη εξοικονόμηση υπολογίζεται σε όλες τις περιπτώσεις με την χρήση της συνεχούς αυτονομίας φωτισμού (cDA). Οι τιμές 100% ιδίως το καλοκαίρι οφείλονται στο ότι οι τιμές φωτισμού στο κέντρο του χώρου είναι συνεχώς μεγαλύτερες από την τιμή σχεδιασμού (500 lux).

3. Η μέθοδος 3 (EN 15193) εμφανίζει στατιστικά τις μικρότερες τιμές εξοικονόμησης κατά τη διάρκεια των θερινών μηνών.

4. Η μέθοδος 1 που αντιπροσωπεύει τον απλούστερο τρόπο εκτίμησης του δυναμικού της εξοικονόμησης σε σχέση με την μέθοδο 6 εμφανίζει σχετικές διαφορές που κυμαίνονται από -74.8% έως +24.8% για όλες τις περιπτώσεις. Οι μικρότερες διαφορές εμφανίζονται στην περίπτωση της πλήρους κάλυψης της πρόσοψης με υαλοπλάκα και αυτό λόγω του κορεσμού (συστηματικά τιμές φωτισμού > 500 lux).

Οι μεθοδολογίες που βασίζονται στον ΠΦΦ σε μια προσπάθεια να ισορροπήσει η απλότητα με την ταχύτητα οδηγούν τελικά σε τιμές εξοικονόμησης που διαφέρουν σημαντικά από αυτές που προκύπτουν από προσομοιώσεις. Η διαφορά είναι τόσο μεγάλη που μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένες σχεδιαστικές προσεγγίσεις ιδίως όταν αυτές αφορούν συγκεκριμένες χρονικές περιόδους. Είναι φανερό επίσης το πρόβλημα με την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου αυτού του υπολογισμού, σε περιπτώσεις πιστοποίησης, με δεδομένο ότι ο ηλεκτροφωτισμός επηρεάζει καταλυτικά το ενεργειακό ισοζύγιο του κτιρίου. Η πλέον ακριβής μεθοδολογία –σε σχέση με την πραγματικότητα– βασίζεται προφανώς στην πλήρη προσομοίωση του συστήματος ρύθμισης της φωτεινής ροής. Το πρόβλημα όμως που υπάρχει είναι η έλλειψη δεδομένων σχετικά με τα χαρακτηριστικά του συστήματος. Λόγω της διαθεσιμότητας πλέον αλγόριθμων υπολογισμού των επιπέδων φωτισμού σε πολύπλοκους γεωμετρικά χώρους είναι προφανές ότι το επόμενο βήμα θα πρέπει να είναι η δημιουργία μιας τράπεζας δεδομένων για την συμπεριφορά των ηλ. ρυθμιστικών διατάξεων των λαμπτήρων καθώς και των χαρακτηριστικών των αισθητήρων,

## 5. ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ

Η Μεταδιδακτορική Έρευνα υλοποιήθηκε με υποτροφία του ΙΚΥ η οποία χρηματοδοτήθηκε από την Πράξη «Ενίσχυση Μεταδιδακτόρων Ερευνητών / Ερευνητριών» από τους πόρους ΕΠ «Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού, Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» με άξονες προτεραιότητας 6, 8, 9 και συγχρηματοδοτείται από το Ευρωπαϊκό Ταμείο – ΕΚΤ και το ελληνικό δημόσιο

## 6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] US EIA, Commercial Buildings Energy Consumption Survey, 2012, Release date 2016
- [2] K.G. Droutsas, S. Kontoyiannidis, E.G. Dascalaki and C.A. Balaras, “Benchmarking Energy Use of Existing Hellenic Non-Residential Buildings”, *Procedia Environmental Sciences* 38 ( 2017 ) 713 – 72
- [3] Xu Yu, Yuehong Su “ Daylight availability assessment and its potential energy saving estimation –A literature review” , *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52 (2015), 494-50
- [4] A. Kontadakis, A.Tsangrassoulis, A. Roetzel, “Defining the Boundaries of Daylight Penetration. The use of dynamic and static daylight methods to predict the daylight zone within sidelit spaces, a comparison”, *Balkan Light 2015, The 6th Balkan Conference on Lighting, Athens, Greece*
- [5] Danny H.W.Li, Ernest K.W.Tsang, «An analysis of daylighting performance for office buildings in Hong Kong», *Building and Environment*, Volume 43, Issue 9, September 2008, Pages 1446-1458)
- [6] Pyonchan Ihm, Abderrezek Nemri , Moncef Krarti, “Estimation of lighting energy savings from daylighting”, *Building and Environment* 44 (2009) 509–514
- [7] Lynes J A and Littlefair P J, “Lighting energy savings from daylight: estimation at the sketch design stage” , *Lighting Res. Technol.* ,22,(3) pp 129-137 (1990).
- [8] Littlefair P J, “ Predicting annual lighting use in daylight buildings” , *Building and Environment*, 2,(1) pp 43-54 (1990)
- [9] ReluxSuite 2016, <https://relux.com/en/downloads.html>
- [10] EN 15193:2017, Energy performance of buildings. Energy requirements for lighting. Specifications, Module M9

- [11] A. Tsangrassoulis, A. Kontidakis A. L. Doulos, " Assessing Lighting Energy Saving Potential from Daylight Harvesting in Office Buildings Based on Code Compliance & Simulation Techniques: A Comparison", *Procedia Environmental Sciences*, Volume 38, 2017, Pages 420-427
- [12] RADIANCE : Ward and R. Shakespeare, *Rendering with Radiance, the Art and Science of Lighting Visualization*, Morgan Kaufmann Publishers, 1998.,
- [13] DAYSIM C. F Reinhart, *DaySim version 3.1*, USA: Cambridge, 2013, <http://daysim.ning.com>.,
- [14] LICASO, <http://www.licaso.com/docs/2017/Content/Home.htm>
- [15] Reinhart, C. F., Mardaljevic, J., & Rogers, Z. (2006). Dynamic Daylight Performance Metrics for Sustainable Building Design. *Leukos*, 3(1), 7-31
- [16] EnergyPlus Documentation : Engineering Reference, [https://energyplus.net/sites/default/files/pdfs\\_v8.3.0/EngineeringReference.pdf](https://energyplus.net/sites/default/files/pdfs_v8.3.0/EngineeringReference.pdf)
- [17] R.G. Hopkinson, J. Longmore, P. Petherbridge, "An Empirical Formula for the Computation of the Indirect Component of Daylight Factor", *Lighting Research and Technology*, Vol 19, Issue 7, 1954.
- [18] Winkelmann, F.C. and S. Selkowitz. 1985. Daylighting Simulation in the DOE-2 Building Energy Analysis Program. *Energy and Buildings* 8, 271-286.
- [19] L. Doulos, A. Tsangrassoulis, F.V. Topalis, "Multi-criteria decision analysis to select the optimum position and proper field of view of a photosensor", *Energy Conversion and Management*, Volume 86, October 2014, Pages 1069-1077)
- [20] SPOT, Sensor Placement –Optimization Tool, <https://www.daylightinginnovations.com/spot-home>
- [21] DAYSIMps <https://daysim.ning.com/page/download>)
- [22] L. Doulos , A. Tsangrassoulis , F. Topalis , "Quantifying energy savings in daylight responsive systems: The role of dimming electronic ballasts" , *Energy and Buildings* 40 (2008) 36–50
- [23] Younju Yoon, PhD Thesis, " Development of a fast and accurate annual daylight approach for complex window systems", Penn State University, School of Engineering", 2006



## ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΚΑΙ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΣΥΝΤ. ΘΕΡΜΟΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΦΥΤΕΜΕΝΑ ΔΩΜΑΤΑ

**Α. Ανδρουτσόπουλος<sup>1</sup>, Γ. Κοτσίρης<sup>2\*</sup>, Π.Α. Νεκτάριος<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Τμήμα Κτιρίων, Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών & Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΚΑΠΕ),  
19ο χλμ. Λεωφ. Μαραθώνος, 19009 Πικέρμι

<sup>2</sup>Εργαστήριο Ανθοκομίας και Αρχιτεκτονικής Τοπίου, Τμήμα Επιστήμης Φυτικής  
Παραγωγής, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθήνας, Ιερά Οδός 75, 118 55 Αθήνα  
e-mail: [geokotsis@aua.gr](mailto:geokotsis@aua.gr), [aandr@cres.gr](mailto:aandr@cres.gr)

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εγκατάσταση πράσινων δωματίων στις σύγχρονες πόλεις επεκτείνεται αποσκοπώντας στα πολλαπλά τους οφέλη, όπως η βελτίωση του μικροκλίματος και εξοικονόμηση ενέργειας για ψύξη και θέρμανση των κτιρίων. Ωστόσο οι θερμομονωτικές τους ιδιότητες έχουν περιορισμένα ερευνηθεί και κυρίως με τη χρήση λογισμικών ενεργειακής προσομοίωσης, τα οποία δεν ήταν κατάλληλα προγραμματισμένα για το σκοπό αυτό. Ο υπολογισμός του συντελεστή θερμοπερατότητας – U, αφενός δίνει μια συνοπτική εικόνα του θερμομονωτικού προφίλ του στοιχείου-πράσινο δώμα, αφετέρου είναι αναγκαίο δεδομένο εισαγωγής για μια πλήρη ενεργειακή μελέτη ενός κτιρίου με εγκατεστημένο πράσινο δώμα. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η σύγκριση θεωρητικού τρόπου υπολογισμού του U, με λογισμικό υπολογισμού μεταφοράς θερμότητας, το οποίο μπορεί να δώσει ένα πληρέστερο προσδιορισμό από έναν απλό αριθμητικό υπολογισμό, με ένα δυναμικό πειραματικό υπολογισμό ακολουθώντας τη μέθοδο PASLINK. Από τον υπολογισμό και τη σύγκριση πέντε υποδειγμάτων φυτεμένων δωματίων, προκύπτει σημαντική διαφορά τιμών της τάξης του 27-40% με τη θεωρητική μέθοδο να υπερεκτιμά τις τιμές U. Αυτό συμβαίνει διότι κατά τον θεωρητικό υπολογισμό, οι στρώσεις του φυτεμένου δώματος εκλαμβάνονται μεμονωμένα, ως σταθερής κατάστασης δομικά υλικά και όχι ως ένα σύστημα του οποίου τα μέρη αλληλεπιδρούν.

**Λέξεις Κλειδιά:** *θάλαμος δοκιμών, PASLINK, TRNSYS, φυτεμένο δώμα, συντελεστής θερμοπερατότητας*

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Για τον υπολογισμό της ροής θερμότητας στα στοιχεία του κελύφους του κτιρίου, των θερμικών προσόδων ή απωλειών συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται ο υπολογισμός του συντελεστή θερμοπερατότητας του κάθε στοιχείου (U), ο οποίος είναι ανάλογος του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας και του πάχους της κάθε διάστρωσης του στοιχείου. Γενικά με τον υπολογισμό του U, εκτιμάται η θερμική απόδοση ενός στοιχείου, του φυτεμένου δώματος στην προκειμένη περίπτωση ή ολόκληρου του κτιρίου.

Ο υπολογισμός του συντελεστή θερμοπερατότητας σε φυτεμένα δώματα μέχρι σήμερα, έχει βασιστεί είτε σε αριθμητικούς υπολογισμούς όπως ακριβώς υπολογίζονταν ο U ενός στοιχείου ή ολόκληρου κτιρίου [1], με τη χρήση λογισμικών ενεργειακής προσομοίωσης, όπως το TRNSYS, ή πειραματικά σε συνθήκες σταθερής κατάστασης [2], είτε τέλος εκτιμάται η θερμική τους απόδοση με μοντέλα προσομοίωσης [3,4,5,6,7]. Όπως αναφέρει η Del Barrio [4], τα μοντέλα προσομοίωσης ενσωματώνουν αυξημένες αμφιβολίες σχετικά με τα εισαγόμενα δεδομένα προκειμένου να διασφαλιστεί ένα ευρύ πεδίο εφαρμογής του μοντέλου. Περαιτέρω τα υπολογιστικά μοντέλα προσομοίωσης, περιέχουν περίπλοκα μαθηματικά ή πολύ ειδικές διαφορικές εξισώσεις που είναι δύσκολο να επιλυθούν. Για παράδειγμα, το μοντέλο της Del Barrio, μόνο για το τμήμα της φυτείας πρέπει να μετρήσει πειραματικά ή να υπολογίσει δεκαεπτά παραμέτρους, για την επίλυση των οποίων υιοθετεί άλλες είκοσι τιμές συντελεστών και παραμέτρων από τα βιβλιογραφικά δεδομένα. Όπως αναφέρεται σε άλλη μελέτη [8] τα μοντέλα αυτά χρειάζονται βελτίωση στην κατεύθυνση να αποκτήσουν μεγαλύτερη ακρίβεια και δυνατότητα πρακτικής εφαρμογής.

Ο Sailor, σε μια εξελιγμένη προσέγγιση, συνδύασε ένα μοντέλο των Αγρονόμων του Σώματος Στρατού των ΗΠΑ [9], με το πρόγραμμα ενεργειακής προσομοίωσης Energy Plus. Η έκδοση Energy Plus v.6, δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη, να εισαγάγει τιμές για τις παραμέτρους του βάθους και των θερμικών ιδιοτήτων του υποστρώματος και επιπλέον, κάτι που δεν κάνει το λογισμικό TRNSYS, του δείκτη φυλλικής επιφανείας της φυτείας (LAI), του ύψους των φυτών και της πυκνότητας φυτοκάλυψης, της ανακλαστικότητας, της αντίστασης στομάτων από την οποία εκτιμάται η δυνατότητα διαπνοής των φυτών και η υγρασία του υποστρώματος.

Η επίδραση ωστόσο της αποστραγγιστικής στρώσης και των λοιπών μεμβρανών δε συνεκτιμάται μέσα στην υπορουτίνα του λογισμικού που περιγράφει το σύστημα του φυτεμένου δώματος, αλλά οι στρώσεις αυτές περιγράφονται μαζί με τα δομικά υλικά.

Συνολικά όλα τα μοντέλα αυτά επιχειρούν μια χονδρική στον ένα ή τον άλλο βαθμό προσέγγιση της πραγματικής πολυεπίπεδης δομής και λειτουργίας των φυτοδωμάτων, η οποία αδυνατεί να τα αντιμετωπίσει ως όλον και στην προσπάθεια απλοποίησης των μοντέλων, τα αναλύει ως άθροισμα – κάποιων εκ –των μερών τους.



Σχήμα 1. Το ριζικό σύστημα εξαπλώνεται και κάτω από την στρώση διαχωρισμού του γεωυφάσματος, γεμίζοντας τα κενά των κοιλοτήτων των στοιχείων της αποστράγγισης

Η προσέγγιση αυτή υποτιμά, αφενός τη λεπτομερή πολυεπίπεδη κατασκευή των φυτοδωμάτων και λειτουργία τους και ειδικότερα εσωτερικές διεργασίες, όπως η κυκλοφορία του αέρα, η παγίδευση αέρα, πρόσθετες ποσότητες νερού στις κοιλότητες της αποστραγγιστικής στρώσης και την επίδραση του ριζικού συστήματος στις φυσικές ιδιότητες του υποστρώματος (Σχήμα 1). Ουσιαστικά αυτό που διακρίνεται στο Σχήμα, είναι η δημιουργία μιας πρόσθετης στρώσης από την ανάπτυξη του ριζικού συστήματος [10].

Ο στόχος της παρούσης εργασίας είναι η σύγκριση του συντελεστή θερμοπερατότητας που υπολογίζεται με την πειραματική δυναμική μέθοδο PASLINK, για ορισμένα συστήματα φυτοδωμάτων με τις τιμές  $U$  των ίδιων φυτεμένων δωματίων, οι οποίες θα υπολογίζονταν θεωρητικά με το λογισμικό ενεργειακής προσομοίωσης TRNSYS.

## 2. ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

### 2.1. Ο Θάλαμος δοκιμών

Ο Θάλαμος Δοκιμών, αφορά τυποποιημένη διάταξη ελέγχου δομικών στοιχείων και χρησιμοποιείται η μεθοδολογία για τη θερμική αξιολόγηση υλικών και συστημάτων του κελύφους των κτιρίων [11], που αναπτύχθηκε από το διευρωπαϊκό πρόγραμμα PASLINK [12]. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί ένα ψευδοαδιαβατικό κέλυφος που ελαχιστοποιεί τις θερμικές απώλειες από όλες τις πλευρές του Δωματίου δοκιμών εκτός αυτής που εξετάζεται, που στην περίπτωση μας είναι η οροφή. Με άλλα λόγια είναι ένας υψηλότερης θερμομόνωσης, πρακτικά θερμικά αδιαβατικός θάλαμος τοποθετημένος στο εξωτερικό περιβάλλον, με διαστάσεις 8.4 m x 3.8 m x 3.6 m.

Το κύριο χαρακτηριστικό του θαλάμου δοκιμών είναι οι πλήρως ελεγχόμενες θερμικές συνθήκες στο θάλαμο ελέγχου. Ο θάλαμος δοκιμών είναι εξοπλισμένος με ένα εξελιγμένο σύστημα θέρμανσης και ψύξης, ελεγχόμενο από μια Μονάδα Συλλογής Δεδομένων και Ελέγχου για την εκτέλεση μιας ειδικά σχεδιασμένης ακολουθίας δυναμικών δοκιμών. Η ακολουθία αυτή συνίσταται σε μια σειρά προκαθορισμένων θερμικών διεγέρσεων, ειδικά σχεδιασμένων να καλύψουν όλα τα σταθερές και δυναμικής κατάστασης χαρακτηριστικά των μετρούμενων στοιχείων και να διασφαλίσουν ότι όλες οι επιδράσεις των περιβαλλοντικών επιρροών, είναι αποσυσχετισμένες. Αυτό δηλαδή που επιτυγχάνει η ακολουθία θερμικών διεγέρσεων, είναι μεγάλη παραλλακτικότητα στο θερμικό ισοζύγιο του θαλάμου, σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα.

Οι εξωτερικές συνθήκες, καταγράφονταν μέσω μιας σειράς αισθητήρων για την μέτρηση των παρακάτω παραμέτρων: α) Ολική ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο, β) διεύθυνση και ταχύτητα ανέμου, γ) σχετική υγρασία. Οι περιβαλλοντικές παράμετροι ελήφθησαν από σταθμό ηλιακών και μετεωρολογικών μετρήσεων του ΚΑΠΕ. Ο μόνιμος εξοπλισμός αισθητήρων του Θαλάμου Δοκιμών χρησιμοποιούνταν για την παρακολούθηση της θερμικής απόδοσης αυτού καθαυτού του Δωματίου Ελέγχου. Καταγράφονταν με βήμα δεκάλεπτου οι παρακάτω παράμετροι: α) οι θερμοκρασίες αέρα και επιφανειών μέσα και έξω από το θάλαμο, β) Η καταναλισκόμενη ισχύς για θέρμανση ή ψύξη. Οι συνθήκες των θαλάμων ήταν υπό παρακολούθηση και πλήρως ελεγχόμενες μέσω μιας σειράς αισθητήρων συνδεδεμένων με το σύστημα θέρμανσης και ψύξης.

Περαιτέρω για την αξιολόγηση της θερμικής απόδοσης του συστήματος φυτεμένου δώματος, εγκαταστάθηκαν πρόσθετοι αισθητήρες. Δύο αισθητήρες θερμοκρασίας επιφανείας: Θερμοζεύγη T-τύπου (Χαλκού-Κοσταντίνης) με εύρος λειτουργίας -250 έως 400 °C, εφαρμοσμένοι στο ταβάνι του Θαλάμου Ελέγχου και δύο αισθητήρες ροής θερμότητας κατασκευής του Ινστιτούτου TNO-BOUW. Στο υπόστρωμα του κάθε φυτεμένου δώματος τοποθετήθηκαν δύο αισθητήρες υγρασίας τύπου ML2X (Delta-T Devices Ltd, Cambridge, UK), οι οποίοι μετρούν τάση ηλεκτρικού ρεύματος (mV), η οποία μετατρέπονταν στη συνέχεια σε ποσοστό υγρασίας κατ' όγκο (Θν%) [13]. Η τοποθέτηση των αισθητήρων έγινε συμμετρικά στα κέντρα, δύο τμημάτων της επιφάνειας του δώματος στα οποία χωρίστηκε νοητά. Οι μετρήσεις στο θάλαμο δοκιμών έγιναν φθινόπωρο, χειμώνα, άνοιξη.

### 2.2. Διαδικασία μετρήσεων και υπολογισμών

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε δύο στάδια:

Στάδιο 1: Σκοπός αυτού του σταδίου ήταν να ληφθούν μετρήσεις παραμέτρων που σχετίζονται με τις θερμικές ιδιότητες των υπό δοκιμή στοιχείων (των πέντε διαφορετικών συστημάτων φυτεμένων δωματίων), που θα επέτρεπαν την αξιολόγηση της θερμικής τους απόδοσης με κριτήριο τον συντελεστή θερμοπερατότητας  $U$ .

Στάδιο 2: Στο στάδιο αυτό υπολογίστηκαν τα  $U$  των δοκιμών, με τη χρήση ειδικού λογισμικού και επίσης προσδιορίστηκαν το  $U$  μιας τυπικής οροφής κτιρίου σύμφωνα με το πρότυπο EN 6946 και τον Ελληνικό κανονισμό για την Ενεργειακή Απόδοση των Κτιρίων (KENAK) και το  $U$  της οροφής του βιοκλιματικού κτιρίου του ΚΑΠΕ, λαμβανομένου ως παράδειγμα κτιρίου με υψηλή θερμομόνωση, με σκοπό να συγκριθούν με τα  $U$  που υπολογίστηκαν για τα συστήματα φυτεμένων δωματίων.

### 2.3. Καταγραφή δεδομένων

Όλες οι μετρήσεις από τον Θάλαμο Δοκιμών συλλέγονταν από ένα κεντρικό καταγραφικό HP-DAS 3852A ανά λεπτό και δεκάλεπτο. Η παρακολούθηση της καταγραφής και ο έλεγχος του εξοπλισμού πραγματοποιείται μέσω ειδικού λογισμικού επικοινωνίας (interface) που αναπτύχθηκε ειδικά για το σκοπό αυτό, πάνω στην πλατφόρμα προγραμματισμού Agilent VEE.

### 2.4. Μοντέλο υπολογισμού

Οι μετρήσεις μετά από επεξεργασία εισάγονταν σε το ειδικό λογισμικό LORD [14], το οποίο επίσης αναπτύχθηκε στα πλαίσια του διευρωπαϊκού προγράμματος PASLINK, για τον υπολογισμό του συντελεστή θερμοπερατότητας  $U$ . Για την εφαρμογή του προγράμματος μοντελοποιήθηκε η θερμική συμπεριφορά του θαλάμου και του φυτεμένου δώματος σαν ένα RC δίκτυο (αντίστοιχο του ηλεκτρικού κυκλώματος αντίστασης-πυκνωτή), όπου διακριτοποιείται το πεδίο θερμοκρασιών διαμέσου της οροφής ή του τοίχου, με τον ορισμό ενός ορισμένου αριθμού κόμβων, που ο καθένας έχει την δική του θερμοκρασιακή εξέλιξη σε συνάρτηση με το χρόνο. Οι κόμβοι χαρακτηρίζονται από θερμικές αγωγιμότητες ( $H = \text{MJ K}^{-1}$ ) και έχουν ορισμένες θερμικές χωρητικότητες ( $C = \text{W K}^{-1}$ ) και το μεταξύ τους πεδίο θερμοκρασιών θεωρείται γραμμικό. Αγωγιμότητες και χωρητικότητες των κόμβων των στοιχείων του κελύφους, έχουν υπολογισθεί κατά τη διαδικασία στάθμισης του Θαλάμου Δοκιμών του προγράμματος PASLINK και εμπεριέχονται στο λογισμικό LORD. Κάθε πρόσθετη πηγή θερμότητας (από θέρμανση ή ηλιακή ακτινοβολία, κ.ά.) ή ροή, καταγράφεται και εισάγεται στον κατάλληλο κόμβο για την κάθε περίπτωση με την ανάλογη διαμόρφωση του μοντέλου RC.

Τα δεδομένα από τις μετρήσεις και την επεξεργασία τους, που χρησιμοποιήθηκαν ως εισαγόμενα για την ανάλυση στο LORD, ήταν τα ακόλουθα:

$T_{\text{fr}}$ : εσωτερική θερμοκρασία αέρα στο Δωμάτιο ελέγχου (μέσος όρος 7 αισθητήρων)

$T_{\text{sr}}$ : εσωτερική θερμοκρασία αέρα στο βοηθητικό Δωμάτιο

$T_{\text{exsur}}$ : εξωτερική θερμοκρασία επιφανειών Δωματίου ελέγχου (μέσος όρος 27 αισθητήρων)

$T_{\text{insur}}$ : εσωτερική θερμοκρασία επιφανειών στο Δωμάτιο ελέγχου (μέσος όρος 27 αισθητήρων)

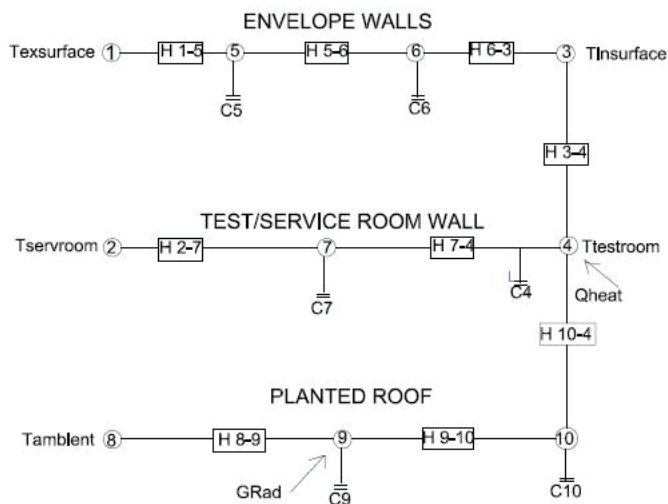
$T_{\text{amb}}$ : Θερμοκρασία αέρα περιβάλλοντος

$Q_{\text{he}}$ : Ολική ισχύς θερμότητας προσφερόμενη στο Δωμάτιο ελέγχου

$H_{\text{flux}}$ : Ροή θερμότητας μέσω του στοιχείου συστήματος φυτεμένου δώματος

$GIH_{\text{Rad}}$ : Ολική προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο

Το μοντέλο RC-δικτύου που παράχθηκε και στη βάση του οποίου έκανε τους υπολογισμούς το LORD, παρουσιάζεται στο Σχήμα 2. Αυτό το μοντέλο αναπτύχθηκε για τα συγκεκριμένα πειράματα ως τροποποίηση υφισταμένου μοντέλου που αναπτύχθηκε από το πρόγραμμα PASLINK για δομικά στοιχεία.



Σχήμα2: Το μοντέλο RC-δικτύου

Το λογισμικό χρησιμοποιεί δύο μη-ντετερμινιστικές μεθόδους. Τη μέθοδο Downhill Simplex και τη μέθοδο Monte-Carlo. Οι μέθοδοι αυτές ανήκουν σε μια κατηγορία υπολογιστικών αλγορίθμων κατάλληλων για ηλεκτρονικούς υπολογιστές που βασίζονται σε ένα επαναλαμβανόμενο τυχαίο δείγμα για να υπολογίσουν το αποτέλεσμα. Η μέθοδος βρίσκει εφαρμογή οπουδήποτε προκύπτει ο σκόπελος της εκθετικής υπολογιστικής πολυπλοκότητας (ένα ολοκλήρωμα με πολλές παραμέτρους-μεταβλητές) και το υπό ανάλυση μοντέλο υπάγεται σε διαδικασίες κανονικής κατανομής και ανάλυσης με τυχαίους αριθμούς. Η βασική ιδέα της μεθόδου είναι ότι μπορούμε να αντικαταστήσουμε ένα ντετερμινιστικό πρόβλημα με ένα πιο απλό πιθανοκρατικό, αντίστοιχο.

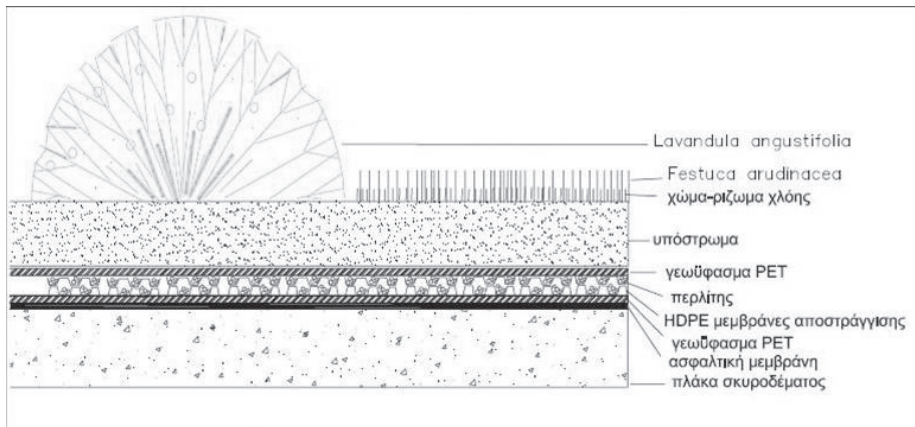
## 2.5. Πράσινα δώματα που κατασκευάστηκαν επί του θαλάμου δοκιμών

Συνολικά κατασκευάστηκαν και μετρήθηκαν πέντε συστήματα πράσινων δωματών, τα γενικά επιμέρους στρώματα των οποίων παρουσιάζονται στο Σχήμα 3, τηρώντας τις οδηγίες της FLL [15]. Τα δώματα αυτά είναι:

- 1) Φυτοδώμα με πετροβάμβακα πάχους 8 cm + 2 cm έτοιμο χλοοτάπητα.
- 2) Φυτοδώμα με μίγμα περλίτη πάχους 8 cm + 2 cm έτοιμο χλοοτάπητα.
- 3) Φυτοδώμα με μίγμα κίσηρης πάχους 8 cm + 2 cm έτοιμο χλοοτάπητα.
- 4) Φυτοδώμα με μίγμα κίσηρης πάχους 20 cm φυτοκαλυμμένο με λεβάντα.
- 5) Φυτοδώμα με μίγμα περλίτη πάχους 20 cm φυτοκαλυμμένο με λεβάντα.

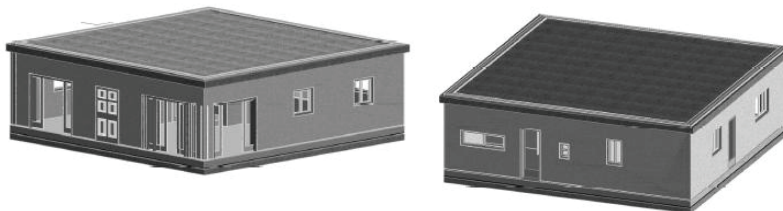
## 2.6. Θερμηκός υπολογισμός U με λογισμικό ενεργειακής προσομοίωσης

Οι υπολογισμοί έγιναν με τη βοήθεια κατάλληλου λογισμικού για ενεργειακή προσομοίωση φυσικών συστημάτων TRNSYS. Αρχικά σχεδιάστηκε ο τύπος του κτιρίου που το λογισμικό χρησιμοποίησε ως μοντέλο φυσικού συστήματος. Επιλέχθηκε μια συμβατική κατασκευή μονώροφου κτιρίου, χωρίς θερμομόνωση στους τοίχους, με μονά υαλοστάσια σε πλαίσιο αλουμινίου και χωρίς σκίαση των ανοιγμάτων. Τα ανοίγματα (πόρτες και παράθυρα), χωροθετήθηκαν με στοιχειώδη βιοκλιματική λογική, δηλαδή η ελάχιστη επιφάνεια στο βορρά και η μέγιστη στο νότο, ενώ συνολικά το κτίριο ήταν προσανατολισμένο στο νότο (Σχήμα 4). Συγκεκριμένα τα ανοίγματα καταλάμβαναν το 12%, 15%, 24% και 40% της ολικής επιφάνειας των πλευρών του κτιρίου βόρεια, δυτικά, ανατολικά και νότια αντίστοιχα, ενώ για το καλοκαίρι, σχεδιάστηκε ένα πρόγραμμα νυκτερινού αερισμού.



Σχήμα 3: Βασική κατατομή των πράσινων δωματίων που κατασκευάστηκαν, τόσο στην οροφή του θαλάμου δοκιμών όσο και στο κτίριο αναφοράς που προσομοιώθηκε

Το κτίριο, διαστάσεων 10m X 10m X 3 m (μήκος X πλάτος X ύψος), προσομοιώθηκε σε δύο διαφορετικές εκδοχές (σενάρια) του στοιχείου της οροφής. Η πρώτη χωρίς καθόλου θερμομόνωση και η δεύτερη με θερμομόνωση της οροφής σύμφωνα με το πρότυπο EN ISO 6946 και κατά ΚΕΝΑΚ, που απαιτεί  $U$  οροφής  $0,45 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$  για την κλιματική ζώνη Β. Για τις διάφορες διαστρώσεις των στοιχείων χρησιμοποιήθηκε η βιβλιοθήκη του λογισμικού TRNSYS και για οτιδήποτε επιπλέον, όπως παραδοχές για τα χαρακτηριστικά της φυτικής στρώσης, οι τιμές από την Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-2/2010 [16].



Σχήμα 4: ΝΑ και ΒΔ αξονομετρικό του κτιρίου αναφοράς που προσομοιώθηκε ενεργειακά στο λογισμικό TRNSYS

Προσομοιώθηκαν πέντε σενάρια, αντίστοιχα των πέντε συστημάτων φυτεμένων δωματίων που εγκαταστάθηκαν και μετρήθηκαν στο Θάλαμο δοκιμών. Τα σενάρια αυτά εκτελέστηκαν τόσο για καλοκαίρι όσο και για το χειμώνα και οι θερμοκρασίες αναφοράς που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις ήταν  $26^\circ\text{C}$  και  $20^\circ\text{C}$  αντίστοιχα.

Για κάθε διάστρωση του κάθε δοκιμίου χρησιμοποιήθηκαν είτε οι συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας ( $\lambda$ ) και τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά, που περιέχονται στην βιβλιοθήκη του και την χαρακτηρίζουν θερμικά, είτε εάν δεν υπήρχαν προστέθηκαν νέες, από την σχετική Τεχνική Οδηγία του ΤΕΕ (Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-2/2010). Ως βάση των θεωρητικών υπολογισμών ήταν να τηρηθεί το ίδιο επίπεδο εδαφικής υγρασίας όπως αυτό που μετρήθηκε κατά τον δυναμικό υπολογισμό των  $U$  και αντιστοιχούσε στην υδατο-ικανότητα [10] προκειμένου δυναμικές και θεωρητικές τιμές να είναι συγκρίσιμες. Για το κατά ΚΕΝΑΚ κτίριο αναφοράς, το προφίλ του δώματος σχεδιάστηκε έτσι ώστε η τιμή  $U$  να είναι να είναι η οριζόμενη επιτρεπτή για την κλιματική ζώνη Β.

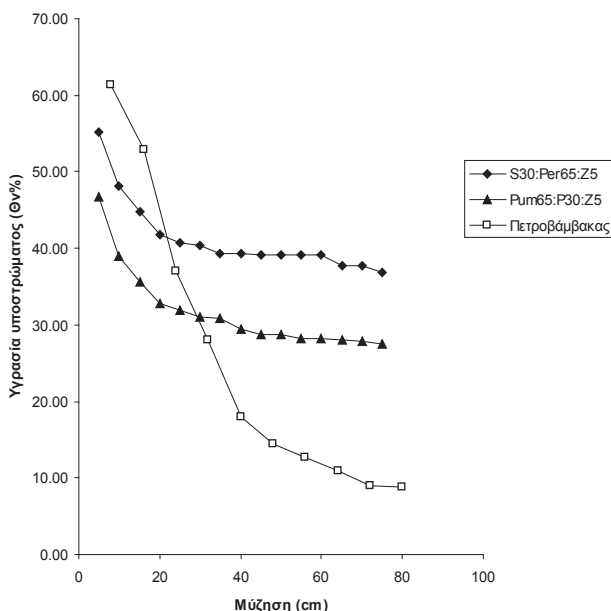
### 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Όλα τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Τα δεδομένα του Πίνακα δείχνουν ότι ο θεωρητικός υπολογισμός των συντελεστών θερμοπερατότητας, οδηγεί σε μια υπερεκτίμηση των τιμών  $U$ , που είναι μεγαλύτερες κατά 27-39%, αυτών που καθορίζονται με την δυναμική μέθοδο PASLINK. Αυτό προφανώς συμβαίνει γιατί κατά τον θεωρητικό υπολογισμό, οι στρώσεις του φυτεμένου δώματος εκλαμβάνονται μεμονωμένα, ως αδρανή, σταθερής κατάστασης δομικά υλικά και όχι ως ένα σύστημα του οποίου τα μέρη αλληλεπιδρούν και είναι ευμετάβλητο σε ευρεία πεδία τιμών των φυσικών παραμέτρων που το χαρακτηρίζουν.

Πίνακας 1.: Σύγκριση τιμών  $U$  προσδιορισμένων με την δυναμική μέθοδο PASLINK και θεωρητικά υπολογισμένων

Είδος Φυτεμένου δώματος	Μέθοδος εκτίμησης $U$		Διαφορά (%)
	Δυναμικά (PASLINK) ( $W/m^2K$ )	Θεωρητικός υπολογισμός ( $W/m^2K$ )	
Πετροβάμβακας 8cm+χλόη 2cm	0,38	0,531	39,5
Μίγμα περλίτη 8cm+χλόη 2cm	0,651	0,830	27,5
Μίγμα κίσηρη 8cm+χλόη 2cm	0,606	0,808	33,3
Μίγμα περλίτη 20cm+λεβάντα	0,393	0,513	30,5
Μίγμα κίσηρη 20cm+λεβάντα	0,414	0,542	31

Η προσέγγιση αυτή υποτιμά, αφενός τη λεπτομερή πολυεπίπεδη κατασκευή των φυτοδωμάτων και λειτουργία τους και ειδικότερα εσωτερικές διεργασίες, όπως η κυκλοφορία του αέρα, η παγίδευση αέρα, πρόσθετες ποσότητες νερού στις κοιλότητες της αποστραγγιστικής στρώσης και την επίδραση του ριζικού συστήματος στις φυσικές ιδιότητες του υποστρώματος (Σχήμα 1). Ουσιαστικά αυτό που διακρίνεται στην Σχήμα, είναι η δημιουργία μιας πρόσθετης στρώσης από την ανάπτυξη του ριζικού συστήματος. Παρατηρείται ότι η απόκλιση θεωρητικού με δυναμικού υπολογισμού σε πραγματικές συνθήκες, είναι ιδιαίτερα αυξημένη στον πετροβάμβακα. Η βασική διαφορά του πετροβάμβακα με τα υπόλοιπα υποστρώματα αδρανών υλικών διαβαθμισμένης κοκκομετρίας, είναι η κλίση της καμπύλης υγρασίας τους (Σχήμα 5). Ο πετροβάμβακας έχει πολύ μικρότερη υδατο-ικανότητα και ενώ συγκρατεί μεγάλο ποσοστό νερού στον κορεσμό, αποφορτίζεται πολύ γρήγορα. Η ευμετάβλητη κατάσταση του πετροβάμβακα, όσον αφορά το υδατικό του περιεχόμενο υποδεικνύει ένα ιδιαίτερα δυναμικό σύστημα. Εικάζεται έτσι ότι όσο πιο δυναμική ή ισορροπία στην πολυεπίπεδη στρώση του φυτεμένου δώματος, τόσο αποτυγχάνουν τα λογισμικά ενεργειακής προσομοίωσης να την περιγράψουν.



Σχήμα 5: Χαρακτηριστικές καμπύλες υγρασίας των υποστρωμάτων: πετροβάμβακας,  $Pum_{65}:P_{30}:Z_5$  και  $S_{30}:Per_{65}:Z_5$ , όπου S=αμμοπηλώδες έδαφος, P=τύρφη,  $Pum$ =κίσηρη,  $Per$ =περλίτης, Z=ζεόλιθος

#### 4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η σύγκριση των συντελεστών θερμοκρατότητας διαφόρων τύπων φυτεμένων δωματίων οι οποίοι υπολογίστηκαν 1) θεωρητικά και 2) πειραματικά. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν πέντε πειράματα σε φυτεμένες οροφές, υπό κλίμακα 1:1, σε πραγματικές κλιματικές συνθήκες με χρήση Θαλάμου Δοκιμών και συγκρίθηκαν με το θεωρητικό υπολογισμό του συντελεστή θερμοπερατότητας με χρήση σε μοντέλο του λογισμικού TRNSYS.

Από τη σύγκριση των μεθόδων προέκυψε ότι ο θεωρητικός υπολογισμός των συντελεστών θερμοπερατότητας, υπερεκτιμά την τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητας της οροφής κατά ένα ποσοστό μεταξύ 27-40%, διότι η θεωρητική μέθοδος δεν συνεκτιμά τη δυναμική συμπεριφορά των στρωμάτων και την αλληλεπίδραση των φυσικών τους ιδιοτήτων.

Το γεγονός αυτό κάνει αναγκαία την περαιτέρω ανάπτυξη των λογισμικών ενεργειακής προσομοίωσης, όπως το TEE-KENAK και το TRNSYS, έτσι ώστε να είναι δυνατό να προσομοιώνουν φυτεμένα δώματα, λαμβάνοντας υπόψη φαινόμενα λανθάνουσας θερμότητας λόγω εξατμισοδιαπνοής και διαφορετικές περιεκτικότητες υγρασίας στο υπόστρωμα φύτευσης, προσεγγίζοντας τη δυναμική μέθοδο υπολογισμού.

Καθίσταται επίσης αναγκαία η επικύρωση των προβλέψεων των λογισμικών ενεργειακής προσομοίωσης, μετά την εγκατάσταση πράσινων δωματίων σε πραγματικές συνθήκες, με μετρήσεις του εσωτερικού κλίματος και άλλες φυσικές παραμέτρους του τμήματος του κτιρίου που βρίσκεται σε επαφή με το φυτεμένο δώμα, έτσι ώστε να αναπτυχθεί ένα πρωτόκολλο διορθώσεων των προβλέψεων με τη χρήση τέτοιων λογισμικών.

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] Niachou, A., K. Papakonstantinou, M. Santamouris, A. Tsangrassoulis, and Mihalakakou, G., 2001, "Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance", *Energy and Buildings*, 33: 719-729.
- [2] Wong, N.H., D.K.W. Cheong, H. Yan, J. Soh, C.L. Ong, and A. Sia., 2003, "Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment", *Energy and Buildings*, 35: 353-364.
- [3] Del Barrio, E.P., 1998, "Analysis of green roof cooling potential in buildings", *Energy and Buildings*, 27:179-193.
- [4] Del Barrio, E.P., 1999, "Roof components models simplification via statistical linearization and model reduction techniques", *Energy and Buildings*, 29:259-281.
- [5] Lazzarin, M.R., F. Castelliani, and F. Busato, 2005, "Experimental measurement and numerical modeling of a green roof", *Energy and Buildings*, 37:1260-1267.
- [6] Alexandri, E. and P. Jones, 2007, "Developing a one-dimensional heat and mass transfer algorithm for describing the effect of green roofs on the built environment: Comparison with experimental results", *Building and Environment*, 42:2835-2849.
- [7] Sailor, D.J., 2008, "A green roof model for building energy simulation programs", *Energy and Buildings*, 40:1466-1478.
- [8] Feng, C., Q. Meng, and Zhang, Y., 2010, "Theoretical and experimental analysis of the energy balance of extensive green roofs", *Energy and Buildings*, 42:959-965.
- [9] Frankenstein, S., and G. Koenig, 2004, "Fast all-season strength (FASST), U.S. Army Engineer Research and Engineering Laboratory (ERDC/CRRL)", Special Report SR-04-25.
- [10] Kotsiris, G., A. Androutsopoulos, E. Polychroni, P.A. Nektarios, 2012, "Dynamic U-value estimation and energy simulation for green roofs", *Energy and Buildings*, 45: 240-249.
- [11] Dimoudi, A., S. Lykoudis, and A. Androutsopoulos, 2006, "Thermal performance of an innovative roof component", *Renewable Energy*, 31:2257-2271.
- [12] Wouters, P. and L. Vandaele, 1995, "COMPASS project. Final research report" (JOU2-CT92-0216).
- [13] Whalley, W.R., 1993, "Considerations on the use of time-domain reflectometry (TDR) for measurements soil moisture content", *Journal of Soil Science*, 44:1-9.
- [14] Gutschker Olaf, 2003, "Logical R-Determination (LORD 3.2.)", Brussels, Belgium.
- [15] FLL - Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. 2008, *Richtlinien für die Planung, Ausführung und Pflege von Dachbegrünungen. Richtlinien für Dachbegrünungen (Guideline for the planning, execution and upkeep of green-roof sites)*. Selbstverlag, Troisdorf.
- [16] TOTEE 20701-2/2010, 2014, "Θερμοφυσικές ιδιότητες δομικών υλικών και έλεγχος θερμομονωτικής επάρκειας των κτηρίων", ΤΕΕ, Αθήνα, Β' έκδοση.



## ΑΝΑΛΥΣΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΟΠΤΟΠΛΙΝΘΟΔΟΜΗΣ ΜΕ ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΑ ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ ΣΤΑΘΕΡΟΥ ΣΧΗΜΑΤΟΣ (SSPCMs)

Δημήτριος Γ. Ζεγγίνης\*, Κάρολος Ι. Κοντολέων

\* Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, ΑΠΘ  
e-mail: dzengini@civil.auth.gr

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η δυνατότητα που προσφέρουν τα υλικά αλλαγής φάσης (Phase change materials, PCMs) να απορροφούν/εκλύουν μεγάλες ποσότητες θερμότητας, διατηρώντας σχεδόν σταθερή τη θερμοκρασία τους, δημιουργεί νέες προοπτικές στην εξοικονόμηση ενέργειας στις κτιριακές κατασκευές. Η παρούσα εργασία διερευνά την επιρροή των υλικών αλλαγής φάσης σταθερού σχήματος (SSPCMs) στη θερμική συμπεριφορά δομικού στοιχείου οπτοπλινθοδομής. Προς αυτή την κατεύθυνση, πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές θερμικές αναλύσεις οπτοπλινθοδομής, με ενσωματωμένα πάνελ υλικών αλλαγής φάσης σταθερού σχήματος στην εσωτερική της επιφάνεια. Ειδικότερα, θεωρήθηκαν πάνελ υλικών αλλαγής διαφορετικής θερμοκρασίας αλλαγής φάσης και διαφορετικού πάχους. Τα υπό εξέταση δομικά στοιχεία είναι εκτεθειμένα σε κλιματικές συνθήκες που αντιστοιχούν στην κλιματική ζώνη Γ της Ελλάδας, κατά την εαρινή περίοδο. Τα αποτελέσματα αναδεικνύουν τη συνεισφορά των υλικών αλλαγής φάσης σταθερού σχήματος στη βελτίωση της θερμικής συμπεριφοράς της οπτοπλινθοδομής και τη σημασία της κατάλληλης επιλογής της θερμοκρασίας αλλαγής φάσης και του πάχους τους. Τα παραπάνω αναμένεται να συμβάλλουν στη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού καινοτόμων κτιριακών κελυφών με προσαρτημένα στοιχεία υλικών αλλαγής φάσης σταθερού σχήματος στη διατομή τους, στοχεύοντας στην επίτευξη της βέλτιστης ποιότητας εσωκλίματος με την ελάχιστη δυνατή ενεργειακή κατανάλωση.

**Λέξεις Κλειδιά:** Υλικά αλλαγής φάσης, Υλικά αλλαγής φάσης σταθερού σχήματος, Θερμική συμπεριφορά, Θερμική ανάλυση

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας αυξάνεται συνεχώς, δημιουργώντας το λεγόμενο διπλό ενεργειακό πρόβλημα που αφορά αφενός την επάρκεια των ενεργειακών πηγών, αφετέρου τις δυσμενείς επιπτώσεις στο περιβάλλον. Στις σύγχρονες κοινωνίες, συμπεριλαμβανομένης και της ελληνικής, ο κτιριακός τομέας συνιστά ένας από τους μεγαλύτερους καταναλωτές ενέργειας. Επομένως, η μελέτη καινοτόμων τεχνολογιών με στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας στα κτίρια κατέχει πρωτεύοντα ρόλο στην προσπάθεια ορθολογικής χρήσης των διαθέσιμων πηγών ενέργειας. Τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί μια σειρά καινοτόμων τεχνολογιών προς αυτή την κατεύθυνση.

Οι τεχνολογίες αυτές περιλαμβάνουν νέα θερμομονωτικά υλικά, όπως οι θερμομονωτικές πλάκες κενού και οι αεροζέλες [1], νέες τεχνολογίες υαλοπινάκων, όπως οι υαλοπινάκες χαμηλής εκτεμπτικότητας, οι θερμοχρωμικοί και οι φωτοχρωμικοί υαλοπινάκες [2] και νέες τεχνολογίες οροφής των κτιρίων, όπως η ψυχρή στέγη και το φυτεμένο δώμα [3].

Το κτιριακό κέλυφος διαδραματίζει σημαίνοντα ρόλο στη θερμική απόκριση των κτιριακών κατασκευών, ενώ προκειμένου να λειτουργεί αποδοτικά και αποτελεσματικά ένα κτίριο, πρέπει να περιορίζει τις θερμικές απώλειες μέσω των δομικών του επιφανειών και ταυτόχρονα να επιτρέπει την αποθήκευση θερμικής ενέργειας στη μάζα του. Προς αυτήν την κατεύθυνση, ο σχεδιασμός των κτιρίων πρέπει να λαμβάνει υπόψη, πέραν της θερμομόνωσης, τη θερμική μάζα του κελύφους. Τα τελευταία χρόνια, τα υλικά αλλαγής φάσης συγκεντρώνουν έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον ως προς την ενίσχυση της θερμικής μάζας των κτιρίων, ενώ ταυτόχρονα, συμβάλλουν στη διαμόρφωση ενός σταθερού και θερμικά άνετου εσωκλίματος.

Η λειτουργία τους βασίζεται στις αρχές αποθήκευσης θερμικής ενέργειας υπό μορφή λανθάνουσας θερμότητας. Ειδικότερα, όταν η εξωτερική θερμοκρασία αυξάνεται, τα υλικά αλλαγής φάσης τήκονται και λόγω της ενδόθερμης φύσης της διαδικασίας, απορροφούν θερμότητα. Όταν η εξωτερική θερμοκρασία μειώνεται, τα υλικά αλλαγής φάσης στερεοποιούνται και λόγω της εξώθερμης φύσης της διαδικασίας αποδίδουν θερμότητα. Λόγω των ελάχιστων θερμικών απωλειών κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης, τα υλικά αλλαγής φάσης παρουσιάζουν πολλαπλάσια πυκνότητα αποθήκευσης ενέργειας ανά όγκο σε σύγκριση με τα συμβατικά δομικά υλικά (έως και 15 φορές μεγαλύτερη), ενώ η κατασκευή είναι 2-10 φορές πιο ελαφριά. Επιπρόσθετα, ενώ η εκμετάλλευση της θερμοαποθηκευτικής ικανότητας των συμβατικών δομικών υλικών προϋποθέτει την ύπαρξη θερμοκρασιακών διαφορών, η σχεδόν ισόθερμη φύση της διαδικασίας αλλαγής φάσης επιτρέπει στα υλικά αλλαγής φάσης, με την κατάλληλη θερμοκρασία αλλαγής φάσης, να δρουν και ως φυσικοί ρυθμιστές της θερμοκρασίας στα επιθυμητά επίπεδα θερμικής άνεσης [4]–[6].

Οι παραφίνες, τα λιπαρά οξέα και τα ένυδρα άλατα είναι τα πιο δημοφιλή υλικά αλλαγής φάσης στα κτίρια και συνιστούν κατάλληλα συστατικά για την κατασκευή και επένδυση των δομικών τους στοιχείων, έχοντας τη δυνατότητα να ενσωματώνονται σε δομικά υλικά, όπως το σκυρόδεμα [7], το κονίαμα [8], η οπτοπλινθοδομή [9], το ξύλο [10] και τα θερμομονωτικά υλικά [11]. Η ενσωμάτωση μπορεί να γίνει με διάφορες μεθόδους όπως η άμεση ενσωμάτωση, η εμβάπτιση και η ενθυλάκωση σε κάψουλες [4]–[6]. Η πιο διαδεδομένη και πρακτικά εφαρμόσιμη μέθοδος είναι εκείνη της μικρο-ενθυλάκωσης [12], ενώ τα υλικά αλλαγής φάσης σταθερού σχήματος ή αλλιώς *shape-stabilized phase change materials (SSPCMs)* αποτελούν τον τελευταίο στον εμπορικό κόσμο τρόπο ένταξης των υλικών αλλαγής φάσης στις κτιριακές κατασκευές [13].

Τα υλικά αλλαγής φάσης σταθερού σχήματος αποτελούνται από παραφίνη ως διεσπαρμένο υλικό αλλαγής φάσης και υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο ως υλικό υποστήριξης, συνιστώντας ένα ξεχωριστό στρώμα υλικού, το οποίο μπορεί εύκολα να προστεθεί στην κατασκευή ενός νέου ή υφιστάμενου κτιρίου προκειμένου να αυξήσει την ικανότητά του για αποθήκευση ενέργειας, αποφεύγοντας τη διαδικασία της ενθυλάκωσης. Η συνολική τους πυκνότητα αποθήκευσης ενέργειας είναι συγκρίσιμη με εκείνη των παραδοσιακών υλικών αλλαγής φάσης, καθώς το ποσοστό σύστασης της παραφίνης μπορεί να είναι έως 80%. Ταυτόχρονα, διατηρούν το σχήμα τους όσο η θερμοκρασία λειτουργίας τους είναι χαμηλότερη από τη θερμοκρασία αλλαγής φάσης του υλικού υποστήριξης, αποτρέποντας τον κίνδυνο διαρροής του υλικού αλλαγής φάσης. Επιπροσθέτως, παρουσιάζουν χαμηλή επιφανειακή μάζα, ενώ η αποφυγή της ενθυλάκωσης μειώνει τόσο τη θερμική αντίσταση όσο και το κόστος του συστήματος [14], [15].

Από το 1979 ακολουθείτε εκταταμένη έρευνα σε όλες τις πτυχές ενσωμάτωσης των υλικών αλλαγής φάσης στα κτίρια, η οποία έφτασε στο αποκορύφωμά της την τελευταία 15ετία, λόγω της μείωσης του κόστους τους, των εξελίξεων στην τεχνολογία των μεθόδων ενσωμάτωσής τους στις κτιριακές

κατασκευές, αλλά και της συνεχώς αυξανόμενης απαίτησης για μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης των κτιρίων. Οι μελέτες βασίζονται στη διενέργεια πειραμάτων και στην αριθμητική μοντελοποίηση των υλικών αλλαγή φάσης αναδεικνύοντας τη συνεισφορά τους στη βελτίωση της ενεργειακής και θερμικής συμπεριφοράς των κτιρίων. Η υπολογιστική προσομοίωση των υλικών αλλαγής φάσης καθίσταται σημαντική, επιτρέποντας την υλοποίηση παραμετρικών αναλύσεων, η οποία δεν είναι εφικτή στο πλαίσιο πειραματικών μετρήσεων, διότι είναι ακριβές και απαιτούν σημαντικό χρόνο για τη διεξαγωγή τους [4].

Ο Alam et al. εξέτασαν τη μείωση των ενεργειακών απαιτήσεων κτιριακών ζωνών σε θέρμανση και ψύξη, μέσω της χρήσης πάνελ υλικών αλλαγής φάσης και την επιρροή διαφόρων παραμέτρων, όπως η θερμοκρασία αλλαγής φάσης, το πάχος τους, οι κλιματικές συνθήκες και η επιθυμητή εσωτερική θερμοκρασία στην αποτελεσματικότητά τους, χρησιμοποιώντας το λογισμικό EnergyPlus [16]. Χρησιμοποιώντας το ίδιο λογισμικό, ο Enola et al. μελέτησαν τη συνεισφορά σύνθετων πάνελ υλικών αλλαγής φάσης στην επίτευξη συνθηκών θερμικής άνεσης κτιριακών ζωνών κατά την καλοκαιρινή περίοδο [17].

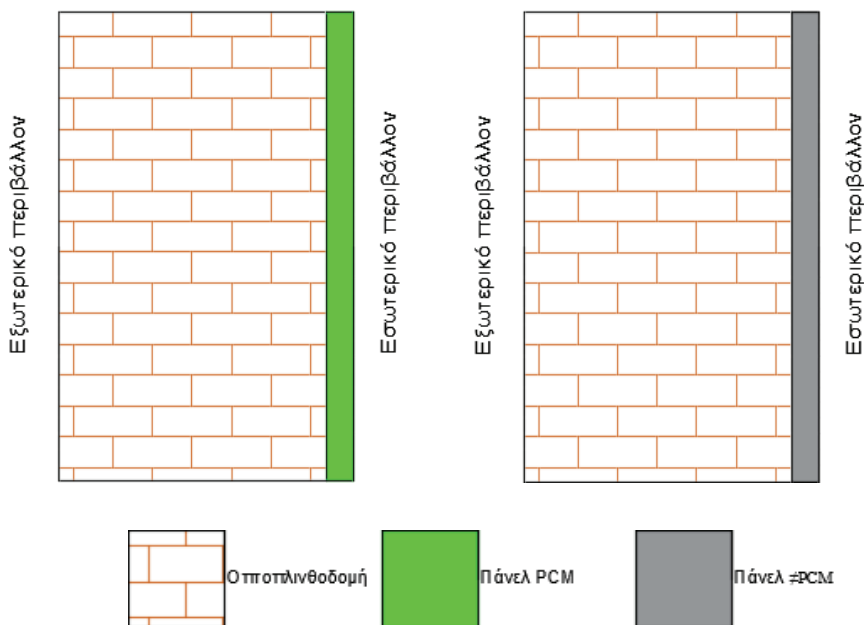
Σε επίπεδο διατάξεων διαδοχικών στρώσεων δομικών υλικών, ο G.Zhou et al. πραγματοποίησαν παραμετρικές θερμικές αναλύσεις υλικών αλλαγής φάσης σταθερού σχήματος και εξέτασαν την επιρροή παραμέτρων, όπως η θερμοκρασία αλλαγής φάσης, η λανθάνουσα θερμότητα αλλαγής φάσης, ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητάς, το θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης, το πάχος των υλικών και ο συντελεστής θερμικής μετάβασης λόγω συνδυασμένης συναγωγής και ακτινοβολίας στην εσωτερική επιφάνεια. Η αποτίμηση των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε βάσει του θερμοκρασιακού πεδίου [18] και του πεδίου ροής θερμότητας [19] στην εσωτερική επιφάνεια των υλικών. Πιο πρόσφατα, ο D. Zhou et al. αποτίμησαν την επιρροή των παραπάνω παραμέτρων συναρτήσει της ημερήσιας αποθήκευσης ενέργειας των σύνθετων πάνελ υλικών αλλαγής φάσης [20], ενώ ο Mazzeo et al. προτείνουν τον ορισμό μιας νέας σειράς παραμέτρων για το δυναμικό θερμικό χαρακτηρισμό τους [21]. Οι παραπάνω εργασίες αναφέρονται στη χρήση ενός υλικού αλλαγής φάσης σταθερού σχήματος, το οποίο λειτουργεί είτε την καλοκαιρινή είτε τη χειμερινή περίοδο. Ο Zhu et al. και ο Diaconu et al. μελέτησαν τη χρήση δύο σύνθετων πάνελ τα οποία προστίθενται στην κατασκευή, βελτιώνοντας τη θερμική συμπεριφορά της σε όλη τη διάρκεια του χρόνου [13], [22].

Από τις παραπάνω μελέτες καθίσταται σαφές ότι η ενσωμάτωση υλικών αλλαγής φάσης στα κτιριακά κελύφη οδηγεί στη βελτίωση της θερμικής τους απόκρισης. Στην παρούσα εργασία μελετάται η επιρροή των υλικών αλλαγής φάσης σταθερού σχήματος στη θερμική συμπεριφορά οπτοπλινθοδομής. Ταυτόχρονα, εξετάζονται παράμετροι που διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην αποτελεσματικότητα των υλικών αλλαγής φάσης σταθερού σχήματος, και πιο συγκεκριμένα, η θερμοκρασία αλλαγής φάσης και το πάχος τους. Οι κλιματικές συνθήκες που λαμβάνονται υπόψη αναφέρονται στην κλιματική ζώνη Γ της ελληνικής επικράτειας κατά την εαρινή περίοδο. Τα παραπάνω επιτεύχθηκαν μέσω της διενέργειας παραμετρικών θερμικών αναλύσεων-προσομοιώσεων, με τη βοήθεια του προγράμματος COMSOL Multiphysics 5.3 [23].

## 2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

### 2.1. Κατασκευαστικές διατάξεις μελέτης και παραδοχές θερμικής ανάλυσης

Ο στόχος της παρούσας εργασίας δεν είναι να υπολογίσει την εξοικονόμηση ενέργειας ενός κτιρίου αλλά να παρουσιάσει γενικές τάσεις σε ότι αφορά τη χρήση των υλικών αλλαγής φάσης σταθερού σχήματος. Για αυτόν το λόγο, αρχιτεκτονικά χαρακτηριστικά, όπως τα ανοίγματα, δε λαμβάνονται υπόψη. Οι αναλύσεις πραγματοποιούνται για κατακόρυφο δομικό στοιχείο οπτοπλινθοδομής πάχους  $d_m = 20$  cm με προσαρτημένο πάνελ υλικού αλλαγής φάσης κυμαινόμενου πάχους στην εσωτερική παρειά της οπτοπλινθοδομής. Επιπροσθέτως, με στόχο την αποκλειστική αποτίμηση της επιρροής της αλλαγής φάσης και της λανθάνουσας θερμότητας του πάνελ, εξετάζεται και η περίπτωση κατά την οποία εκείνο λειτουργεί ως συμβατικό υλικό ( $\neq$ PCM). Οι υπό εξέταση κατασκευαστικές διατάξεις απεικονίζονται στην Εικόνα 1.



Εικόνα 1: Κατασκευαστικές διατάξεις μελέτης

Στη μελέτη αυτή χρησιμοποιήθηκε το πάνελ θερμικής μάζας της Energain [20]. Ωστόσο, στο πλαίσιο των παραμετρικών αναλύσεων, η θερμοκρασία αλλαγής φάσης και το πάχος λαμβάνουν τιμές διαφορετικές σε σχέση με το βιομηχανικά παραγόμενο προϊόν. Ειδικότερα, χρησιμοποιήθηκαν πάνελ υλικών αλλαγής φάσης με τέσσερις διαφορετικές θερμοκρασίες αλλαγής φάσης  $T_{pc}$ : Το PCM17 ( $T_{pc} = 17\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), το PCM18 ( $T_{pc} = 18\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), το PCM19 ( $T_{pc} = 19\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) και το PCM20 ( $T_{pc} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Αντίστοιχα, το πάχος του πάνελ παίρνει τιμές από  $d_{sspcm} = 0.5\text{ cm}$  έως  $d_{sspcm} = 3\text{ cm}$  με βήμα  $0.5\text{ cm}$ . Οι υπόλοιπες θερμοφυσικές ιδιότητες (συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας  $\lambda$ , πυκνότητα  $\rho$ , ειδική θερμοχωρητικότητα  $C_p$  και λανθάνουσα θερμότητα  $L$ ) βασίζονται στις τεχνικές προδιαγραφές του βιομηχανικού προϊόντος. Στον Πίνακα 1 αναγράφονται αναλυτικά οι γεωμετρικές και θερμοφυσικές ιδιότητες των χρησιμοποιηθέντων υλικών.

Πίνακας 1: Γεωμετρικές και θερμοφυσικές ιδιότητες υλικών

Όνομα	$d$ [cm]	$\lambda$ [W/m·K]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [J/kg·K]	$T_{pc}$ [°C]	$L$ [kJ/kg]
Οπτόπλινθος	20	0.45	570	1000	-	-
Πάνελ PCM	0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3	0.2	885	2400	17, 18, 19, 20	70
Πάνελ ≠PCM	0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3	0.2	885	2400	-	-

Το αριθμητικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε λαμβάνει υπόψη τις εξής παραδοχές:

1. Η διάδοση του θερμικού κύματος είναι μονοδιάστατη, πραγματοποιείται μέσω αγωγιμότητας από το εξωτερικό προς το εσωτερικό περιβάλλον (ή αντίστροφα ανάλογα με τη θερμοκρασιακή κλίση) και κάθετα ως προς το επίπεδο που ορίζουν οι επιφάνειες του δομικού στοιχείου.
2. Η ροή θερμότητας είναι ανεπηρέαστη από άλλες πηγές θερμότητας.
3. Τα υλικά είναι ομογενή και ισότροπα.
4. Τα υλικά βρίσκονται σε τέλεια θερμική επαφή.

5. Οι φυσικές ιδιότητες των υλικών είναι ανεξάρτητες από τη θερμοκρασία εκτός από την ειδική θερμοχωρητικότητα του υλικού αλλαγής φάσης.
6. Η τιμή της ειδικής θερμοχωρητικότητας του υλικού αλλαγής φάσης είναι ίδια στη στερεή και την υγρή του φάση.
7. Δεν λαμβάνεται υπόψιν το φαινόμενο της υπέρψυξης κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης.
8. Δε λαμβάνεται υπόψιν το φαινόμενο της φυσικής συναγωγής κατά τη διάρκεια της υγροποίησης.

## 2.2. Αριθμητικό μοντέλο θερμικής ανάλυσης

Σύμφωνα με τις παραδοχές 1, 2 και 3, για τη μετάδοση της θερμότητας διαμέσου του υπό εξέταση δομικού στοιχείου ισχύει η κάτωθι σχέση:

$$\lambda \cdot \partial^2 T / \partial x^2 = \rho \cdot C_p \cdot \partial T / \partial t \quad (1)$$

όπου  $\lambda$  είναι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας,  $\rho$  η πυκνότητα και  $C_p$  η ειδική θερμοχωρητικότητα των υλικών (παραδοχή 5). Τα παραπάνω φυσικά μεγέθη συνδέονται μεταξύ τους με τον παράγοντα  $\alpha$  που ονομάζεται συντελεστής διάχυσης:

$$\alpha = \lambda / (\rho \cdot C_p) \quad (2)$$

Στην περίπτωση του στρώματος υλικού αλλαγής φάσης επιλύεται η παραπάνω εξίσωση μετάδοσης της θερμότητας με αγωγή (παραδοχή 8), με τη διαφορά ότι, σύμφωνα με τη μέθοδο της φαινόμενης ειδικής θερμοχωρητικότητας, η ειδική θερμοχωρητικότητα του υλικού αντικαθίσταται με τη φαινόμενη ειδική θερμοχωρητικότητα, η οποία στην παρούσα εργασία δίνεται από τη σχέση:

$$C_{p,eff,sspcm} = C_{p,sspcm} + L \cdot d\theta/dT \quad (3)$$

όπου  $C_{p,sspcm}$  η ειδική θερμοχωρητικότητα του υλικού αλλαγής φάσης (παραδοχή 6) και  $L$  η λανθάνουσα θερμότητα αλλαγής φάσης. Ο όρος  $L \cdot d\theta/dT$  παριστάνει την επιρροή της λανθάνουσας θερμότητας αλλαγής φάσης στον υπολογισμό της φαινόμενης ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει του ποσοστού του υλικού  $\theta$  που αλλάζει από τη φάση 1 στη φάση 2, ή αντίστροφα (παραδοχή 7). Ο παραπάνω όρος είναι ίσος με το μηδέν όταν η θερμοκρασία είναι εκτός του θερμοκρασιακού εύρους αλλαγής φάσης. Ωστόσο, όταν η θερμοκρασία βρίσκεται στο θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης, το υλικό υφίσταται αλλαγή φάσης και λόγω της λανθάνουσας θερμότητας απορροφά ή εκλύει θερμότητα. Αυτό το φαινόμενο αυξάνει στιγμιαία τη φαινόμενη ειδική θερμοχωρητικότητά του.

## 2.3. Αρχική κατάσταση ισορροπίας και συνοριακές συνθήκες

Ως αρχική συνθήκη λαμβάνεται η κατάσταση ισορροπίας τη χρονική στιγμή  $t = 0$ . Ήτοι, η θερμοκρασία θεωρείται σταθερή σε όλη την έκταση του δομικού στοιχείου και ίση με  $T_i$ :

$$T(x, 0) = T_i \quad (4)$$

Σύμφωνα με την παραδοχή 4, η θερμοκρασία και η ροή θερμότητας είναι συνεχής στη διεπιφάνεια της οπτοπλινθοδομής και του πάνελ:

$$\lambda_m \cdot \partial T_m / \partial x(d_m, t) = \lambda_{sspcm} \cdot \partial T_{sspcm} / \partial x(d_m, t) \quad (5)$$

Στην εσωτερική παρειά του δομικού στοιχείου ( $x = d_T$ ) επιβάλλεται η συνδυασμένη δράση συναγωγής και ακτινοβολίας σε σχέση με την εσωτερική θερμοκρασία  $T_{in}$ :

$$\lambda \cdot \partial T / \partial x(d_T, t) = h_i \cdot [T(d_T, t) - T_{in}] \quad (6)$$

όπου  $h_i$  ο συντελεστής θερμικής μετάβασης λόγω συνδυασμένης δράσης συναγωγής και ακτινοβολίας στην εσωτερική επιφάνεια του πάνελ υλικού αλλαγής φάσης  $h_i = 7.7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  και  $d_T$  το συνολικό πάχος του δομικού στοιχείου ( $d_T = d_m + d_{sspcm}$ ). Με στόχο την επίτευξη θερμικής άνεσης, η εσωτερική θερμοκρασία είναι σταθερή και ίση με  $T_{in} = 20^\circ\text{C}$ .

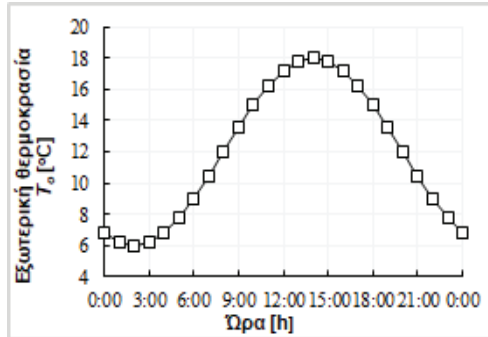
Αντίστοιχα, στην εξωτερική επιφάνεια του δομικού στοιχείου ( $x = 0$ ) επιβάλλεται η συνδυασμένη δράση συναγωγής και ακτινοβολίας σε σχέση με την εξωτερική θερμοκρασία  $T_o$ :

$$\lambda \cdot \partial T / \partial x(0, t) = h_e \cdot [T(0, t) - T_o] \quad (7)$$

όπου  $h_e$  ο συντελεστής θερμικής μετάβασης λόγω συνδυασμένης δράσης συναγωγής και ακτινοβολίας στην εξωτερική επιφάνεια της οπτοπλινθοδομής  $h_e = 25 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . Οι τιμές της εξωτερικής θερμοκρασίας αντιστοιχούν στην κλιματική ζώνη Γ της Ελλάδας, κατά την εαρινή περίοδο και κυμαίνονται σύμφωνα με τον ημιτονοειδή παλμό της παρακάτω εξίσωσης:

$$T_o = (T_{o,max} + T_{o,min})/2 + (T_{o,max} - T_{o,min})/2 \cdot \sin[(2 \cdot \pi \cdot t)/P - 2 \cdot \pi/3] \quad (8)$$

όπου  $T_{o,max} = 18 \text{ }^\circ\text{C}$  και  $T_{o,min} = 6 \text{ }^\circ\text{C}$  η μέγιστη και η ελάχιστη θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της ημέρας, αντίστοιχα, και  $P = 24 \text{ h}$ . Η διαφορά φάσης  $2 \cdot \pi/3$  μετατοπίζει την ώρα εμφάνισης της μέγιστης ημερήσιας θερμοκρασίας στις 2:00 μ.μ. (Εικόνα 2).



Εικόνα 2: Ωριαίες τιμές εξωτερικής θερμοκρασίας  $T_o$

#### 2.4. Κριτήρια θερμοκτικής ανάλυσης

Η αποτίμηση της θερμοκτικής και ενεργειακής συμπεριφοράς της οπτοπλινθοδομής πραγματοποιήθηκε μέσω του υπολογισμού των παραμέτρων που περιγράφονται παρακάτω.

Αρχικά, υπολογίστηκε η ημερήσια διακύμανση της εσωτερικής επιφανειακής θερμοκρασίας  $T_{si}$ . Οι τιμές της εσωτερικής επιφανειακής θερμοκρασίας παρουσιάζουν σημαίνον ενδιαφέρον στην αποτίμηση της θερμοκτικής συμπεριφοράς των εξεταζόμενων δομικών στοιχείων. Πιο συγκεκριμένα, όσο μικρότερες είναι οι θερμοκρασιακές διακυμάνσεις τόσο περισσότερη μπορεί να είναι η εξοικονόμηση ενέργειας.

Στην συνέχεια, υπολογίστηκαν τα μεγέθη θερμοκτικής αδράνειας, ήτοι, ο συντελεστής μείωσης  $f$  και η χρονική καθυστέρηση  $\varphi$ . Τα μεγέθη θερμοκτικής αδράνειας συνιστούν πολύ σημαντικές παραμέτρους στον καθορισμό της ικανότητας αποθήκευσης θερμοκτικής ενέργειας των υπό εξέταση δομικών στοιχείων, συμβάλλοντας στο δυναμικό θερμοκτικό χαρακτηρισμό τους.

Ο συντελεστής μείωσης ορίζεται ως:

$$f = A_i / A_e \quad [-] \quad (9)$$

όπου,  $A_i$  και  $A_e$  τα πλάτη της θερμοκρασιακής διακύμανσης στην εσωτερική και την εξωτερική επιφάνεια, αντίστοιχα.

Η χρονική καθυστέρηση ορίζεται ως:

$$\varphi = t_{Ti}^{min} - t_{Te}^{min} \quad [\text{h}] \quad (10)$$

όπου,  $t_{Ti}^{min}$  και  $t_{Te}^{min}$  η χρονική στιγμή όπου η εσωτερική και η εξωτερική επιφανειακή θερμοκρασία λαμβάνουν την ελάχιστη τιμή τους.

Περαιτέρω, με στόχο την αποσαφήνιση της επιρροής της αλλαγής φάσης και της λανθάνουσας θερμότητας των πάνελ, καθορίζονται το ποσοστό μείωσης του συντελεστή μείωσης  $f$  (%) και η διαφορά ανάμεσα στις τιμές της χρονικής καθυστέρησης  $\tau_d$ . Ειδικότερα:

Το ποσοστό μείωσης του συντελεστή μείωσης υπολογίζεται ως:

$$f(\%) = [(f_{\#PCM} - f_{PCM}) / f_{PCM}] \cdot 100 \quad (11)$$

όπου,  $f_{\#PCM}$  ο συντελεστής μείωσης για την περίπτωση που το πάνελ λειτουργεί ως συμβατικό υλικό και  $f_{PCM}$  ο συντελεστής μείωσης για την περίπτωση πάνελ υλικού αλλαγής φάσης.

Η διαφορά ανάμεσα στις τιμές της χρονικής καθυστέρησης υπολογίζεται ως:

$$\tau_d = \varphi_{PCM} - \varphi_{\#PCM} \quad [\text{h}] \quad (12)$$

όπου,  $\varphi_{PCM}$  και  $\varphi_{PCM}$  η χρονική καθυστέρηση για την περίπτωση πάνελ υλικού αλλαγής φάσης και για την περίπτωση που το πάνελ λειτουργεί ως συμβατικό υλικό, αντίστοιχα.

Επιπλέον, καθορίζεται η χρονική περίοδος  $P_{\Delta}$ , κατά τη διάρκεια της ημέρας, κατά την οποία η εσωτερική επιφανειακή θερμοκρασία  $T_{si}$  είναι εκτός του επιπέδου θερμικής άνεσης, ήτοι, χαμηλότερη από τη θερμοκρασία αναφοράς  $T_{av}$ . Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας η θερμοκρασία αναφοράς λαμβάνεται ίση με  $T_{av} = 18.5^{\circ}\text{C}$ .

Τέλος, υπολογίζεται ο δείκτης Έντασης Θερμικής Δυσφορίας,  $E\Theta\Delta$ , ο οποίος ορίζεται ως το χρονικό ολοκλήρωμα, κατά τη διάρκεια της περιόδου  $P_{\Delta}$ , της διαφοράς της εσωτερικής επιφανειακής θερμοκρασίας  $T_{si}$  από τη θερμοκρασία αναφοράς  $T_{av}$ . Ο παραπάνω δείκτης περιγράφει τις απαιτήσεις σε κατανάλωση ενέργειας ώστε να επιτευχθούν οι επιθυμητές εσωτερικές συνθήκες θερμικής άνεσης και δίνεται από την κάτωθι σχέση:

$$E\Theta\Delta = \int_{P_{\Delta}} \Delta T (t) dt \quad [\text{h}\cdot^{\circ}\text{C}] \quad (13)$$

$$\text{όπου, } \Delta T = T_{av} - T_{si} \quad (14)$$

## 2.5 Μέθοδος επίλυσης

Οι εξισώσεις (1) έως (8), που διέπουν το πρόβλημα της μονοδιάστατης μετάδοσης της θερμότητας διαμέσου των κατασκευαστικών λεπτομερειών που εξετάζονται στην παρούσα εργασία, επιλύθηκαν με τη βοήθεια του προγράμματος COMSOL Multiphysics 5.3. Οι θερμικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για χρονική περίοδο εφτά ημερών και λήφθηκαν υπόψη τα αποτελέσματα για την τελευταία ημέρα της ανάλυσης, με στόχο την εξαίλιψη της επιρροής της αρχικής συνθήκης και την πλήρη περιοδικότητα των ημερήσιων θερμοκρασιακών διακυμάνσεων στην εξωτερική και την εσωτερική επιφάνεια του δομικού στοιχείου. Τέλος, το χρονικό βήμα είναι ίσο με 300 sec και η σχετική απόκλιση ίση με 0.000001, αντίστοιχα.

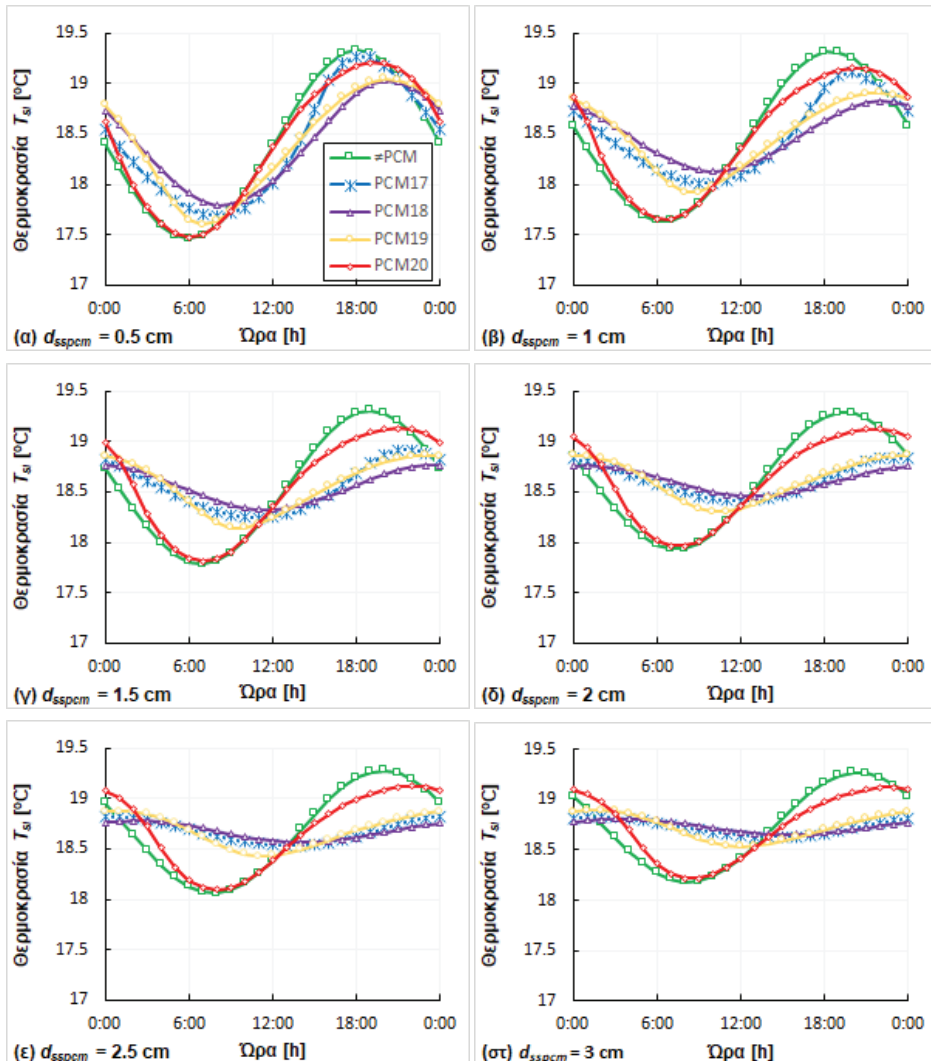
## 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 3.1. Εσωτερική επιφανειακή θερμοκρασία $T_{si}$

Στα διαγράμματα της Εικόνας 3 απεικονίζονται οι ωριαίες τιμές της εσωτερικής επιφανειακής θερμοκρασίας  $T_{si}$ .

Είναι φανερό ότι αυξάνοντας το πάχος του πάνελ οι θερμοκρασιακές διακυμάνσεις μειώνονται για κάθε περίπτωση. Επιπροσθέτως, καθίσταται σαφές ότι η ενσωμάτωση πάνελ υλικού αλλαγής φάσης στη διατομή της οπτοπλινθοδομής έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του πλάτους της εσωτερικής θερμοκρασίας σε σύγκριση με την περίπτωση που το πάνελ λειτουργεί ως συμβατικό υλικό, για κάθε εξεταζόμενη τιμή της θερμοκρασίας αλλαγής φάσης.

Η παραπάνω μείωση λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της για το PCM18. Το παραπάνω αποτέλεσμα εξηγείται από το γεγονός ότι η μέση τιμή της θερμοκρασίας του πάνελ είναι κοντά στους  $18^{\circ}\text{C}$  και συμφωνεί με πλειάδα επιστημονικών εργασιών σύμφωνα με τις οποίες η βέλτιστη τιμή της θερμοκρασίας αλλαγής φάσης ενός πάνελ υλικού αλλαγής φάσης είναι ίση με τη μέση τιμή της θερμοκρασίας του [24], [25]. Αντιστρόφως, η μείωση των διακυμάνσεων καθίσταται ελάχιστη για το PCM20. Σε αυτή την περίπτωση, το μεγαλύτερο ποσοστό της αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας πραγματοποιείται εκτός του θερμοκρασιακού εύρους του πάνελ, και συνεπώς, παραμένει ανεκμετάλλευτη.



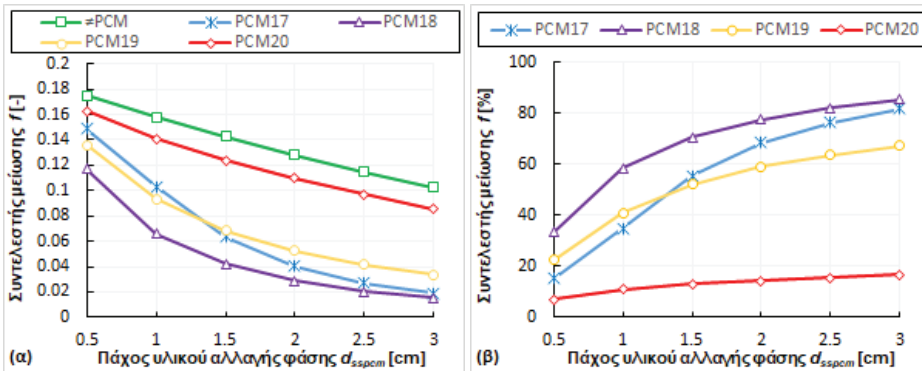
Εικόνα 3: Ωριαίες τιμές της εσωτερικής επιφανειακής θερμοκρασίας  $T_{si}$  για (α)  $d_{sppcm} = 0.5 \text{ cm}$ , (β)  $d_{sppcm} = 1 \text{ cm}$ , (γ)  $d_{sppcm} = 1.5 \text{ cm}$ , (δ)  $d_{sppcm} = 2 \text{ cm}$ , (ε)  $d_{sppcm} = 2.5 \text{ cm}$  και (στ)  $d_{sppcm} = 3 \text{ cm}$

### 3.2. Μεγέθη θερμικής αδράνειας

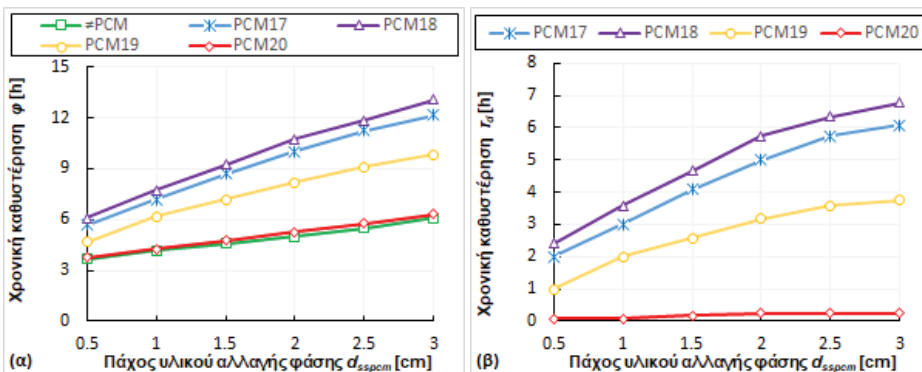
Στις Εικόνες 4, 5 δίνονται οι τιμές για τα το συντελεστή μείωσης  $f$  και τη χρονική καθυστέρηση  $\phi$ , αντίστοιχα.

Όπως αναμενόταν, η αύξηση του πάχους του πάνελ οδηγεί στη μείωση του συντελεστή μείωσης και στην αύξηση της χρονικής καθυστέρησης. Σε ότι αφορά την επιρροή της αλλαγής φάσης, από τα αποτελέσματα παρατηρείται ότι η ποσοστιαία μείωση του συντελεστή μείωσης και η διαφορά στη χρονική καθυστέρηση αυξάνονται με την αύξηση του πάχους. Παρ' όλα αυτά, αξίζει να σημειωθεί ότι η επιρροή της αύξησης του πάχους στις παραπάνω τιμές, ατονεί όταν  $d_{sppcm} > 2 \text{ cm}$ . Ήτοι, αρκεί το πάχος του πάνελ υλικού αλλαγής φάσης να είναι ίσο με  $d_{sppcm} = 2 \text{ cm}$  ώστε να βελτιώνει σημαντικά τη θερμική συμπεριφορά του δομικού στοιχείου.

Οι βέλτιστες τιμές των μεγεθών θερμικής αδράνειας προκύπτουν για το PCM18, για το οποίο η θερμοκρασία αλλαγής φάσης είναι κοντά στη μέση θερμοκρασία του πάνελ. Πιο συγκεκριμένα, για  $d_{sspcm} = 2$  cm ο συντελεστής μείωσης είναι ίσος με  $f_{PCM18} = 0.028$  και η ποσοστιαία μείωσή του σε σχέση με την περίπτωση που το πάνελ λειτουργεί ως συμβατικό υλικό είναι σχεδόν 80%. Η τιμή της χρονικής καθυστέρησης είναι ίση με  $\varphi_{PCM18} = 10.75$  h και η διαφορά στη χρονική καθυστέρηση σε σχέση με το πάνελ που λειτουργεί ως συμβατικό υλικό είναι  $T_{dpcm18} = 5.75$  h.



Εικόνα 4: (α) Συντελεστής μείωσης  $f$  και (β) ποσοστό μείωσης του  $f$  [%] για διαφορετικές θερμοκρασίες αλλαγής φάσης και πάχη του πάνελ υλικού αλλαγής φάσης σταθερού σχήματος



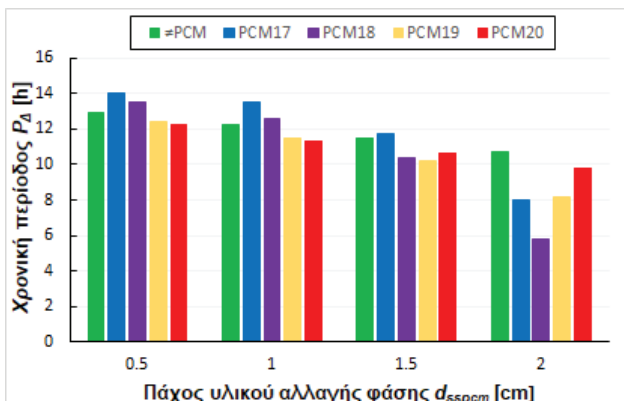
Εικόνα 5: (α) Χρονική καθυστέρηση  $\varphi$  και (β) διαφορά χρονικής καθυστέρησης για διαφορετικές θερμοκρασίες αλλαγής φάσης και πάχη του πάνελ υλικού αλλαγής φάσης σταθερού σχήματος

### 3.3. Χρονική περίοδος $P_\Delta$ και δείκτης Έντασης Θερμικής Δυσφορίας

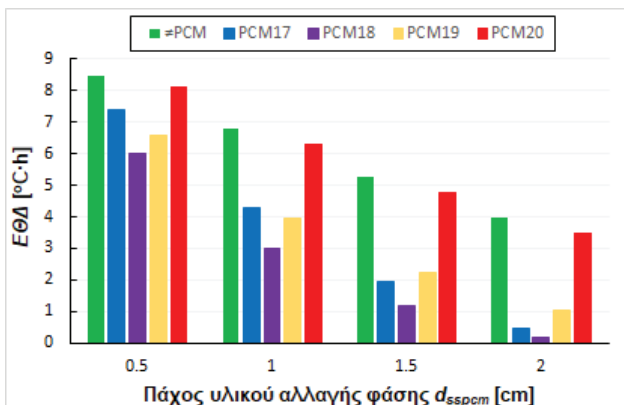
Στις Εικόνες 6, 7 παρουσιάζονται η χρονική περίοδος  $P_\Delta$  και ο δείκτης  $E\Theta\Delta$ , αντίστοιχα. Τα παρακάτω διαγράμματα αναφέρονται σε πάχη του πάνελ αλλαγής φάσης από  $d_{sspcm} = 0.5$  cm έως  $d_{sspcm} = 2$  cm.

Πρωτίστως, η αύξηση του πάχους του πάνελ οδηγεί στη μείωση της χρονικής περιόδου  $P_\Delta$ , και ακολούθως, στη μείωση των τιμών του δείκτη  $E\Theta\Delta$ . Σύμφωνα με την Εικόνα 6, η προσάρτηση πάνελ υλικού αλλαγής φάσης στην εσωτερική επιφάνεια της οπτοπλινθοδομής δε συντελεί πάντοτε στη μείωση της χρονικής περιόδου  $P_\Delta$ . Ειδικότερα, το PCM17 για πάχη από  $d_{sspcm} = 0.5$  cm έως  $d_{sspcm} = 1.5$  cm και το PCM18 και πάχη  $d_{sspcm} = 0.5$  cm και  $d_{sspcm} = 1$  cm παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές. Ωστόσο, σύμφωνα με την Εικόνα 7, οι τιμές του δείκτη  $E\Theta\Delta$  των πάνελ υλικών αλλαγής φάσης είναι χαμηλότερες για κάθε εξεταζόμενη τιμή της θερμοκρασίας αλλαγής φάσης. Πράγματι, εάν εξετάσουμε τις διακυμάνσεις της εσωτερικής επιφανειακής θερμοκρασίας  $T_{si}$  των πάνελ υλικών αλλαγής φάσης, κατά τη χρονική περίοδο  $P_\Delta$ , παρατηρούμε ότι οι αποκλίσεις από τη θερμοκρασία αναφοράς είναι

σημαντικά μικρότερες σε σύγκριση με την περίπτωση που το πάνελ λειτουργεί ως συμβατικό υλικό. Επομένως, οι τιμές του δείκτη  $E_{ΘΔ}$  που προκύπτουν είναι πιο χαμηλές, ακόμα και για τις περιπτώσεις που η χρονική περίοδος  $P_{\Delta}$  είναι μεγαλύτερη. Ήτοι, η ενσωμάτωση πάνελ υλικών αλλαγής φάσης έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ενέργειας που απαιτείται για την επίτευξη εσωτερικών συνθηκών θερμικής άνεσης. Το PCM18 εμφανίζει τις ελάχιστες τιμές του δείκτη  $E_{ΘΔ}$ . Ειδικότερα, για  $d_{sspcm} = 2$  cm, ο δείκτης  $E_{ΘΔ}$  λαμβάνει την τιμή  $E_{ΘΔ} = 0.16$  °C·h.



Εικόνα 5: Χρονική περίοδος κατά την οποία η εσωτερική επιφανειακή θερμοκρασία  $T_s$  είναι μικρότερη της θερμοκρασίας αναφοράς



Εικόνα 6: Δείκτης  $E_{ΘΔ}$  για διαφορετικές τιμές της θερμοκρασίας αλλαγής φάσης και του πάχους του υλικού αλλαγής φάσης σταθερού σχήματος

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία πραγματοποιείται τη θερμική συμπεριφορά δομικού στοιχείου οπτοπλινθοδομής, με ενσωματωμένα πάνελ υλικών αλλαγής φάσης σταθερού σχήματος στην εσωτερική του επιφάνεια, μέσω της διενέργειας παραμετρικών αναλύσεων–προσομοιώσεων. Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν θεωρώντας διαφορετικές θερμοκρασίες αλλαγής φάσης και διαφορετικά πάχη των πάνελ, με στόχο τη μελέτη της επιρροής της καθεμιάς από τις παραπάνω παραμέτρους στη θερμική τους απόκριση, ενώ οι κλιματικές συνθήκες που επιβάλλονται αντιστοιχούν στην κλιματική ζώνη Γ της Ελλάδας, κατά την εαρινή περίοδο. Η αποτίμηση της θερμικής απόκρισης των υπό εξέταση δομικών στοιχείων πραγματοποιήθηκε μέσω του υπολογισμού της εσωτερικής επιφανειακής θερμοκρασίας των πάνελ, των μεγεθών θερμικής αδράνειας, της χρονικής περιόδου, κατά τη διάρκεια της ημέρας, κατά την

οποία η εσωτερική επιφανειακή θερμοκρασία είναι χαμηλότερη από τη θερμοκρασία αναφοράς  $T_{av} = 18.5$  °C και του δείκτη Έντασης Θερμικής Δυσφορίας.

Τα αποτελέσματα αναδεικνύουν ότι η προσάρτηση πάνελ υλικών αλλαγής φάσης στην εσωτερική παρειά της οπτοπλινθοδομής οδηγεί στη μείωση των θερμοκρασιακών διακυμάνσεων της εσωτερικής επιφανειακής θερμοκρασίας, ενισχύει τη θερμική αδράνεια του δομικού στοιχείου και συμβάλλει στη μείωση της απαιτούμενης ενέργειας για την εξασφάλιση συνθηκών θερμικής άνεσης. Η βέλτιστη τιμή της θερμοκρασίας αλλαγής φάσης είναι ίση με  $T_{pc} = 18$  °C και είναι εκείνη που βρίσκεται πιο κοντά στη μέση θερμοκρασία του πάνελ. Τέλος, για τιμή του πάχους ίση με  $d_{sppcm} = 2$  cm, το πάνελ εκμεταλλεύεται επαρκώς την ικανότητα του να αποθηκεύει θερμική ενέργεια υπό μορφή λανθάνουσας θερμότητας και βελτιώνει αισθητά τη θερμική συμπεριφορά της οπτοπλινθοδομής.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Jelle, B. P., 2011, "Traditional , state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions – Properties, requirements and possibilities," *Energy Build*, 43 (10), pp. 2549–2563.
- [2] Baetens, R., Jelle, B. P., and Gustavsen, A., 2010, "Properties, requirements and possibilities of smart windows for dynamic daylight and solar energy control in buildings: A state-of-the-art review," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 94 (2), pp. 87–105.
- [3] Ganguly, A., Chowdhury, D., and Neogi S., 2015, "Performance of Building Roofs on Energy Efficiency - A Review," *Energy Procedia*, 90, pp. 200–208.
- [4] Košny, J., 2015, *PCM-Enhanced Building Components*, Springer, Manchester, UK, Chap 3.
- [5] Wahid, M. A., Hosseini, S. E., Hussien, H. M., Akeiber, H. J., Saud, S. N., and Mohammad, A. T., 2016, "An Overview of Phase Change Materials for Construction Architecture Thermal Management in Hot and Dry Climate Region," *Appl. Therm. Eng.*, 112, pp. 1240–1259.
- [6] Souayfane, F., Fardoun, F., and Biwole, P. H., 2016, "Phase change materials (PCM) for cooling applications in buildings: A review," *Energy Build.*, 129, pp. 396–431.
- [7] Thiele, A. M., Sant, G., and Pilon, L., 2015, "Diurnal thermal analysis of microencapsulated PCM-concrete composite walls," *Energy Convers. Manag.*, 93, pp. 215–227.
- [8] Kheradmand, M., Azenha, M., de Aguiar J. L. B., and Castro-Gomes, J., 2016, "Experimental and numerical studies of hybrid PCM embedded in plastering mortar for enhanced thermal behaviour of buildings," *Energy*, 94, pp. 250–261.
- [9] Vicente, R., and Silva, T., 2014, "Brick masonry walls with PCM macrocapsules: An experimental approach," *Appl. Therm. Eng.*, 67 (1), pp. 24–34.
- [10] Jamekhorshid, A., Sadrameli, S. M., Barzin, R., and Farid, M. M., 2017, "Composite of wood-plastic and micro-encapsulated phase change material (MEPCM) used for thermal energy storage," *Appl. Therm. Eng.*, 112, pp. 82–88.
- [11] Yang, C., Fischer, L., Maranda, S., and Worlitschek, J., 2015, "Rigid polyurethane foams incorporated with phase change materials: A state-of-the-art review and future research pathways," *Energy Build.*, 87, pp. 25–36.
- [12] Giro-Paloma, J., Martínez, M., Cabeza, L. F., and Fernández, A. I., 2016, "Types, methods, techniques, and applications for microencapsulated phase change materials (MPCM): A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 53, pp. 1059–1075.
- [13] Zhu, N., Liu, P., Hu, P., Liu, F., and Jiang, Z., 2015, "Modeling and simulation on the performance of a novel double shape-stabilized phase change materials wallboard," *Energy Build.*, 107, pp. 181–190.
- [14] Zhang, Y. P., Lin, K. P., Yang, R., Di, H. F., and Jiang, Y., 2006, "Preparation, thermal performance and application of shape-stabilized PCM in energy efficient buildings," *Energy Build.*, 38 (10), pp. 1262–1269.
- [15] Zhou, G., Zhang, Y., Lin, K., and Xiao, W., 2008, "Thermal analysis of a direct-gain room with shape-stabilized PCM plates," *Renew. Energy*, 33 (6), pp. 1228–1236.

- [16] Alam, M., Jamil, H., Sanjayan, J., and Wilson, J., 2014, "Energy saving potential of phase change materials in major Australian cities," *Energy Build.*, 78, pp. 192–201.
- [17] Evola, G., Marletta, L., and Sicurella, F., 2014, "Simulation of a ventilated cavity to enhance the effectiveness of PCM wallboards for summer thermal comfort in buildings," *Energy Build.*, 70, pp. 480–489.
- [18] Zhou, G., Yang, Y., Wang, X., and Cheng, J., 2010, "Thermal characteristics of shape-stabilized phase change material wallboard with periodical outside temperature waves," *Appl. Energy*, 87 (8), pp. 2666–2672.
- [19] Zhou, G., Yang, Y., and Xu, H., 2011, "Performance of shape-stabilized phase change material wallboard with periodical outside heat flux waves," *Appl. Energy*, 88 (6), pp. 2113–2121.
- [20] Zhou, D., Shire, G. S. F., and Tian, Y., 2014, "Parametric analysis of influencing factors in Phase Change Material Wallboard (PCMW)," *Appl. Energy*, 119, pp. 33–42.
- [21] Mazzeo, D., Oliveti, G., and Arcuri, N., 2017, "Definition of a new set of parameters for the dynamic thermal characterization of PCM layers in the presence of one or more liquid-solid interfaces," *Energy Build.*, 141, pp. 379–396.
- [22] Diaconu, B. M., and Cruceru, M., 2010, "Novel concept of composite phase change material wall system for year-round thermal energy savings," *Energy Build.*, 42 (10), pp. 1759–1772.
- [23] Comsol, 2013, "The Heat Transfer Module User's Guide - 4.4," COMSOL Multiphysics.
- [24] Neeper, D. A., 2000, "Thermal dynamics of wallboard with latent heat storage," *Sol. Energy*, 68 (5), pp. 393–403.
- [25] Sun, X., Zhang, Q., Medina, M. A., Lee, K. O., and Liao, S., 2016, "Parameter design for a phase change material board installed on the inner surface of building exterior envelopes for cooling in China," *Energy Convers. Manag.*, 120, pp. 100–108.

## ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΠΡΟΒΟΛΟΥ ΣΚΙΑΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΨΗΦΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΤΗΡΙΟΥ (BIM) ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ (LCA)

Χριστιάνα Παντελή<sup>1</sup>, Πάρις Α Φωκαΐδης<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Σχολή Μηχανικής, Πανεπιστήμιο Frederick, Κύπρος  
Φρειδερίκου 7, 1036, Λευκωσία, Κύπρος  
p.fokaides@frederick.ac.cy

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ανάπτυξη υπολογιστικών εργαλείων και η δυνατότητα προσομοίωσης μεγάλου όγκου δεδομένων σε σχέση με ποικίλες κλιματικές συνθήκες έχει υποβοηθήσει την τεκμηριωμένη λήψη απόφασης ως προς τις εναλλακτικές σχεδιαστικές λύσεις βιοκλιματικών στοιχείων κτηρίων. Παράλληλα ο συνδυασμός προχωρημένων μοντέλων και εργαλείων όπως τα μοντέλα ψηφιοποίησης κτηρίου (BIM) αλλά και μοντέλων περιβαλλοντικής αποτίμησης όπως της ανάλυσης κύκλου ζωής (LCA) δίνει την ευκαιρία για ολιστικές προσεγγίσεις τεχνικού, οικονομικού και περιβαλλοντικού χαρακτήρα στον περιβαλλοντικό σχεδιασμό των κτηρίων.

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας, πραγματοποιήθηκε ο βέλτιστος υπολογιστικός σχεδιασμός προβόλου σκίασης κτηρίου, μέσα από την χρήση ενός ολοκληρωμένου μοντέλου ψηφιοποίησης κτηρίου. Η ανάλυση επιχειρήθηκε για διαφορετικές κανονικοποιημένες γεωμετρίες προβόλων σκίασης, διαφορετικούς προσανατολισμούς και διαφορετικά κλιματικά δεδομένα, με την χρήση του εργαλείου ηλιακής ανάλυσης (Solar Analysis) λογισμικού BIM. Για την αποτίμηση της εμπειρεχόμενης ενέργειας και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τις διαφορετικές γεωμετρίες οι οποίες αναλύθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας αξιοποιήθηκε ανάλυση κύκλου ζωής (LCA) και η βάση δεδομένων EcoHestia της Ερευνητικής Ομάδας Αειφόρου Ενέργειας του Πανεπιστημίου Frederick. Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται επίσης οι δείκτες εμπειρεχόμενης ενέργειας των προβόλων σκίασης που εξετάστηκαν σε σχέση με την εξοικονόμηση ενέργειας η οποία επιτεύχθηκε με την χρήση τους, καθώς επίσης και ο υπολογισμός του χρόνου ενεργειακής απόσβεσης των εναλλακτικών σχεδιασμών. Τα αποτελέσματα αυτής της εργασίας αναμένεται να αποτελέσουν οδηγό τεκμηριωμένου σχεδιασμού προβόλων σκίασης βιοκλιματικών κτηρίων, καθώς επίσης και σημείο αναφοράς για ανάλυση σε αντίστοιχη συνδυαστική λογική (BIM και LCA) βιοκλιματικών στοιχείων κτηρίου.

**Λέξεις Κλειδιά:** Πρόβολος σκίασης, βέλτιστος σχεδιασμός, εμπειρεχόμενη ενέργεια, ανάλυση κύκλου ζωής (LCA), μοντέλο ψηφιοποίησης κτηρίου (BIM), χρόνος ενεργειακής απόσβεσης (EPBT)

### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του κτιριακού τομέα αποτελεί βασικό κλειδί για την επίτευξη των στόχων της ΕΕ που αφορούν το κλίμα και την ενέργεια. Η εξοικονόμηση ενέργειας των κτιρίων προωθείται σήμερα με συγκεκριμένα υποχρεωτικά μέτρα που σχετίζονται κυρίως με τη βελτίωση των θερμικών φυσικών ιδιοτήτων του περιβλήματος του κτηρίου. Ορισμένα καλά εδραιωμένα μέτρα στην ευρωπαϊκή περιφέρεια περιλαμβάνουν τις ελάχιστες νομοθετικές απαιτήσεις και την πιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης του κτηρίου και την αύξηση της αποτελεσματικότητας των υπηρεσιών κτιρίων μέσω της οικολογικής σήμανσης. Το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο θέσπισε τα τελευταία χρόνια τρεις οδηγίες, οι οποίες σχετίζονται με την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων.

1. Η οδηγία 2012/27 αφορά την εξοικονόμηση ενέργειας και απαιτεί από όλους τους τομείς να θέσουν δεσμευτικούς στόχους για την ετήσια εξοικονόμηση σε όλους τους τομείς.
2. Η οδηγία 2009/28 αναφέρεται στην προώθηση της χρήσης ενέργειας από «ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και απαιτεί το 20% της ενέργειας να παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έως το 2020».
3. Η οδηγία 2010/31 αφορά τις ενεργειακές επιδόσεις των κτιρίων και απαιτεί ότι μέχρι το 2020 όλα τα νέα κτήρια θα κατασκευαστούν ως κτήρια σχεδόν μηδενικής ενέργειας

Σύμφωνα με τις οδηγίες αυτές, πραγματοποιήθηκαν αρκετές μελέτες εκσυγχρονισμού των κτιρίων. Οι μέθοδοι βελτιστοποίησης που χρησιμοποιούνται σε αυτές τις μελέτες λαμβάνουν υπόψη τόσο τα χαμηλά επίπεδα εκπομπών όσο και την ενεργειακή απόδοση, μέσω της τροποποίησης των διαφορετικών χαρακτηριστικών των κτηρίων, επιδιώκοντας έτσι την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας και του κόστους. Οι οικονομικοί περιορισμοί και οι σημαντικές αβεβαιότητες σε αυτό το μεταγενέστερο πρόβλημα, όπως η αλλαγή του κλίματος και η αλλαγή της κυβερνητικής πολιτικής, μπορούν εύκολα να επηρεάσουν την επιλογή μεταξύ των προτεινόμενων μέτρων και έτσι να καθορίσουν την επιτυχία των προσαρμογών. Είναι βέβαιο ότι πρέπει να εξεταστεί το πολύπλοκο σύνολο αλληλεπιδράσεων μεταξύ όλων των στοιχείων ενός κτηρίου και του περιβάλλοντος του, προκειμένου να βρεθεί η πιο ενεργειακά αποδοτική λύση που ανταποκρίνεται στις ανάγκες ενεργειακών και μη ενεργειακών ζητημάτων, όπως οικονομικών, νομικών και κοινωνικών παραγόντων.

Η ανάπτυξη υπολογιστικών εργαλείων και η δυνατότητα προσομοίωσης μεγάλου όγκου δεδομένων σε σχέση με ποικίλες κλιματικές συνθήκες έχει υποβοηθήσει την τεκμηριωμένη λήψη απόφασης ως προς τις εναλλακτικές σχεδιαστικές λύσεις βιοκλιματικών στοιχείων κτηρίων. Παράλληλα ο συνδυασμός προχωρημένων μοντέλων και εργαλείων όπως τα μοντέλα ψηφιοποίησης κτηρίου (BIM) αλλά και μοντέλων περιβαλλοντικής αποτίμησης όπως της ανάλυσης κύκλου ζωής (LCA) δίνει την ευκαιρία για ολιστικές προσεγγίσεις τεχνικού, οικονομικού και περιβαλλοντικού χαρακτήρα στον περιβαλλοντικό σχεδιασμό των κτηρίων.

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας, πραγματοποιήθηκε ο βέλτιστος υπολογιστικός σχεδιασμός προβόλου σκίασης κτηρίου, μέσα από την χρήση ενός ολοκληρωμένου μοντέλου ψηφιοποίησης κτηρίου. Η ανάλυση επιχειρήθηκε για διαφορετικές κανονικοποιημένες γεωμετρίες προβόλων σκίασης, διαφορετικούς προσανατολισμούς και διαφορετικά κλιματικά δεδομένα, με την χρήση του εργαλείου ηλιακής ανάλυσης (Solar Analysis) λογισμικού BIM. Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται επίσης οι δείκτες εμπειριεχόμενης ενέργειας των προβόλων σκίασης που εξετάστηκαν σε σχέση με την εξοικονόμηση ενέργειας η οποία επιτεύχθηκε με την χρήση τους, καθώς επίσης και ο υπολογισμός του χρόνου ενεργειακής απόσβεσης των εναλλακτικών σχεδιασμών.

Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης αναμένεται να:

- Συμβάλουν στη ανάπτυξη μιας νέας προσέγγισης σχεδιασμού προβόλων σκίασης, λαμβάνοντας υπόψη διάφορες παραμέτρους, με στόχο την ελάχιστη χρήση πόρων και τη μέγιστη εξοικονόμηση ενέργειας.
- Συμβάλουν στη δημιουργία μιας μεθοδολογίας για τη βελτιστοποίηση του μήκους των προβόλων σκίασης, λαμβάνοντας υπόψη την εμπειριεχόμενη ενέργεια.
- Συμβάλουν στον ορισμό της σχέσης μεταξύ διαφόρων σημαντικών παραμέτρων που λαμβάνονται υπόψη για το σχεδιασμό βιοκλιματικών κτηρίων, όπως κλιματικές συνθήκες, γωνίες προβόλων σκίασης, και προσανατολισμούς κτηρίων.

## 2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η μεθοδολογία της μελέτης αναπτύχθηκε με σκοπό την εξέυρεση του βέλτιστου μήκους προβόλων σκίασης, για συγκεκριμένες παραμέτρους σχεδιασμού όπως θα παρουσιαστούν στη συνέχεια. Η σειρά των δραστηριοτήτων έχει ως εξής:

### Καθορισμός βασικής γεωμετρίας

Ο καθορισμός της βασικής γεωμετρίας έγινε μέσω της ανάπτυξης ενός ολοκληρωμένου μοντέλου ψηφιοποίησης κτηρίου, για διαφορετικές κανονικοποιημένες γεωμετρίες προβόλων σκίασης. Το μοντέλο ψηφιοποίησης που χρησιμοποιήθηκε είχε τις εξής γεωμετρικές διαστάσεις: Μήκος 4 μέτρα, Πλάτος 3 μέτρα και ύψος 3 μέτρα. Συγκεκριμένα, οι γωνίες προβόλων σκίασης που

χρησιμοποιήθηκαν ήταν: 15°, 30°, 45° και 60°. Τα δομικά στοιχεία της βασικής γεωμετρίας αποτελούνται από δάπεδο και οροφή από οπλισμένο σκυρόδεμα και τυπικό αργυλικό τούβλο 20 εκατοστών για τους εξωτερικούς τοίχους. Για δομικό υλικό των προβόλων, καθορίστηκε το οπλισμένο σκυρόδεμα.

### Εξεύρεση προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας

Η ανάλυση επιχειρήθηκε για τις προαναφερθείσες γωνιές προβόλων σκίασης, διαφορετικούς προσανατολισμούς (Ανατολικά, δυτικά, Νότια), διαφορετικά κλιματικά δεδομένα, και με διαφορετικές κυριαρχικές καιρικές συνθήκες (Καλοκαιρινές, χειμερινές, Φθινοπωρινές, Ανοιξιάτικες). Η ανάλυση έγινε με την χρήση του εργαλείου ηλιακής ανάλυσης (Solar Analysis) λογισμικού BIM.

Η εξεύρεση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε kWh/m<sup>2</sup>, πραγματοποιήθηκε για τα εξής δομικά στοιχεία:

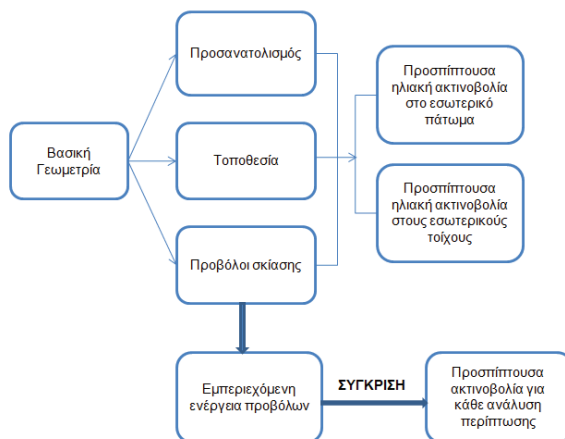
- εσωτερικό πάτωμα και,
- εσωτερικούς τοίχους

### Ανάλυση προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας

Η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία για κάθε περίπτωση ανάλυσης αναλύθηκε με σκοπό τον καθορισμό του βέλτιστου προβόλου σκίασης λαμβάνοντας υπόψη την εξοικονόμηση ενέργειας για κάθε μήκος προβόλου σκίασης σε kWh/m<sup>2</sup>. Η συγκεκριμένη ανάλυση, είχε σκοπό την εύρεση αποτελεσμάτων η οποία θα αποτελούσε βάση σύγκρισης με τους δείκτες εμπειροχόμενης ενέργειας για τον καθορισμό του βέλτιστου μήκους προβόλου σκίασης.

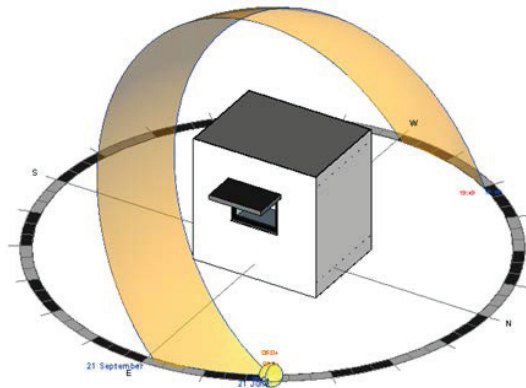
### Καθορισμός βέλτιστου μήκους προβόλου

Το βέλτιστο μήκος προβόλου καθορίστηκε υπολογίζοντας τους δείκτες εμπειροχόμενης ενέργειας των προβόλων σκίασης που εξετάστηκαν σε σχέση με την εξοικονόμηση ενέργειας η οποία επιτεύχθηκε με την χρήση τους, μέσα από την συνολική ανάλυση κύκλου ζωής των προτεινόμενων κατασκευών. Ο χρόνος ενεργειακής απόσβεσης των εναλλακτικών σχεδιασμών υπολογίστηκε επίσης. Για τον καθορισμό της εμπειροχόμενης ενέργειας αξιοποιήθηκε η βάση δεδομένων EcoHestia της Ερευνητικής Ομάδας Αειφόρου Ενέργειας. [1] [2] [3].



Διάγραμμα 1: Μεθοδολογία Εργασίας

Το Διάγραμμα 2 δίνεται παράδειγμα υπολογισμού με την χρήση του λογισμικού Autodesk Revit (για την ανάλυση της γεωμετρίας υπολογισμού).



Διάγραμμα 2: Ηλιακή τροχιά – Υπολογισμός Αθήνα πρόβολος 60°, ανατολή, καλοκαίρι

### 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

#### 3.1. Προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία

Στους Πίνακες 1 και 2 παρουσιάζεται η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στην εσωτερική τοιχοποιία και στο δάπεδο του μοντέλου που εξετάστηκε, για διαφορετικούς προσανατολισμούς, διαφορετικές γωνίες πρόβολου σκίασης και διαφορετικές εποχές του χρόνου σε Αθήνα και Φρανκφούρτη.

#### 3.2. Ανάλυση Κύκλου Ζωής

Στα πλαίσια της εργασίας πραγματοποιήθηκε η πλήρης ανάλυση του κύκλου ζωής των προτεινόμενων κατασκευών. Συγκεκριμένα, αξιοποιήθηκε η βάση δεδομένων EcoHestia για την ανάλυση των κατασκευών οι οποίες δίνονται στον Πίνακα 3.

Οι δείκτες της ανάλυσης κύκλου ζωής των προβόλων που αναλύθηκαν στα πλαίσια της εργασίας είναι οι ακόλουθοι:

- GWP: Global Warming Potential
- AP: Acidification Potential
- EP: Eutrophication Potential
- ODP: Ozone Depletion Potential
- ADP Elements: Abiotic Depletion Potential (elements)
- ADP Fossils: Abiotic Depletion Potential (fossil)
- FAETP: Freshwater Aquatic Ecotoxicity Potential
- HTP: Human Toxicity Potential
- MAETP: Marine Aquatic Ecotoxicity Potential
- Potential; POCP: Photochemical Ozone Creation Potential
- TETP: Terrestrial Ecotoxicity Potential

Υπολογίστηκαν επίσης οι μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας σε MJ καθώς και οι εκπομπές σε CO<sub>2</sub> οι οποίες απαιτούνται για την κατασκευή των προβόλων από την ίδια βάση δεδομένων.

Πίνακας 1: Προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε μοντέλο κτηρίου – Αθήνα (kWh/m<sup>2</sup>)

Ανατολή					Νότος					Δύση				
Εσωτερική Τοιχοποιία					Εσωτερική Τοιχοποιία					Εσωτερική Τοιχοποιία				
	15°	30°	45°	60°		15°	30°	45°	60°		15°	30°	45°	60°
Άνοιξη	53	53	52	52	Άνοιξη	51	51	51	51	Άνοιξη	53	53	52	52
Κ/καίρι	58	58	57	57	Κ/καίρι	56	56	56	56	Κ/καίρι	58	58	57	54
Φ/πρω	25	25	25	24	Φ/πρω	28	27	27	26	Φ/πρω	25	25	25	26
Χ/νας	21	21	21	21	Χ/νας	23	23	22	22	Χ/νας	22	21	21	21
Εσωτερικό Δάπεδο					Εσωτερικό Δάπεδο					Εσωτερικό Δάπεδο				
	15°	30°	45°	60°		15°	30°	45°	60°		15°	30°	45°	60°
Άνοιξη	41	40	38	37	Άνοιξη	19	19	17	17	Άνοιξη	40	39	38	37
Κ/καίρι	44	43	41	28	Κ/καίρι	20	19	18	17	Κ/καίρι	43	31	41	24
Φ/πρω	32	19	19	19	Φ/πρω	35	34	33	31	Φ/πρω	19	19	19	14
Χ/νας	16	16	16	16	Χ/νας	30	29	28	26	Χ/νας	16	16	16	16
Σύνολο					Σύνολο					Σύνολο				
	15°	30°	45°	60°		15°	30°	45°	60°		15°	30°	45°	60°
Άνοιξη	94	93	90	89	Άνοιξη	70	70	68	68	Άνοιξη	93	92	90	89
Κ/καίρι	102	101	98	85	Κ/καίρι	76	75	74	73	Κ/καίρι	101	89	98	78
Φ/πρω	57	44	44	43	Φ/πρω	63	61	60	57	Φ/πρω	44	44	44	40
Χ/νας	37	37	37	37	Χ/νας	53	52	50	48	Χ/νας	38	37	37	37

Πίνακας 2: Προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε μοντέλο κτηρίου – Φρανκφούρτη (kWh/m<sup>2</sup>)

Ανατολή					Νότος					Δύση				
Εσωτερική Τοιχοποιία					Εσωτερική Τοιχοποιία					Εσωτερική Τοιχοποιία				
	15°	30°	45°	60°		15°	30°	45°	60°		15°	30°	45°	60°
Άνοιξη	38	38	37	37	Άνοιξη	37	36	36	36	Άνοιξη	38	37	37	37
Κ/καίρι	43	42	42	42	Κ/καίρι	41	41	41	41	Κ/καίρι	43	43	42	42
Φ/πρω	8	8	8	8	Φ/πρω	11	11	10	10	Φ/πρω	8	8	8	8
Χ/νας	7	6	6	6	Χ/νας	9	9	8	8	Χ/νας	7	7	7	6
Εσωτερικό Δάπεδο					Εσωτερικό Δάπεδο					Εσωτερικό Δάπεδο				
	15°	30°	45°	60°		15°	30°	45°	60°		15°	30°	45°	60°
Άνοιξη	33	33	32	31	Άνοιξη	27	26	21	22	Άνοιξη	33	32	22	31
Κ/καίρι	37	36	36	35	Κ/καίρι	31	29	24	25	Κ/καίρι	26	37	36	35
Φ/πρω	7	7	7	7	Φ/πρω	14	14	14	13	Φ/πρω	7	7	7	7
Χ/νας	6	6	6	6	Χ/νας	11	5	5	5	Χ/νας	6	6	6	6
Σύνολο					Σύνολο					Σύνολο				
	15°	30°	45°	60°		15°	30°	45°	60°		15°	30°	45°	60°
Άνοιξη	71	71	69	68	Άνοιξη	64	62	57	58	Άνοιξη	71	69	59	68
Κ/καίρι	80	78	78	77	Κ/καίρι	72	70	65	66	Κ/καίρι	69	80	78	77
Φ/πρω	15	15	15	15	Φ/πρω	25	25	24	23	Φ/πρω	16	15	15	15
Χ/νας	13	12	12	12	Χ/νας	20	14	13	12	Χ/νας	13	13	12	12

Πίνακας 3: Δελτίο Ποσοτήτων Προβόλων

Πρόβολος	Γωνία	Μήκος (m)	Σκυρόδεμα (m <sup>3</sup> )	Οπλισμός (kg)
1	15 °	0.16	0.041	4.35
2	30 °	0.35	0.089	7.11
3	45 °	0.60	0.153	10.23
4	60 °	1.05	0.268	16.35

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα γενικά συμπεράσματα τα οποία μπορούν να εξαχθούν από την εργασία είναι τα ακόλουθα:

- Η επίδραση στην αλλαγή του ηλιασμού του υπό διερεύνηση μοντέλου είναι ανεπαίσθητα για βόρεια γεωγραφικά κλίματα κατά τη χειμερινή και φθινοπωρινή περίοδο για ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό. Είναι επίσης αρκετά μικρή για νότιο προσανατολισμό.
- Στα βόρεια κλίματα, η επίδραση της γεωμετρίας του προβόλου επιδρά στην ακτινοβολία την οποία απορροφά το δάπεδο κατά τους ανοιξιάτικους και καλοκαιρινούς μήνες, κατά ένα ποσοστό μικρότερο του 20% και στο σύνολο του μοντέλου σε ποσοστό μικρότερο του 10% .Η επίδραση στον ηλιασμό της εσωτερικής τοιχοποιίας κατά τους καλοκαιρινούς μήνες είναι ανεπαίσθητη.
- Για νότια γεωγραφικά κλίματα, η επίδραση στο νότιο προσανατολισμό είναι για όλες τις εποχές του χρόνου στο 10% με αυξανόμενο μήκος προβόλου (μείωση ηλιασμού).
- Για ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό, η επίδραση σε νότιο κλίματα κατά τους χειμερινούς μήνες είναι ανεπαίσθητη. Για τους ανοιξιάτικους μήνες φτάνει στο 10% ενώ για τους καλοκαιρινούς μήνες, η διαφορά στους δύο προσανατολισμούς στα νότια κλίματα φτάνει μέχρι το 20% (με αυξανόμενο μήκος προβόλου)
- Οι εκπομπές για κατασκευή του σκυροδέματος είναι κατά κανόνα μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερες από αυτές του οπλισμού.
- Η αύξηση της εμπεριεχόμενης ενέργειας προβόλου είναι γραμμική σε σχέση με την αύξηση το μήκους του προβόλου, και είναι κατά κανόνα μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από τον ηλιασμό που επιτυγχάνεται κατά τους χειμερινούς μήνες, αλλά και τον ηλιασμό ο οποίος αποτρέπεται κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Βάσει του πιο πάνω συμπεράσματος, για το εξεταζόμενο μοντέλο, η χρήση προβόλων γωνίας 15° παρουσιάζεται ως η ενεργειακά αποδοτικότερη.
- Η εμπεριεχόμενη ενέργεια των προβόλων σε σχέση με την ενέργεια που εξοικονομείται, υποδεικνύει ότι ο χρόνος ενεργειακής απόσβεσης των εξεταζόμενων γεωμετριών ανέρχεται στα 3-4 χρόνια.

#### ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία αυτή αποτελεί διπλωματική εργασία η οποία εκπονήθηκε στα πλαίσια του μεταπτυχιακού προγράμματος MSc in Sustainable Energy Systems του Πανεπιστημίου Frederick. Ιδιαίτερες ευχαριστίες επίσης στην δεσποινίς Αγγελική Κυλίλη, διδακτορική φοιτήτρια συνεργάτη της Ερευνητικής Ομάδας Αειφόρου Ενέργειας (Sustainable Energy Research Group) του Πανεπιστημίου Frederick για την βοήθειά της με την χρήση της βάσης δεδομένων EcoHestia και την ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

11<sup>ο</sup> Εθνικό Συνέδριο για τις ήπιες μορφές ενέργειας • Ι.Η.Τ. • Θεσσαλονίκη, 14-16.03.2018

Πίνακας 4: Ανάλυση Κύκλου Ζωής Προβολών

		GWP	AP	EP	ODP	ADP Elements	ADP Fossils	FAETP	HTP	MAETP	POCPC	TETP
	Σκυρόδεμα C20/25	1.3E+02	8.1E-01	3.2E+02	6.8E+02	3.4E+02	1.6E+03	1.2E+00	1.3E+01	6.2E+03	4.2E+02	2.9E-01
	Οπλισμός	8.7E+00	4.8E-02	3.5E-03	-2.9E-08	-1.3E-06	1.0E+02	6.5E-07	3.9E+01	9.2E+02	4.1E-03	2.8E-02
<b>1</b>	<b>Σύνολο</b>	<b>1.4E+02</b>	<b>8.5E-01</b>	<b>3.2E+02</b>	<b>6.8E+02</b>	<b>3.4E+02</b>	<b>1.7E+03</b>	<b>1.2E+00</b>	<b>5.2E+01</b>	<b>7.1E+03</b>	<b>4.2E+02</b>	<b>3.2E-01</b>
	Σκυρόδεμα C20/25	2.8E+02	1.7E+00	7.1E+02	1.5E+03	7.4E+02	3.5E+03	2.6E+00	2.9E+01	1.3E+04	9.1E+02	6.2E-01
	Οπλισμός	1.4E+01	7.9E-02	5.7E-03	-4.8E-08	-2.1E-06	1.7E+02	1.1E-06	6.3E+01	1.5E+03	6.6E-03	4.6E-02
<b>2</b>	<b>Σύνολο</b>	<b>3.0E+02</b>	<b>1.8E+00</b>	<b>7.1E+02</b>	<b>1.5E+03</b>	<b>7.4E+02</b>	<b>3.7E+03</b>	<b>2.6E+00</b>	<b>9.2E+01</b>	<b>1.5E+04</b>	<b>9.1E+02</b>	<b>6.7E-01</b>
	Σκυρόδεμα C20/25	4.9E+02	3.0E+00	1.2E+03	2.6E+03	1.3E+03	6.0E+03	4.5E+00	5.0E+01	2.3E+04	1.6E+03	1.1E+00
	Οπλισμός	2.0E+01	1.1E-01	8.2E-03	-6.9E-08	-3.1E-06	2.4E+02	1.5E-06	9.1E+01	2.2E+03	9.6E-03	6.6E-02
<b>3</b>	<b>Σύνολο</b>	<b>5.1E+02</b>	<b>3.1E+00</b>	<b>1.2E+03</b>	<b>2.6E+03</b>	<b>1.3E+03</b>	<b>6.3E+03</b>	<b>4.5E+00</b>	<b>1.4E+02</b>	<b>2.5E+04</b>	<b>1.6E+03</b>	<b>1.1E+00</b>
	Σκυρόδεμα C20/25	8.5E+02	5.3E+00	2.1E+03	4.5E+03	2.2E+03	1.1E+04	7.8E+00	8.8E+01	4.0E+04	2.7E+03	1.9E+00
	Οπλισμός	3.3E+01	1.8E-01	1.3E-02	-1.1E-07	-4.9E-06	3.9E+02	2.5E-06	1.5E+02	3.5E+03	1.5E-02	1.1E-01
<b>4</b>	<b>Σύνολο</b>	<b>8.9E+02</b>	<b>5.4E+00</b>	<b>2.1E+03</b>	<b>4.5E+03</b>	<b>2.2E+03</b>	<b>1.1E+04</b>	<b>7.8E+00</b>	<b>2.3E+02</b>	<b>4.4E+04</b>	<b>2.7E+03</b>	<b>2.0E+00</b>

Πίνακας 5: Μη ανανεώσιμες ενεργειακές πηγές και εκπομπές CO<sub>2</sub> προβολών

		Μη ανανεώσιμες ενεργειακές πηγές [MJ]	Μη ανανεώσιμες ενεργειακές πηγές [kWh]	Εκπομπές CO <sub>2</sub> [kg]
	Σκυρόδεμα C20/25	1.7E+03	4.72E+02	1.3E+02
	Οπλισμός	1.1E+02	3.06E+01	8.3E+00
<b>1</b>	<b>Σύνολο</b>	<b>1.8E+03</b>	<b>5.00E+02</b>	<b>1.4E+02</b>
	Σκυρόδεμα C20/25	3.8E+03	1.06E+03	2.8E+02
	Οπλισμός	1.8E+02	5.00E+01	1.4E+01
<b>2</b>	<b>Σύνολο</b>	<b>4.0E+03</b>	<b>1.11E+03</b>	<b>2.9E+02</b>
	Σκυρόδεμα C20/25	6.5E+03	1.81E+03	4.7E+02
	Οπλισμός	2.6E+02	7.22E+01	1.9E+01
<b>3</b>	<b>Σύνολο</b>	<b>6.7E+03</b>	<b>1.86E+03</b>	<b>4.9E+02</b>
	Σκυρόδεμα C20/25	1.1E+04	3.06E+03	8.3E+02
	Οπλισμός	4.1E+02	1.14E+02	3.1E+01
<b>4</b>	<b>Σύνολο</b>	<b>1.2E+04</b>	<b>3.33E+04</b>	<b>8.6E+02</b>

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] Kylili, A., & Fokaides, P. A. (2017). EcoHestia: A Comprehensive Building Environmental Assessment Scheme, Based on Life Cycle Assessment. *Procedia Environmental Sciences*, 38, 515-521.
- [2] Kylili, A., Ilic, M., & Fokaides, P. A. (2017). Whole-building Life Cycle Assessment (LCA) of a passive house of the sub-tropical climatic zone. *Resources, Conservation and Recycling*, 116, 169-177.
- [3] Pacheco-Torgal, F., Granqvist, C. G., Jelle, B. P., Vanoli, G. P., Bianco, N., & Kurnitski, J. (Eds.). (2017). *Cost-Effective Energy Efficient Building Retrofitting: Materials, Technologies, Optimization and Case Studies*. Woodhead Publishing.

## ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΨΥΧΡΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΤΙΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥΣ ΜΙΚΡΟΚΛΙΜΑΤΟΣ. ΜΕΛΕΤΗ ΣΕ ΜΙΑ ΑΝΤΙΠΡΟΣΩΠΕΥΤΙΚΗ ΑΣΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

Στέλλα Τσόκα<sup>1\*</sup>, Κατερίνα Τσικαλουδάκη<sup>1</sup>, Κωνσταντία Τολικά<sup>2</sup>, Δημήτρης Μπίκας<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Παν. Θεσσαλονίκης,

<sup>2</sup> Τμήμα Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Παν. Θεσσαλονίκης

\*e-mail: [stsoka@civil.auth.gr](mailto:stsoka@civil.auth.gr)

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εφαρμογή των ψυχρών υλικών αποτελεί μια από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους ως προς τη βελτίωση των παραμέτρων μικροκλίματος και τη μείωση της έντασης του φαινομένου αστικής θερμικής νησίδας. Σε αυτό το πλαίσιο, η παρούσα εργασία στοχεύει να διερευνήσει αφενός την επίδραση των ψυχρών υλικών στις μικροκλιματικές παραμέτρους, θερμοκρασία επιφανειών (T<sub>surf</sub>) και θερμοκρασία ακτινοβολίας (T<sub>mr</sub>) κάτω από διαφορετικές κλιματικές συνθήκες κατά τη διάρκεια του έτους και αφετέρου, την καθ' ύψος μεταβολή της θερμοκρασίας αέρα μετά την τοποθέτηση των ψυχρών υλικών. Για το σκοπό αυτό, προσομοιώσεις μικροκλίματος με το μοντέλο Envi-met πραγματοποιούνται για αντιπροσωπευτικές μέρες για κάθε εποχή του έτους (i) για την υφιστάμενη κατάσταση με συμβατικά υλικά επικαλύψεων και (ii) μετά την εφαρμογή ψυχρών υλικών, για μία τυπική αστική περιοχή της Θεσσαλονίκης. Από την ανάλυση προκύπτουν σημαντικότερες μειώσεις στη θερμοκρασίες επιφανειών κατά τη θερινή και εαρινή περίοδο ενώ η διαφοροποίηση είναι σχετικά μικρότερη το φθινόπωρο και πολύ περιορισμένη το χειμώνα, λόγω της μεγαλύτερης διάρκειας σκίασης των επιφανειών αλλά και της μικρότερης έντασης ηλιακής ακτινοβολίας. Σχετικά με τη θερμοκρασία αέρα, οι μέγιστες διαφοροποιήσεις στη θερμοκρασία αέρα λόγω εφαρμογής ψυχρών υλικών εντοπίζονται σε ύψος έως περίπου 4,0m από τις οριζόντιες επιφάνειες ενώ σταδιακά, από το επίπεδο του πρώτου ορόφου και έπειτα οι μεταβολές μειώνονται αρκετά. Τέλος, η εφαρμογή ψυχρών επικαλύψεων οδηγεί σε έντονη αύξηση της μέσης θερμοκρασίας ακτινοβολίας γεγονός που μπορεί να επιβαρύνει τη θερμική αίσθηση του πεζού το καλοκαίρι αλλά απο την άλλη, να τη βελτιώσει το χειμώνα.

**Λέξεις Κλειδιά:** αντιπροσωπευτικές μέρες, ψυχρά υλικά, μικροκλίμα, Envi-met

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο όρος μικροκλίμα εκφράζει τη διαφοροποίηση των κλιματικών παραμέτρων που εντοπίζονται μέσα στον αστικό ιστό, συγκριτικά με αυτές των περιαστικών περιοχών. Η διαφοροποίηση αυτή, γνωστή και ως φαινόμενο αστικής θερμικής νησίδας ([1], [2]) έγκειται στο γεγονός πως τα αστικά κέντρα χαρακτηρίζονται από υψηλότερες θερμοκρασίες αέρα σε σχέση με τις αντίστοιχες θερμοκρασίες της υπαίθρου και αποδίδεται στην αλληλεπίδραση διαφόρων παραγόντων οι οποίες αφορούν (i) τη σταδιακή απώλεια φύτευσης και άρα μείωσης της ροής λανθάνουσας θερμότητας [3], (ii) την αντικατάσταση φυσικών υλικών με αντίστοιχα αδιαπέρατα, οι ιδιότητες των οποίων ενισχύουν την απορρόφηση, αποθήκευση και επανεκπομπή θερμότητας [4], (iii) την αυξημένη πυκνότητα δόμησης η οποία επηρεάζει την αποβολή θερμικής ακτινοβολίας προς τον ουρανό [5] και (iv) την ανθρωπογενή θερμότητα, εκλυόμενη από τα μέσα μεταφοράς [6]. Η αύξηση της θερμοκρασίας αέρα στα αστικά κέντρα έχει παρατηρηθεί σε διάφορες πόλεις παγκοσμίως ([7], [8], [9], [10]) όπως και στην Ελλάδα ([11], [12]), με τους επιστήμονες να επισημαίνουν πως στο μέλλον, αναμένονται ακόμα υψηλότερες θερμοκρασίες αέρα, καθώς η διαρκής κλιματική μεταβολή των τελευταίων δεκαετιών, δρα συμπληρωματικά στο φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας ([13], [14]). Στον κτιριακό τομέα, οι επιπτώσεις του φαινομένου συνδέονται τόσο με τη μεταβολή των θερμικών και ψυκτικών απαιτήσεων, όσο και με τη μεταβολή των συνθηκών εσωτερικής θερμικής άνεσης ([15], [16]). Ειδικά για τις περιοχές όπου επικρατούν ήπιες κλιματικές συνθήκες, τα απαιτούμενα ψυκτικά φορτία αναμένεται να αυξηθούν σημαντικά υπερσκελίζοντας τη μικρότερη μείωση των απαιτήσεων για θέρμανση [13].

Σε αυτό το πλαίσιο, ένα διαρκώς αυξανόμενο επιστημονικό ενδιαφέρον εντοπίζεται στη διερεύνηση μεθόδων, η εφαρμογή των οποίων συντελεί στη βελτίωση των παραμέτρων μικροκλίματος και στη μείωση της έντασης του φαινομένου αστικής θερμικής νησίδας ([17], [3], [18]). Μία από τις αντίστοιχες μεθόδους που έχει αναλυθεί εκτενώς στην υπάρχουσα βιβλιογραφία, αφορά την αντικατάσταση συμβατικών υλικών επικαλύψεων οριζόντιων και κατακόρυφων επιφανειών με αντίστοιχα ψυχρά υλικά, τα οποία χαρακτηρίζονται από υψηλή ανακλαστικότητα ( $\alpha$ ) και υψηλή εκπεψιμότητα ( $\epsilon$ ) ([4], [19], [20]). Διάφορες αντίστοιχες τεχνολογίες έχουν αναπτυχθεί έως σήμερα και αφορούν (i) υλικά για το κέλυφος του κτιρίου (επικαλύψεις, μεμβράνες ασφαλτικά κεραμίδια κτλ.) και (ii) υλικά για τις οριζόντιες επιφάνειες του αστικού περιβάλλον (άσφαλτος, πλάκες πεζοδρομίου κτλ.) ([21], [22], [23]).

Γενικότερα, οι θερμοφυσικές και ανακλαστικές ιδιότητες των δομικών υλικών που χρησιμοποιούνται τόσο στο κτιριακό κέλυφος όσο και στις οριζόντιες επιφάνειες έχουν σημαντικότερη επίδραση στο ενεργειακό ισοζύγιο των πόλεων. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, απορροφούν και αποθηκεύουν μέρος της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, τμήμα της οποίας επανεκπέμπεται στη συνέχεια με τη μορφή ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος, αυξάνοντας έτσι τη θερμοκρασία των υπερκείμενων στρωμάτων αέρα μέσω συναγωγής. Ωστόσο, τα ψυχρά υλικά, δεδομένης της υψηλής ανακλαστικότητας τους, συντελούν στην αύξηση της ανακλώμενης ακτινοβολίας και στην αντίστοιχη μείωση αυτής που απορροφάται από τη μάζα τους με αποτέλεσμα την μείωση της θερμοκρασίας τους. Έτσι, λόγω τις χαμηλότερης επιφανειακής θερμοκρασίας που εξασφαλίζουν, η μεταφορά θερμότητας από την επιφάνειά τους στα γεινιάζοντα στρώματα αέρα μειώνεται σημαντικά [4].

Μέχρι σήμερα, οι περισσότερες μελέτες αναλύουν την επίδραση των ψυχρών υλικών στο μικροκλίμα κατά τη θερινή περίοδο, υπό θερμές κλιματικές συνθήκες και σε ύψος 1.5m-1,75m από την επιφάνεια του εδάφους το οποίο αντιστοιχεί στο σημείο που επηρεάζεται η βιομετεωρολογία του ανθρώπινου σώματος ([24], [25], [20], [17], [26]). Ωστόσο, δεδομένου πως η εφαρμογή των ψυχρών επικαλύψεων αποτελεί μία μόνιμη επέμβαση, η παρούσα έρευνα στοχεύει (i) στη διερεύνηση της επίδρασης των ψυχρών υλικών στις μικροκλιματικές παραμέτρους (θερμοκρασία αέρα ( $T_{air}$ ), θερμοκρασία επιφανειών ( $T_{surf}$ ) κάτω από διαφορετικές κλιματικές συνθήκες καθόλη τη διάρκεια του έτους (ii) στην ανάλυση της καθ' ύψος μεταβολής της θερμοκρασίας αέρα μετά την τοποθέτηση των ψυχρών υλικών (iii) στην ανάλυση της επίδρασης των ψυχρών υλικών στη θερμοκρασία ακτινοβολίας ( $T_{mrt}$ ) τη χειμερινή και θερινή περίοδο. Για το σκοπό αυτό, προσομοιώσεις μικροκλίματος με το μοντέλο Envi-met [27] θα πραγματοποιηθούν για τυπικές μέρες για κάθε εποχή (i) για την υφιστάμενη κατάσταση με συμβατικά υλικά επικαλύψεων και (ii) μετά την εφαρμογή ψυχρών υλικών, για μία τυπική αστική περιοχή της Θεσσαλονίκης. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων θα συμβάλει στην ποσοτικοποίηση της επίδρασης της εφαρμογής ψυχρών επικαλύψεων στις βασικές παραμέτρους του μικροκλίματος.

## 2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Προκειμένου να απαντηθούν τα ερευνητικά ερωτήματα που διατυπώθηκαν στην εισαγωγή, η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε είναι η εξής: αρχικά, ορίστηκαν οι αντιπροσωπευτικές μέρες για κάθε μήνα μέσω στατιστικής ανάλυσης μακροχρόνιων καταγραφών. Παράλληλα, διεξήχθησαν επιτόπου μετρήσεις θερμοκρασίας αέρα και σχετικής υγρασίας, απαραίτητες για την αξιολόγηση της επάρκειας του μοντέλου Envi-met. Στη συνέχεια, προσομοιώθηκαν οι υφιστάμενες συνθήκες τις περιοχής μελέτης και οι αντίστοιχες μετά την εφαρμογή των ψυχρών υλικών και τέλος, αναλύθηκε η μεταβολή στις παραμέτρους μικροκλίματος Tair, Tsurf και Tmrt μετά την επέμβαση.

### 2.1. Ορισμός αντιπροσωπευτικών ημερών

Στην παρούσα έρευνα, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο Envi-met v.4 για την διερεύνηση των μικροκλιματικών παραμέτρων πριν και μετά την τοποθέτηση των ψυχρών επικαλύψεων. Δεδομένου πως οι προσομοιώσεις σε αυτή την κλίμακα είναι ιδιαίτερα χρονοβόρες, οι υπολογισμοί γενικά διεξάγονται για μεμονωμένες μέρες και όχι για ολόκληρους μήνες ή έτη. Σε αυτό το πλαίσιο, στην παράγραφο αυτή, περιγράφεται η διαδικασία εξαγωγής αντιπροσωπευτικών ημερών για τις οποίες θα πραγματοποιηθούν οι μικροκλιματικές προσομοιώσεις. Ως αντιπροσωπευτική χαρακτηρίζεται η μέρα, τα κλιματικά χαρακτηριστικά της οποίας έχουν τη μικρότερη δυνατή απόκλιση από τις αντίστοιχες μακροχρόνιες τιμές ([28], [29]). Για τον ορισμό της επομένως απαιτείται μία βάση δεδομένων με μέσες ημερήσιες τιμές κλιματικών παραμέτρων πολλών ετών. Στην παρούσα έρευνα, η αντίστοιχη διαθέσιμη βάση δεδομένων αφορά μέσες ημερήσιες τιμές θερμοκρασίας αέρα για την περίοδο 1958-2000. Ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα [30]:

- Για κάθε μέρα κάθε μήνα, υπολογίστηκε η μέση ημερήσια τιμή θερμοκρασίας αέρα, για το σύνολο της περιόδου. Για παράδειγμα, για την 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου

$$T_{air}^{1st\ mean} = (T_{aver\_1st\_1958}^{air} + T_{aver\_1st\_1959}^{air} + T_{aver\_1st\_1960}^{air} + \dots + T_{aver\_1st\_2000}^{air})/n$$

Όπου n το σύνολο των ετών.

- Για κάθε μήνα, ορίστηκε η διάμεσος των προηγούμενων υπολογισθέντων μέσων τιμών

$$Median \{T_{mean}^{1st}, T_{mean}^{2nd} \dots T_{mean}^{31st}\}$$

- Για κάθε μέρα της περιόδου Σεπτέμβριος 2015-Αύγουστος 2016 (περίοδος κατά την οποία έγιναν οι επιτόπου μετρήσεις θερμοκρασίας αέρα και σχετικής υγρασίας) υπολογίστηκε η απόκλιση της μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας από την αντίστοιχη για κάθε μήνα διάμεσο. Ως αντιπροσωπευτική θεωρήθηκε η μέρα της οποίας μέση ημερήσια θερμοκρασία έχει τη μικρότερη δυνατή απόκλιση από την αντίστοιχη διάμεσο. Εφαρμόζοντας την παραπάνω διαδικασία προκύπτουν οι 12 αντιπροσωπευτικές μέρες για τη Θεσσαλονίκη οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Αντιπροσωπευτικές μέρες για τη Θεσσαλονίκη και η αντίστοιχη απόκλιση της μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας από την αντίστοιχη για κάθε μήνα διάμεσο

Επιλεγμένη αντιπροσωπευτική μέρα	Απόκλιση	Επιλεγμένη αντιπροσωπευτική μέρα	Απόκλιση
4 Ιανουαρίου 2016	7%	22 Ιουλίου 2016	0.7%
8 Φεβρουαρίου 2016	11%	10 Αυγούστου 2016	5.5%
28 Μαρτίου 2016	2.7%	24 Σεπτεμβρίου 2015	0.6%
21 Απριλίου 2016	1.8%	1 Οκτωβρίου 2015	1.8%
16 Μαΐου 2016	2%	26 Νοεμβρίου 2015	3.3%
1 Ιουνίου 2016	1.1%	20 Δεκεμβρίου 2015	2.7%

### 2.2. Προσομείωση μικροκλίματος

#### 2.2.1. Παρουσίαση περιοχής μελέτης

Η περιοχή μελέτης (Εικόνα 1α) βρίσκεται 3km ανατολικά του κέντρου της Θεσσαλονίκης (40.65°N, 22.9°E) και καλύπτει συνολική έκταση 400m<sup>2</sup>. Ως βασικά αστικά φαράγγια θεωρούνται οι εξής δρόμοι:

η Παπανδρέου και η Κίμωνος Βόγα με Β-Ν προσανατολισμό, η Πιπτακού, με Α-Δ προσανατολισμό και η Καλλιγά, με ΒΔ-ΝΑ προσανατολισμό. Τα υπάρχοντα κτίρια, τα οποία είναι κατά βάση κατοικίες, κατασκευάστηκαν κυρίως την περίοδο 1970-1980 και αποτελούνται από 7-8 ορόφους με κυρίαρχα υλικά δόμησης το σκυρόδεμα και τους οπτόπλινθους. Οι επιφάνειες του εδάφους της περιοχής μελέτης επικαλύπτονται από συνήθη αδιαπέρατα υλικά όπως η άσφαλτος και οι πλάκες πεζοδρομίου ενώ οι φυτεύσεις περιορίζονται σε χαμηλά δέντρα και θάμνους με εξαίρεση τα δέντρα στην Καλλιγά όπου φτάνουν έως τα 6-8m και έχουν μέτρια πυκνό φύλλωμα. Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τα μορφολογικά στοιχεία της περιοχής και τα κλιματικά χαρακτηριστικά της πόλης της Θεσσαλονίκης δίνονται στην [31] και [32].



Εικόνα 1: (α) αεροφωτογραφία της περιοχής μελέτης, (β) 3D μοντέλο της περιοχής μελέτης, (γ) κάτοψη του μοντέλου της περιοχής μελέτης, όπως σχεδιάστηκε στο λογισμικό Envi-met

### 2.2.2. Παρουσίαση μοντέλου μικροκλίματος και οργάνωση προσομοιώσεων

Το Envi-met είναι ένα τρισδιάστατο αριθμητικό μη υδροστατικό μοντέλο που στηρίζεται στους βασικούς νόμους της ρευστομηχανικής και της θερμοδυναμικής και έχει σχεδιαστεί ώστε να προσομοιώνει την αλληλεπίδραση μεταξύ επιφανειών-φυτεύσεων-αέρα μέσα στο αστικό περιβάλλον [27]. Μέσω της επίλυσης των εξισώσεων του δυναμικού μοντέλου, προσεγγίζονται οι πολύπλοκες φυσικές διεργασίες που συντελούνται μέσα στο δομημένο περιβάλλον, σε επίπεδο μικροκλίμακας. Απαραίτητα δεδομένα εισαγωγής για την προσομοίωση (με συνήθη διάρκεια έναν ημερήσιο κύκλο) αποτελούν (i) το γεωμετρικό μοντέλο (Εικόνα 1β και 1γ) και (ii) το αρχείο ρυθμίσεων στο οποίο εισάγονται τα απαραίτητα μετεωρολογικά δεδομένα στα πλευρικά όρια του μοντέλου (μέση ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου στα 10m, τραχύτητα εδάφους, σχετική υγρασία σε ύψος 2.5km από το έδαφος, ωριαίες τιμές θερμοκρασίας αέρα και σχετικής υγρασίας για τη μέρα της προσομοίωσης, μέση θερμοκρασία και σχετική υγρασία εδάφους, νεφοκάλυψη κ.λ.π). Στην παρούσα έρευνα, οι ωριαίες τιμές θερμοκρασίας αέρα και σχετικής υγρασίας, η μέση θερμοκρασία εδάφους και η μέση ταχύτητα ανέμου στα 10m προέκυψαν από τις καταγραφές του μετεωρολογικού σταθμού του εργαστηρίου Κλιματολογίας και Μετεωρολογίας, του τμήματος γεωλογίας Α.Π.Θ. Για την τραχύτητα εδάφους και τη σχετική υγρασία σε ύψος 2.5km από το έδαφος, χρησιμοποιήθηκαν οι προεπιλογές του Envi-met. Η ανακλαστικότητα των κατακόρυφων επιφανειών του κελύφους θεωρήθηκε ίση με 0.4. Αναφορικά με την ανακλαστικότητα ( $\alpha$ ) και την εκπεμψιμότητα ( $\epsilon$ ) των υλικών των επιφανειών του εδάφους, λήφθηκαν υπόψη τα παρακάτω στοιχεία [24]: (i) Α-Υφιστάμενη κατάσταση: Συμβατική άσφαλτος,  $\alpha=0.12$  και  $\epsilon=0.90$ , συμβατικές πλάκες πεζοδρομίου  $\alpha=0.30$  και  $\epsilon=0.90$ , (ii) Β-Ψυχρά υλικά: Ψυχρή (ανοιχτό γκρι) άσφαλτος,  $\alpha=0.40$  και  $\epsilon=0.90$ , ψυχρές (ανοιχτό γκρι) πλάκες πεζοδρομίου  $\alpha=0.70$  και  $\epsilon=0.92$

## 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

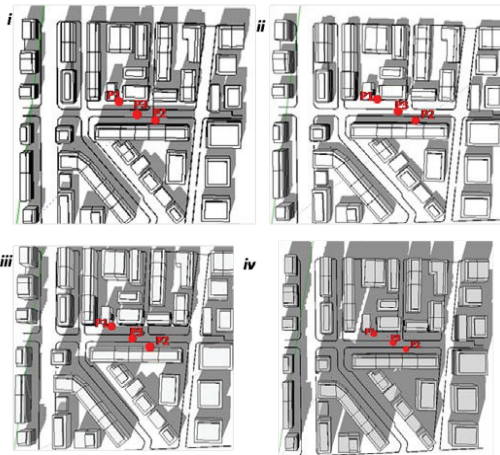
### 3.1. Έλεγχος αξιοπιστίας του μοντέλου μικροκλίματος

Σε πρώτη φάση, προσομοιώσεις μικροκλίματος ημερήσιου κύκλου πραγματοποιήθηκαν για τις αντιπροσωπευτικές μέρες του Ιανουαρίου, του Μαρτίου, του Ιουλίου και του Οκτωβρίου. Τα εξαγόμενα αποτελέσματα θερμοκρασίας αέρα και σχετικής υγρασίας συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες επι τόπου μετρήσεις στην περιοχή μελέτης προκειμένου να αξιολογηθεί η ικανότητα του μοντέλου να αναπαράγει τις παραμέτρους μικροκλίματος καθ'ολη τη διάρκεια του έτους. Για τον έλεγχο επάρκειας, επιλέχθηκαν ενδιάμεσοι μήνες κάθε εποχής με εξαίρεση την άνοιξη, όπου δεν υπήρχαν διαθέσιμες μετρήσεις για

τον Απρίλιο. Η αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας των επιτόπου μετρήσεων, η μεθοδολογία αξιολόγησης του μοντέλου για τις 4 αντιπροσωπευτικές μέρες όπως επίσης και οι τιμές συντελεστών που εκφράζουν το σφάλμα ανάμεσα στο παραγόμενο αποτέλεσμα και την παρατήρηση παρουσιάζονται λεπτομερώς στη [30]. Από τη δεδομένη ανάλυση προέκυψαν ικανοποιητικές τιμές των συντελεστών σφάλματος και επομένως το μοντέλο Envi-met θεωρήθηκε ικανό ώστε να χρησιμοποιηθεί για την περαιτέρω ανάλυση της εφαρμογής ψυχρών υλικών

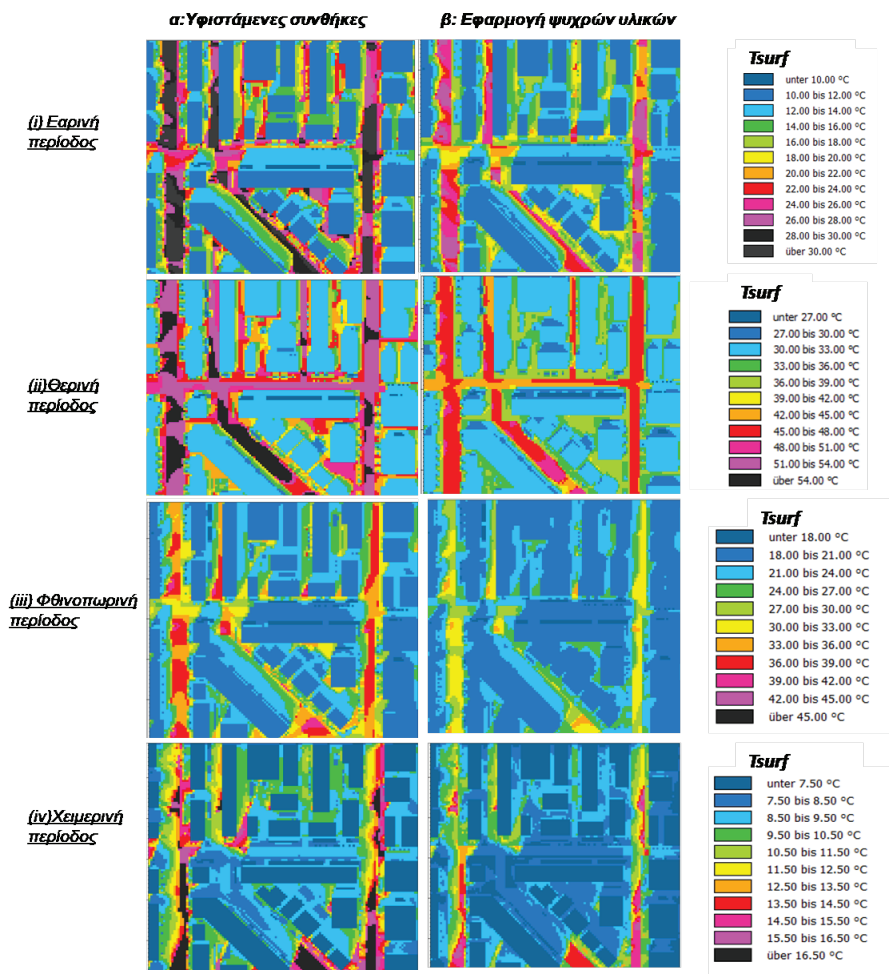
### 3.2. Επίδραση των ψυχρών υλικών στις επιφανειακές θερμοκρασίες

Όπως προαναφέρθηκε, η υψηλή ανακλαστικότητα και εκπεμψιμότητα των ψυχρών υλικών οδηγούν στην αύξηση της ανακλόμενης ακτινοβολίας και στην αντίστοιχη μείωση αυτής που απορροφάται από τη μάζα τους, με τελικό αποτέλεσμα την εξασφάλιση μειωμένης επιφανειακής θερμοκρασίας. Σε προηγούμενες έρευνες όπου εφαρμόστηκαν ψυχρά υλικά σε οριζόντιες επιφάνειες ανοιχτών χώρων, εκτεθειμένων για μεγάλη διάρκεια στην ηλιακή ακτινοβολία (πάρακα, πλατείες κλπ), αναφέρθηκαν μειώσεις επιφανειακής θερμοκρασίας της τάξεως των 12°C-25°C ([33], [34]). Ωστόσο, στο αστικό περιβάλλον, μορφολογικά χαρακτηριστικά όπως η πυκνότητα δόμησης, ο προσανατολισμός των δρόμων και ο λόγος ύψος κτιρίων/πλάτος οδού (H/W) αναμένεται να επηρεάσουν σημαντικά την έκθεση των επιφανειών του εδάφους στην ηλιακή ακτινοβολία και κατ'επέκταση το βαθμό επίδρασης των ψυχρών επικαλύψεων στη μείωση των επιφανειακών θερμοκρασιών. Στην εικόνα 2 παρουσιάζονται τα σκιασμένα και εκτεθειμένα τμήματα της περιοχής μελέτης για τις 4 αντιπροσωπευτικές μέρες κάθε εποχής, μόνο λόγω των κτιριακών όγκων χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι φυτεύσεις. Στην εικόνα 3 παρουσιάζονται οι θερμοκρασίες των οριζόντιων επιφανειών του εδάφους της περιοχής μελέτης, πριν και μετά την εφαρμογή ψυχρών υλικών, για τις 4 αντιπροσωπευτικές μέρες κάθε εποχής. Τα αποτελέσματα αναφέρονται στις 12:00 το μεσημέρι όπου και η ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας είναι μέγιστη.



Εικόνα 2: σκιασμένα και εκτεθειμένα τμήματα της περιοχής μελέτης για (i) 28/03/16, (ii) 22/07/16, (iii) 1/10/15, (iv) 04/01/15, μόνο λόγω των κτιριακών όγκων

**Εαρινή περίοδος:** Το Μάρτιο, στις 12:00 το μεσημέρι, οι οριζόντιες επιφάνειες των δρόμων με Α-Δ προσανατολισμό είναι κυρίως σκιασμένες ενώ αντίθετα, οι επιφάνειες σε αστικά φαράγγια με Β-Ν προσανατολισμό είναι γενικά εκτεθειμένες στην άμεση ηλιακή ακτινοβολία. Ωστόσο, σε περιπτώσεις όπου ο λόγος H/W είναι υψηλός, σημαντικό μέρος των επιφανειών του εδάφους παραμένει σκιασμένο από τα γειτονικά κτίρια και μόνο μερικά σημεία του δρόμου δέχονται άμεση ηλιακή ακτινοβολία (Εικόνα 2i). Με βάση τα παραπάνω, δεδομένης της σκίασης, η εφαρμογή των ψυχρών υλικών οδήγησε σε μία αμελητέα μείωση των επιφανειακών θερμοκρασιών στο μεγαλύτερο μέρος της Πιπτακού της τάξεως των 0.5°C-1.0°C, με εξαίρεση εκτεθειμένα στην ηλιακή ακτινοβολία τμήματα (π.χ. ένωση Πιπτακού και Καλλιγιά) όπου σημειώθηκαν μειώσεις έως και 6.0°C για την ασφάλτο και 7.0°C για τα πεζοδρόμια. Αντίστοιχες διαφοροποιήσεις εντοπίστηκαν στις εκτεθειμένες επιφάνειες της Παπανδρέου και Κίμωνος Βόγα όπου η τοποθέτηση ψυχρής ασφάλτου και ψυχρών πλακών πεζοδρομίου οδήγησε σε σημαντική μείωση της θερμοκρασίας επιφάνειας έως 6.5°C και 9.5°C αντίστοιχα.



Εικόνα 3: Επιφανειακές θερμοκρασίες για (α) τις υφιστάμενες συνθήκες, με συμβατικά υλικά επικαλύψεων και (β) μετά την εφαρμογή ψυχρών υλικών, στις 12:00, για αντιπροσωπευτικές μέρες κάθε εποχής.

**Θερινή περίοδος:** Τον Ιούλιο, οι οριζόντιες επιφάνειες των φαραγγιών με προσανατολισμό Β-Ν είναι πλήρως εκτεθημένες το μεσημέρι στις 12:00 ενώ το μεγαλύτερο μέρος τους σκιάζεται νωρίς το πρωί όπως επίσης και μετά τις 15:00. Από την άλλη, σε δρόμους με Α-Δ προσανατολισμό, οι οριζόντιες επιφάνειες είναι εκτεθημένες νωρίς το πρωί και το απόγευμα αλλά και ενίοτε και το μεσημέρι (ανάλογα με το Η/Μ) λόγω μεγάλου ηλιακού ύψους (Εικόνα 2ii). Έτσι, στην Πιπτακού, στις 12:00, το 50% των επιφανειών του εδάφους δέχεται άμεση ηλιακή ακτινοβολία ενώ το υπόλοιπο σκιάζεται από τους κτιριακούς όγκους. Στα σκιασμένα τμήματα, προέκυψε μικρή μείωση της επιφανειακής θερμοκρασίας η οποία κυμαίνεται μεταξύ 0.3°C -2.0°C (λόγω διάχυτης ακτινοβολίας), ενώ αντίθετως, σημαντικότερη ήταν η διαφοροποίηση για τα εκτεθημένα μέρη της ασφάλτου και των πεζοδρομίων, φτάνοντας τους 8.0°C και 10.0°C αντίστοιχα. Παρόμοιες υψηλές μειώσεις εντοπίστηκαν και στην Παπαανδρέου και Βόγα, όπου η εφαρμογή των ψυχρών υλικών είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση των επιφανειακών θερμοκρασιών της ασφάλτου και των πεζοδρομίων κατά 6.5°C -8.0°C και 8.0°C -11.0°C αντίστοιχα. Αναφορικά με τα στενότερα αστικά φαράγγια (προσανατολισμός Β-Ν), ο υψηλός λόγος Η/Μ συντέλεσε σε σημαντική μείωση της προσπίπτουσας στις επιφάνειες του εδάφους ηλιακή ακτινοβολία έως τις

11:00. Ωστόσο, στις 12:00, το μεγαλύτερο τμήμα του εδάφους είναι πλήρως εκτεθημένο στην άμεση ακτινοβολία (μικρά μονο τμήματα σκιάζονται από τα κτίρια) με αποτέλεσμα να προκύψουν ξανά μεγάλες μειώσεις θερμοκρασίας για την άσφαλτο, με τιμές που κυμαίνονται μεταξύ 7.0°C και 10.0°C.

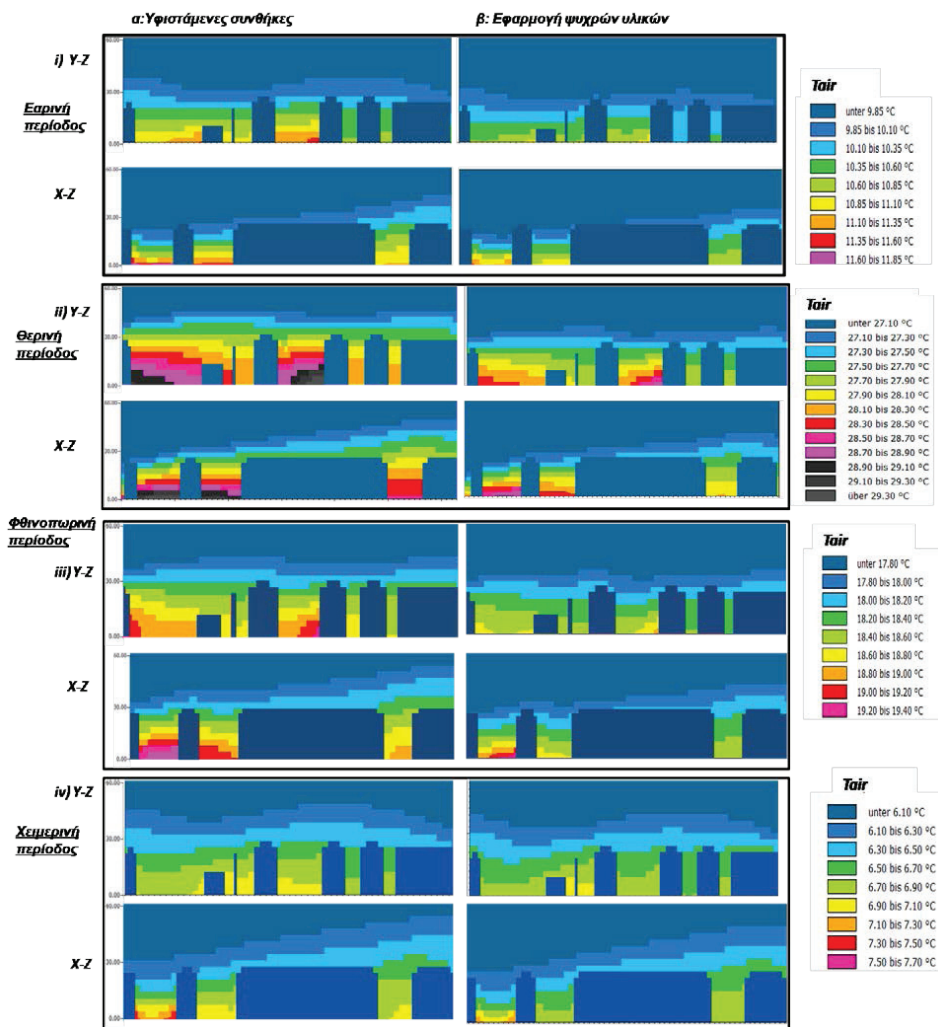
**Φθινοπωρινή περίοδος:** Τον Οκτώβριο, στις 12:00, οι οριζόντιες επιφάνειες των δρόμων με Β-N προσανατολισμό είναι πλήρως εκτεθημένες στην ηλιακή ακτινοβολία με εξαίρεση τα στενότερα αστικά φαράγγια όπου οι υψηλές τιμές του λόγου Η/Μ, σε συνδιασμό με τα χαμηλότερα ηλιακά ύψη, οδηγούν σε σκίαση των οριζόντιων επιφανειών από τα γειτονικά κτίρια. Αντίστοιχα, σκιασμένες στο μεγαλύτερο μέρος τους είναι οι οριζόντιες επιφάνειες της Πιττακού και της Καλλιγά (Εικόνα 2iii). Δεδομένης λοιπόν της σκίασης αλλά και της χαμηλότερης έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας αυτή την περίοδο του έτους, η μείωση της επιφανειακής θερμοκρασίας της ασφάλτου και των πεζοδρομίων ήταν αμελητέα για την Πιττακού και Καλλιγά, με μέγιστες τιμές έως 1.5°C. Εξαιρέση αποτελεί το τμήμα στο σταυροδρόμι των οδών όπου παραμένει εκτεθημένο στις ακτίνες του ηλίου. Η μείωση εκεί βρέθηκε 4.0°C-6.0°C και 5.0°C-6.5°C για την άσφαλτο και τα πεζοδρόμια αντίστοιχα ενώ παρόμοιο ήταν και το εύρος των διαφοροποιήσεων για τα εκτεθημένα τμήματα στην Παπανδρέου και τη Βόγα.

**Χειμερινή περίοδος:** Τον Ιανουάριο, το μεσημέρι, τα μεγαλύτερα τμήμα της περιοχής μελέτης σκιάζεται από τους κτιριακούς όγκους, με εξαίρεση τμήματα των επιφανειών του εδάφους στα αστικά φαράγγια της Παπανδρέου και Βογά (Εικόνα 2iv). Λόγω της μειωμένης έντασης ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη χειμερινή περίοδο, η μέγιστη πτώση επιφανειακής θερμοκρασίας της εκτεθημένης ασφάλτου είναι 5.0°C ενώ για τα πεζοδρόμια η αντίστοιχη τιμή είναι 4.0°C. Ωστόσο, στο μεγαλύτερο μέρος των οριζόντιων επιφανειών του εδάφους της περιοχής, οι μειώσεις της θερμοκρασίας δεν ξεπερνούν τους 1.3°C, δεδομένης της σκίασης από τις γειτονικές πολυκατοικίες.

### 3.3. Επίδραση των ψυχρών υλικών στις θερμοκρασίες αέρα

Σε αυτή την ενότητα εξετάζεται η επίδραση της εφαρμογής ψυχρών υλικών στη θερμοκρασία αέρα. Όπως προαναφέρθηκε, λόγω τις χαμηλότερης επιφανειακής θερμοκρασίας τους, η μεταφορά θερμότητας από την επιφάνειά τους στα γεινιάζοντα στρώματα αέρα μειώνεται σημαντικά. Μέχρι σήμερα, οι περισσότερες έρευνες επικεντρώνονται στις μειώσεις που προκύπτουν κατά τη θερινή περίοδο, και σε ύψος 1.5m από την επιφάνεια του εδάφους, σημείο στο οποίο μελετάται η βιομετεωρολογία του ανθρώπινου σώματος και η αίσθηση θερμικής άνεσης του πεζού [26]. Σε προηγούμενη βιβλιογραφική ανασκόπηση όπου αναλύθηκε πλήθος ερευνών ως προς την επίδραση των ψυχρών υλικών στις παραμέτρους μικροκλίματος, αναφέρθηκαν μειώσεις της μέσης τιμής θερμοκρασίας αέρα από 0.20°C έως 0.80°C ενώ η καταγεγραμμένη μείωση της μέγιστης θερμοκρασίας αέρα κυμαίνεται από 0.50°C έως 3.0°C [35]. Στην παρούσα έρευνα, η ανάλυση δεν επικεντρώνεται μόνο στη θερινή περίοδο αλλά και στις άλλες εποχές του έτους (4 αντιπροσωπευτικές μέρες κάθε εποχής) ενώ τα αποτελέσματα παρουσιάζονται καθ' ύψος της περιοχής μελέτης, ακολουθώντας τις τομές y-z και x-z (Εικόνα 1.γ). Συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα για την Πιττακού και το κατώτερο τμήμα της Καλλιγά εντοπίζονται στην τομή y-z ενώ για τις οδούς Παπανδρέου, Βόγα και το ανώτερο τμήμα της Καλλιγά, τα αποτελέσματα λαμβάνονται από την τομή x-z.

**Εαρινή περίοδος:** Στις εικόνες 4.i.a και 4.i.β παρουσιάζεται η καθ' ύψος κατανομή της θερμοκρασίας αέρα (από 0 έως 60m) για την υψιστάμενη κατάσταση και μετά την εφαρμογή των ψυχρών υλικών αντίστοιχα, στις 12:00 το μεσημέρι. Από τη συγκριτική ανάλυση προκύπτει τα εξής στοιχεία: (Τομή Y-Z) Στο κατώτερο σημείο της Καλλιγά και την Πιττακού, η θερμοκρασία των στρωμάτων αέρα κοντά στο έδαφος παρουσιάζει μέγιστη μείωση της τάξεως των 0.45°C ενώ η ένταση της διαφοροποίησης της θερμοκρασίας αέρα ( $\Delta T_{air}$ ) μειώνεται ελαφρά από τα 4.5m έως τα 7.5m με μειώσεις που κυμαίνονται μεταξύ 0.25°C-0.35°C και 0.35°C-0.45°C αντίστοιχα. Από εκεί και έως το μέγιστο ύψος των κτιρίων (22m), η ψύξη του αέρα μειώνεται σημαντικά και οι μέγιστη διαφοροποίηση φτάνει μόλις τους 0.20°C. Αναλύοντας στη συνέχεια την τομή x-z, τιμές  $\Delta T_{air}$  της τάξεως των 0.60°C-0.70°C εντοπίζονται μετά την εφαρμογή ψυχρής ασφάλτου σε ύψος 0.0m-2.0m στην Παπανδρέου και στο ανώτερο τμήμα της Καλλιγά, στο σημείο ένωσης με την Πιττακού. Από τα 4.5m έως 7.5m οι αντιστοιχες μειώσεις είναι 0.30°C-0.40°C και 0.40°C-0.50°C ενώ από το μέσο του ύψους των 2 αστικών φαραγγίων έως το επίπεδο του δώματος η τιμή  $\Delta T_{air}$  προσεγγίζει τους 0.25°C και 0.35°C αντίστοιχα. Να σημειωθεί πως οι μικρότερες τιμές  $\Delta T_{air}$  που αναφέρονται στην Πιττακού ή στους αλάμπους χάρους μεταξύ των κτιριακών όγκων οφείλονται στο γεγονός πως τα συγκεκριμένα σημεία της περιοχής μελέτης σκιάζονται τη δεδομένη στιγμή της ημέρας και επομένως η επίδραση των ψυχρών υλικών είναι λιγότερο αισθητή.



Εικόνα 4: Καθ' ύψος μεταβολή της θερμοκρασίας αέρα για την υφιστάμενη κατάσταση και μετά την εφαρμογή των ψυχρών υλικών στις 12:00 το μεσημέρι, για τις αντιπροσωπευτικές μέρες των 4 εποχών.

**Θερινή περίοδος:** Η καθ' ύψος μεταβολή της θερμοκρασίας αέρα (από 0 έως 60m) για την υφιστάμενη κατάσταση και μετά την εφαρμογή των ψυχρών υλικών στις 12:00 το μεσημέρι παρουσιάζεται στις εικόνες 4.ii.α και 4.ii.β αντίστοιχα. Για τις υφιστάμενες συνθήκες προέκυψαν σημαντικά αυξημένες τιμές  $T_{air}$ , ίσες με 29.4 °C, σε ύψος 1.5m πάνω από τη συμβατική άσφαλτο και τα συνήθη πεζοδρόμια στα τμήματα της Καλλιγιά, της Παπανδρέου και της Πιπτακού που βρίσκονται εκτεθειμένα στην ηλιακή ακτινοβολία. Να σημειωθεί πως η ύπαρξη φυτεύσεων στα δεδομένα σημεία δεν οδήγησε σε σημαντικές σημειακές μειώσεις της θερμοκρασίας καθώς πρόκειται κυρίως για χαμηλά δέντρα με αραιό φύλλωμα ή χαμηλούς θάμνους. Στην Κίμωνος Βόγα, η θερμοκρασία αέρα σε ύψος 1.50m είναι κατά τι μικρότερη, γύρω στους 28.70 °C. Ο λόγος είναι πως λόγω υψηλότερου λόγου H/W (σε σχέση με την Παπανδρέου), ένα σημαντικό τμήμα των οριζόντιων επιφανειών του εδάφους σκιαζόταν έως τις 11:00. Τα υλικά του εδάφους απορρόφησαν έτσι μικρότερα ποσά ηλιακής ακτινοβολίας με αποτέλεσμα η θέρμανση του γειτονικού αέρα να είναι λιγότερο έντονη. Ενδιαφέρον έχει επίσης πως τα στρώματα αέρα σε επαφή με το κτίριο παρουσιάζουν ελαφρώς μεγαλύτερη  $T_{air}$  σε σχέση με αυτή

που εντοπίζεται στο μέσο του αστικού φαραγγιού, λόγω της μεταφοράς θερμότητας από το κέλυφος του κτιρίου προς το γειτονικό αέρα μέσω συναγωγής. Η τοποθέτηση ψυχρής ασφάλτου και ψυχρών πλακών πεζοδρομίου είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση της  $T_{air}$  κατά  $0.60^{\circ}\text{C}$ - $0.70^{\circ}\text{C}$  στο 1.50m από το έδαφος, για τα τμήματα των οδών που αναφέρθηκαν προηγουμένως ενώ η διαφοροποίηση ήταν ελαφρώς μικρότερη για τα τμήματα των οδών που ήταν ήδη σκιασμένα από τους κτιριακούς όγκους. Παρατηρείται επίσης πως όσο αυξάνει η απόσταση από το έδαφος, τόσο αρχίζει να μειώνεται η ένταση της επίδρασης των ψυχρών υλικών. Συγκεκριμένα, στο επίπεδο του 1<sup>ου</sup> (4.5-7.0m) 2<sup>ου</sup> (7.5-10.0m) και του 4<sup>ου</sup> ορόφου (16.5-19.5m) της Πιττακού, της Καλλιγιά Παπανδρέου η μέση μείωση της  $T_{air}$  είναι  $0.65^{\circ}\text{C}$ ,  $0.55^{\circ}\text{C}$  και  $0.45^{\circ}\text{C}$  αντίστοιχα ενώ στο επίπεδο του δώματος (22.5m), η τιμή  $\Delta T_{air}$  λόγω ψυχρών επικαλύψεων φτάνει τους  $0.30^{\circ}\text{C}$ .

Φθινοπωρινή περίοδος: Παρόλη τη μείωση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη φθινοπωρινή περίοδο, η εφαρμογή επικαλύψεων υψηλής ανακλαστικότητας συντέλεσε σε σημαντική μείωση της  $T_{air}$  στην Παπανδρέου κατά  $0.60^{\circ}\text{C}$  και  $0.45^{\circ}\text{C}$ , σε ύψος 1.5m πάνω από την ψυχρή άσφαλο και τα πεζοδρόμια αντίστοιχα (εικόνα 4.iii.a και 4.iii.β) ενώ για το ίδιο ύψος, μικρότερες τιμές της τάξεως των  $0.35^{\circ}\text{C}$  και  $0.45^{\circ}\text{C}$  εντοπίστηκαν για τη Βόγα και την Πιττακού και Καλλιγιά αντίστοιχα. Οι μεγαλύτερες διαφοροποιήσεις της Παπανδρέου αλλά και στο σταυροδρόμι Πιττακού-Καλλιγιά οφείλονται στη μεγαλύτερη διάρκεια ηλιασμού των επιφανειών του εδάφους. Όπως και προηγουμένως, η επίδραση της εφαρμογής των υλικών μειώνεται με την αύξηση της απόστασης από το έδαφος. Έτσι ενδεικτικά, από μια τιμή  $\Delta T_{air}$  που κυμαίνεται μεταξύ  $0.40^{\circ}\text{C}$  -  $0.50^{\circ}\text{C}$  στο επίπεδο του ισόγειου της Πιττακού καταλήγουμε σε μια μέγιστη  $\Delta T_{air}$  ίση με  $0.20^{\circ}\text{C}$  στο επίπεδο του 5<sup>ου</sup> ορόφου (19.5-22.5m) ενώ στο επίπεδο του δώματος η επίδραση είναι γύρω στους  $0.15^{\circ}\text{C}$ . Αντίστοιχης εμβέλειας είναι και η καθ' ύψος μεταβολές και στις υπόλοιπες οδούς.

Χειμερινή περίοδος: Τη χειμερινή περίοδο, σχετικά σημαντικές διαφοροποιήσεις της τάξεως των  $0.30^{\circ}\text{C}$  και  $0.20^{\circ}\text{C}$  εντοπίζονται στην Παπανδρέου και τη Βόγα αντίστοιχα, σε ύψος 1.5m από την επιφάνεια του εδάφους. Πρόκειται για τις μόνες οδούς που δέχονται ηλιακή ακτινοβολία το μεσημέρι της τυπικής μέρας του Ιανουαρίου. Παρατηρήθηκαν ωστόσο πολύ μικρές μειώσεις της  $T_{air}$  από το επίπεδο του ισόγειου και πάνω (από τα 4,5m και πάνω) οι οποίες μόλις αγγίζουν τους  $0.10^{\circ}\text{C}$  στο επίπεδο του 2<sup>ου</sup> και 3<sup>ου</sup> ορόφου. Παράλληλα, δεδομένης της καθολικής σκίασης των υπόλοιπων δρόμων, οι διαφορές που προέκυψαν τόσο στο επίπεδο του πεζού όσο και καθ' ύψος είναι σχεδόν αμελητέες.

### 3.4. Επίδραση των ψυχρών υλικών στη θερμοκρασία ακτινοβολίας

Η μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας ( $T_{mrt}$ ) είναι η παράμετρος με τη σημαντικότερη επίδραση στο θερμικό ισοζύγιο του ανθρώπινου σώματος και για το λόγο αυτό είναι καθοριστικής σημασίας στον υπολογισμό των περισσότερων δεικτών θερμικής άνεσης [36] όπως η Φυσιολογικά Ισοδύναμη Θερμοκρασία PET [37], η προβλεπόμενη μέση ψήφος PMV [38] ο πιο πρόσφατος Καθολικός Θερμικός Κλιματικός δείκτης UTCI [39] κ.λ.π. Για έναν άνθρωπο με καθορισμένη ενδυμασία και σωματική θέση, η  $T_{mrt}$  ορίζεται ως η αντίστοιχη μέση θερμοκρασία εκπομπής μέλανος σώματος, στο οποίο θα είχαμε αντίστοιχες απώλειες και οφέλη ακτινοβολίας κάτω από παρόμοιες συνθήκες περιβάλλοντος [26]. Μέχρι σήμερα, ο προσδιορισμός της παραμέτρου γίνεται είτε πειραματικά είτε υπολογιστικά ([40], [41]). Σε ό,τι αφορά τον υπολογισμό αυτής με το  $Env\text{-}met$ , προηγούμενες έρευνες έδειξαν πως το μοντέλο τείνει να υπερεκτιμήσει τις ημερήσιες τιμές της παράμετρου γεγονός που οφείλεται τόσο στην υπερεκτίμηση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας όσο και στην υπόθεση στατικών συνθηκών νεφοκάλυψης με τις μέγιστες ημερήσιες τιμές να υπολογίζονται ωστόσο αξιόπιστα [42], [38]. Με βάση τα παραπάνω και με στόχο να διερευνηθεί η επίδραση των ψυχρών υλικών στο θερμικό ισοζύγιο των πεζών, υπολογίστηκαν οι τιμές της  $T_{mrt}$  στις 12 το μεσημέρι, όπου η ηλιακή ακτινοβολία είναι μέγιστη, πριν και μετά την μορφολογική επέμβαση, για 3 σημεία της οδού Πιττακού, τα οποία φαίνονται στην εικόνα 2. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε τιμές της  $T_{mrt}$  σε ύψος 1.5m από το έδαφος, ενώ η μελέτη επικεντρώνεται τώρα σε 2 περιόδους προσομοίωσης, το καλοκαίρι και το χειμώνα, όπου εντοπίζονται τα μεγαλύτερα ζητήματα ως προς τη θερμική άνεση των πεζών

- Το σημείο P1 βρίσκεται στο πεζοδρόμιο της οδού και είναι εκτεθημένο στην ηλιακή ακτινοβολία τον Ιούλιο ενώ σκιάζεται το Γενάρη.
- Το σημείο P2 βρίσκεται σε πεζοδρόμιο της οδού Πιττακού το οποίο είναι μόνιμα σκιασμένο τόσο το καλοκαίρι όσο και το χειμώνα.
- Το σημείο P3 βρίσκεται στο μέσο της οδού, σε άσφαλο και σκιάζεται το χειμώνα ενώ είναι εκτεθημένο το καλοκαίρι.

Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται οι τιμές της  $T_{mrt}$  και της  $T_{air}$  για τα 3 προαναφερθέντα σημεία. Όπως έχει προκύψει από την προηγούμενη ανάλυση για τη θερινή περίοδο, τα ψυχρά υλικά οδηγούν σε σημαντικότερη μείωση των επιφανειακών θερμοκρασιών και τελικά σε αρκετά σημαντικές μειώσεις της θερμοκρασίας αέρα, σε ύψος 1.50m. Θα μπορούσε επομένως να θεωρηθεί πως άμεση συνέπεια αυτής της μείωσης είναι και η βελτίωση της θερμικής αίσθησης. Ωστόσο, η μείωση της  $T_{air}$  υποσκελίζεται από τη μεγάλη άνοδο της τιμής  $T_{mrt}$ , λόγω αύξησης της ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας μετά την τοποθέτηση των ψυχρών υλικών. Πιο συγκεκριμένα, η αύξηση της ανακλαστικότητας της ασφάλτου και των πεζοδρομίων κατά 0.4 και 0.28 αντίστοιχα, οδήγησαν αφενός σε μείωση της  $T_{air}$  κατά 0.75 °C και 0.66 °C, αφετέρου σε μεγάλη αύξηση της  $T_{mrt}$  κατά 6.37 °C και 6.67 °C για τα σημεία P1 και P3 αντίστοιχα. Ελαφρώς μικρότερη αλλά σημαντική ήταν η αύξηση και στο σκιασμένο σημείο P2, λόγω αύξησης της διάχυτης ακτινοβολίας. Δεδομένης της επίδρασης της παραμέτρου στο θερμικό ισοζύγιο του ανθρώπινου σώματος και με βάση τις αποτελέσματα προηγούμενων μελετών, η αυξημένη τιμή της  $T_{mrt}$  αναμένεται να επιδεινώσει τη θερμική αίσθηση των πεζών [19], ενώ αντίθετα το χειμώνα, η αύξηση της θερμοκρασίας ακτινοβολίας αναμένεται να μειώσει την αίσθηση ψύχους των πεζών.

Πίνακας 2: Τιμές  $T_{mrt}$  και  $T_{air}$  σε 3 σημεία της οδού Πιπτακού

Περίοδος	Παράμετρος	Σενάριο	P1	P2	P3
Καλοκαίρι- 22/07/16	$T_{mrt}$ (°C)	A	62.37	44.27	62.53
		B	68.27	50.3	69.19
	$T_{air}$ (°C)	A	29.35	28.96	29.34
		B	28.60	28.40	28.68
	$\Delta T_{mrt}$ (°C) (B-A)		<b>6.37</b>	<b>6.03</b>	<b>6.67</b>
$\Delta T_{air}$ (°C) (B-A)		<b>-0.75</b>	<b>-0.56</b>	<b>-0.66</b>	
Χειμώνας- 04/01/16	$T_{mrt}$ (°C)	A	12.32	11.37	11.80
		B	14.58	12.79	14.20
	$T_{air}$ (°C)	A	6.89	6.95	6.93
		B	6.78	6.82	6.81
	$\Delta T_{mrt}$ (°C) (B-A)		<b>2.26</b>	<b>1.42</b>	<b>2.40</b>
$\Delta T_{air}$ (°C) (B-A)		<b>-0.11</b>	<b>-0.13</b>	<b>-0.12</b>	

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα έρευνα διερεύνησε την επίδραση των ψυχρών υλικών στις θερμοκρασίες οριζόντιων επιφανειών εδάφους και στη θερμοκρασία αέρα μιας πυκνοδομημένης αστικής περιοχής στη Θεσσαλονίκη κάτω από διαφορετικές μετεωρολογικές συνθήκες ενώ παράλληλα, εξετάστηκε η επιρροή των υλικών υψηλής ανακλαστικότητας στη μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας, κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού και του χειμώνα. Από την ανάλυση προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα: Η επίδραση των ψυχρών υλικών στις παραμέτρους του μικροκλίματος συνδέεται άμεσα με τη διάρκεια του ηλιασμού και την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Επίσης βρέθηκαν σημαντικές διαφορές στις επιφανειακές θερμοκρασίες της ασφάλτου που έφταναν τους 6.50°C την άνοιξη και το φθινόπωρο και τους 11 °C το καλοκαίρι. Το χειμώνα οι διαφορές ήταν σαφώς μικρότερες λόγω μικρής έντασης ηλιακής ακτινοβολίας και μικρού ηλιακού ύψους και μόνο σε μερικά σημεία εντοπίστηκαν διαφορές έως 5 °C, μετά την τοποθέτηση ψυχρής ασφάλτου. Παράλληλα, οι μέγιστες διαφοροποιήσεις στη θερμοκρασία αέρα λόγω εφαρμογής ψυχρών υλικών εντοπίζονται στα γεινιάζοντα με τις οριζόντιες επιφάνειες στρώματα αέρα ενώ σταδιακά, από το επίπεδο του πρώτου ορόφου και έπειτα οι μεταβολές μειώνονται αρκετά. Τέλος, η εφαρμογή ψυχρών επικαλύψεων οδηγεί σε αξιοσημείωτη αύξηση της μέσης θερμοκρασίας ακτινοβολίας γεγονός που μπορεί να επιβαρύνει ιδιαίτερα το θερμικό ισοζύγιο του πεζού το καλοκαίρι αλλά από την άλλη, να βελτιώσει τις συνθήκες θερμικής άνεσης το χειμώνα.

**ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Οι συγγραφείς του άρθρου θα ήθελαν να ευχαριστήσουν το εργαστήριο Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας του τμήματος Γεωλογίας Α.Π.Θ. για την παροχή των κλιματικών δεδομένων.

**ΑΝΑΦΟΡΕΣ**

1. Akbari, H., et al., *Local climate change and urban heat island mitigation techniques—the state of the art*. Journal of Civil Engineering and Management, 2016. **22**(1): p. 1-16.
2. Akbari, H., A. Rosenfeld, and H. Taha, *Summer heat islands, urban trees, and white surfaces*. 1990: Energy Analysis Program, Center for Building Science, Applied Science Division, Lawrence Berkeley Laboratory, University of California.
3. Rizwan, A.M., L.Y. Dennis, and L. Chunho, *A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island*. Journal of Environmental Sciences, 2008. **20**(1): p. 120-128.
4. Santamouris, M., A. Synnefa, and T. Karlessi, *Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions*. Solar Energy, 2011. **85**(12): p. 3085-3102.
5. Oke, T.R., *The energetic basis of the urban heat island*. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1982. **108**(455): p. 1-24.
6. Taha, H., *Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat*. Energy and buildings, 1997. **25**(2): p. 99-103.
7. Cheval, S., A. Dumitrescu, and A. Bell, *The urban heat island of Bucharest during the extreme high temperatures of July 2007*. Theoretical and Applied Climatology, 2009. **97**(3-4): p. 391-401.
8. Li, Q., et al., *Urban heat island effect on annual mean temperature during the last 50 years in China*. Theoretical and Applied Climatology, 2004. **79**(3): p. 165-174.
9. Gaffin, S., et al., *Variations in New York city's urban heat island strength over time and space*. Theoretical and applied climatology, 2008. **94**(1): p. 1-11.
10. Tan, J., et al., *The urban heat island and its impact on heat waves and human health in Shanghai*. International journal of biometeorology, 2010. **54**(1): p. 75-84.
11. Giannaros, T.M. and D. Melas, *Study of the urban heat island in a coastal Mediterranean City: The case study of Thessaloniki, Greece*. Atmospheric Research, 2012. **118**: p. 103-120.
12. Giannopoulou, K., et al., *On the characteristics of the summer urban heat island in Athens, Greece*. Sustainable Cities and Society, 2011. **1**(1): p. 16-28.
13. Founda, D., et al., *Analysis of mean, maximum, and minimum temperature in Athens from 1897 to 2001 with emphasis on the last decade: trends, warm events, and cold events*. Global and Planetary change, 2004. **44**(1): p. 27-38.
14. Papakostas, K., P. Zagana-Papavasileiou, and T. Mavromatis. *Analysis of 3 decades of temperature data for Athens and Thessaloniki, Greece-Impact of temperature changes on energy consumption for heating and cooling of buildings*. in International Conference ADAPT to CLIMATE. Nicosia. 2014.
15. Santamouris, M., *Regulating the damaged thermostat of the cities—status, impacts and mitigation challenges*. Energy and Buildings, 2015. **91**: p. 43-56.
16. Allegrini, J., et al. *Modelling the urban microclimate and its influence on building energy demands of an urban neighbourhood*. in Proceedings of CISBAT 2013 Cleantech for Smart Cities and Buildings. 2013. EPFL Solar Energy and Building Physics Laboratory (LESO-PB).
17. Li, D., E. Bou-Zeid, and M. Oppenheimer, *The effectiveness of cool and green roofs as urban heat island mitigation strategies*. Environmental Research Letters, 2014. **9**(5): p. 055002.
18. Wang, Y., U. Berardi, and H. Akbari, *Comparing the effects of urban heat island mitigation strategies for Toronto, Canada*. Energy and Buildings, 2016. **114**: p. 2-19.
19. Erell, E., et al., *Effect of high-albedo materials on pedestrian heat stress in urban street canyons*. Urban Climate, 2014. **10**: p. 367-386.
20. Doulos, L., M. Santamouris, and I. Livada, *Passive cooling of outdoor urban spaces. The role of materials*. Solar energy, 2004. **77**(2): p. 231-249.
21. Synnefa, A., M. Santamouris, and K. Apostolakis, *On the development, optical properties and thermal performance of cool colored coatings for the urban environment*. Solar Energy, 2007. **81**(4): p. 488-497.

22. Synnefa, A., et al., *Experimental testing of cool colored thin layer asphalt and estimation of its potential to improve the urban microclimate*. Building and Environment, 2011. **46**(1): p. 38-44.
23. Karlessi, T., et al., *Development and testing of thermochromic coatings for buildings and urban structures*. Solar Energy, 2009. **83**(4): p. 538-551.
24. Carnielo, E. and M. Zinzi, *Optical and thermal characterisation of cool asphalts to mitigate urban temperatures and building cooling demand*. Building and Environment, 2013. **60**: p. 56-65.
25. Akbari, H., M. Pomerantz, and H. Taha, *Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas*. Solar energy, 2001. **70**(3): p. 295-310.
26. Matzarakis, A., F. Rutz, and H. Mayer, *Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: basics of the RayMan model*. International journal of biometeorology, 2010. **54**(2): p. 131-139.
27. Huttner, S., *Further development and application of the 3D microclimate simulation ENVI-met*. Mainz University, Germany, 2012.
28. Santamouris, M., *Advances in building energy research*. Vol. 1. 2012: Earthscan.
29. Tirabassi, T. and S. Nasseti, *The representative day*. Atmospheric environment, 1999. **33**(15): p. 2427-2434.
30. Tsoka, S., et al., *A method to account for the urban microclimate on the creation of 'typical weather year' datasets for building energy simulation, using stochastically generated data*. Energy and Buildings, 2017. **In press**.
31. Tsoka, S., K. Tsikaloudaki, and T. Theodosiou, *Urban space's morphology and microclimatic analysis: A study for a typical urban district in the Mediterranean city of Thessaloniki, Greece*. Energy and Buildings, 2017.
32. Tsoka, S., E. Litserinou, and K. Tsikaloudaki, *Evaluating the effect of cool materials on microclimatic variables under different meteorological conditions. Application in the city of Thessaloniki.*, in *3rd International Conference on Changing Cities*. 2017: 26-30 June 2017, Syros.
33. Santamouris, M., et al., *Using cool paving materials to improve microclimate of urban areas—design realization and results of the flisvos project*. Building and Environment, 2012. **53**: p. 128-136.
34. Stavrakakis, G., et al., *A computational methodology for effective bioclimatic-design applications in the urban environment*. Sustainable Cities and Society, 2012. **4**: p. 41-57.
35. Santamouris, M., *Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island—A review of the actual developments*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013. **26**: p. 224-240.
36. Herrmann, J. and A. Matzarakis, *Mean radiant temperature in idealised urban canyons—examples from Freiburg, Germany*. International journal of biometeorology, 2012. **56**(1): p. 199-203.
37. Höpfe, P., *The physiological equivalent temperature—a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment*. International journal of Biometeorology, 1999. **43**(2): p. 71-75.
38. Fanger, P.O., *Assessment of man's thermal comfort in practice*. Occupational and Environmental Medicine, 1973. **30**(4): p. 313-324.
39. Jendritzky, G., R. de Dear, and G. Havenith, *UTCI—Why another thermal index?* International journal of biometeorology, 2012. **56**(3): p. 421-428.
40. VDI, 3787, *Part I: Environmental Meteorology, Methods for the Human Biometeorological Evaluation of Climate and Air Quality for the Urban and Regional Planning at Regional Level. Part I: Climate*. Part I: Climate. Beuth, Berlin, 1998.
41. Kántor, N. and J. Unger, *The most problematic variable in the course of human-biometeorological comfort assessment—the mean radiant temperature*. Open Geosciences, 2011. **3**(1): p. 90-100.
42. Roth, M. and V.H. Lim, *Evaluation of canopy-layer air and mean radiant temperature simulations by a microclimate model over a tropical residential neighbourhood*. Building and Environment, 2017. **112**: p. 177-189.

## ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΥΛΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΚΤΗΡΙΩΝ ΓΡΑΦΕΙΩΝ ΜΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΛΑΦΡΙΑΣ ΔΟΜΗΣΗΣ.

Απόστολος Καραούλης<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Εργαστήριο Οικοδομικής και Φυσικής των Κτηρίων, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,  
Πολυτεχνική Σχολή, ΑΠΘ  
e-mail: [akara@civil.auth.gr](mailto:akara@civil.auth.gr)

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στα κτήρια με ελαφριά συστήματα δόμησης, τόσο στο κέλυφος όσο και στο εσωτερικό τους, η ύπαρξη θερμικής μάζας είναι σημαντική καθώς βοηθά στην διατήρηση της θερμοκρασίας στους εσωτερικούς χώρους σε επίπεδα άνεσης και στην ελαχιστοποίηση των μέγιστων θερμοκρασιών κατά τη διάρκεια των ζεστών καλοκαιρινών ημερών χωρίς επιπλέον κόστος ενέργειας ενώ, στις ψυχρές μέρες μπορεί να συμβάλει στη μείωση της ενέργειας θέρμανσης.

Ειδικά σε χώρες με θερμά κλίματα όπως η Ελλάδα, οι ελαφριές κατασκευές με χαμηλή θερμική μάζα έχουν την τάση να υπερθερμαίνονται λόγω των ηλιακών και εσωτερικών κερδών που δεν μπορούν να απορροφηθούν από τη δομή και ως εκ τούτου εμφανίζουν εσωτερικές θερμοκρασίες οι οποίες μπορούν να ανέλθουν σε μη αποδεκτά επίπεδα.

Η παρούσα εργασία διερευνά και συγκρίνει την απόδοση κτηρίων με ελαφριά συστήματα δόμησης και χωρίς τη χρήση υλικών αλλαγής φάσης. Με αναφορά σε ένα τυπικό κτήριο γραφείων και με τη χρήση δυναμικών προσομοιώσεων, η παραμετρική μελέτη διεξάγεται με τη διαφοροποίηση παραμέτρων όπως η ύπαρξη των υλικών αλλαγής φάσης ή όχι, το σημείο τήξης τους, η θέση τους, ο προσανατολισμός και η θέση του κτηρίου. Συγκεκριμένα, γίνεται διερεύνηση και σύγκριση της απόδοσης των υλικών αλλαγής φάσης όσον αφορά στην ενεργειακή απόδοση των κτηρίων τόσο για το θερινό όσο και για τους χειμερινούς μήνες του χρόνου.

**Λέξεις Κλειδιά:** Υλικά αλλαγής φάσης, ελαφριές κατασκευές, ενεργειακή απόδοση, θερμικά και ψυκτικά φορτία.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η νέα γενιά υλικών αλλαγής φάσης (Υ.Α.Φ.) προσφέρει ήδη μεγαλύτερη ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας από πολλά συμβατικά υλικά και για μικρές μεταβολές θερμοκρασίας. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ενίσχυση της θερμικής μάζας των δομικών στοιχείων και να διαφοροποιήσουν τη θερμική απόδοση της κατασκευής σε νέα ή υφιστάμενα κτήρια στα οποία ενσωματώνονται.

Τα τελευταία χρόνια, ολοένα και περισσότεροι ερευνητές διερευνούν τόσο τους τρόπους ενσωμάτωσης των υλικών αλλαγής φάσης (Υ.Α.Φ.) στα δομικά υλικά όσο την επίδρασή τους στην θερμοκρασιακή διακύμανση των επιφανειών του κελύφους και στις συνθήκες θερμικής άνεσης που διαμορφώνονται στο κτήριο.

Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν παρουσιασθεί αρκετές μελέτες που δίνουν αποτελέσματα σχετικά με την ενσωμάτωση των Υ.Α.Φ. στα κτήρια [1-11], όπως: μεθόδους μοντελοποίησής και τρόπους ενσωμάτωσής τους κυρίως σε κτήρια κατοικίας με συμβατικές μεθόδους δόμησης, περιγραφή μεθοδολογίας για την εκτίμηση της επίδρασης των Υ.Α.Φ. στις συνθήκες θερμικής άνεσης σε κτήρια με ελαφριά δόμηση, προσδιορισμός της βέλτιστης θέσης ενσωμάτωσης Υ.Α.Φ. σε εξωτερική ξύλινη τοιχοποιία, πειραματικές μετρήσεις ενσωμάτωσης Υ.Α.Φ. σε τοιχοποιίες με οπτόπλινθους κ.α.

Από όλες τις μελέτες προκύπτει ότι η επίδραση και η αποτελεσματικότητα των Υ.Α.Φ. εξαρτάται από τις κλιματικές συνθήκες, από το μέγεθος της επιφάνειας στο οποίο εφαρμόζονται, το πάχος των Υ.Α.Φ., το σημείο τήξης τους. Και ότι σε κάθε περίπτωση υπάρχει μία σαφής βελτίωση των συνθηκών θερμικής άνεσης των χώρων στους οποίους εφαρμόζονται.

Ωστόσο, στην μέχρι τώρα έρευνα, λίγες είναι οι αναφορές σχετικά με την επίδραση της χρήσης Υ.Α.Φ. στα θερμικά και ψυκτικά φορτία του κτηρίου, οι μελέτες επικεντρώνονται κυρίως σε συμβατικά κτήρια και στις περισσότερες περιπτώσεις τα Υ.Α.Φ. τοποθετούνται στην εξωτερική τοιχοποιία.

Σε αυτό το πλαίσιο, η παρούσα μελέτη εστιάζει και διερευνά την ενεργειακή απόδοση ενός κτηρίου με συστήματα ελαφριάς δόμησης, στο κέλυφος και στο εσωτερικό του, με τη χρήση και χωρίς τη χρήση υλικών αλλαγής φάσης. Το κτήριο αναφοράς τοποθετείται στην περιοχή της Αθήνας, με κυριότερο χαρακτηριστικό του κλίματος την εναλλαγή παρατεταμένων ζεστών και ξηρών καλοκαιριών και ήπιων, υγρών χειμώνων. Η παραμετρική ανάλυση έγινε διαφοροποιώντας παράγοντες όπως ο προσανατολισμός, τη χρήση ή μη Υ.Α.Φ., η θέση των Υ.Α.Φ., το πάχος τους, το σημείο τήξης τους.

Ειδικότερα, η διερεύνηση και η σύγκριση της χρήσης των Υ.Α.Φ. μελετήθηκε αναφορικά με την ενεργειακή απόδοση του κτηρίου κυρίως τους καλοκαιρινούς μήνες και την εξοικονόμηση ψυκτικών φορτίων, ωστόσο αποτελέσματα παρουσιάζονται και για τη χειμερινή περίοδο.

## 2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

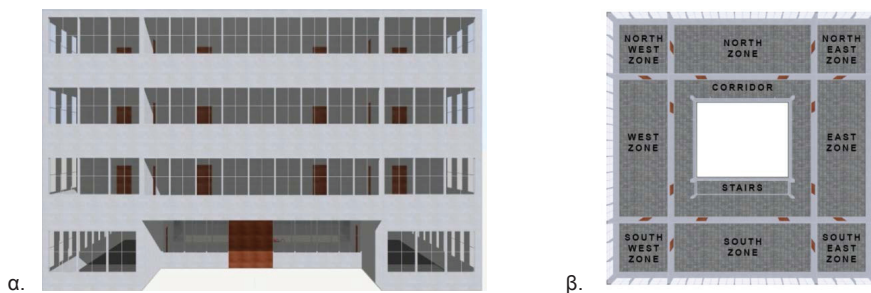
### 2.1. Κτήριο αναφοράς

Για την παρούσα μελέτη, ως κτήριο αναφοράς, χρησιμοποιήθηκε ένα τυπικό κτήριο γραφείων το οποίο έχει φέροντα οργανισμό (υποστυλώματα, δοκούς, πλάκες) από οπλισμένο σκυρόδεμα και συστήματα ελαφριάς δόμησης τόσο στο εξωτερικό κέλυφος όσο και στα εσωτερικά διαχωριστικά.

Το κτήριο, όπως φαίνεται στην εικόνα 1 (νότια όψη και κάτοψη), προσομοιώθηκε σε δύο εκδοχές:

- χωρίς χρήση υλικών αλλαγής φάσης (PCM)
- με χρήση υλικών αλλαγής φάσης (PCM)

Οι εξωτερικές διαστάσεις του κτηρίου είναι 22,00x22,00m, στον πυρήνα του διαμορφώνεται ένα αίθριο διαστάσεων 8,00x4,50m και έχει συνολικό ύψος 14,00m. Τα διαφανή στοιχεία της τοιχοποιίας (παράθυρα) καταλαμβάνουν το 60% της κάθε όψης. Τα κουφώματα είναι από αλουμίνιο χωρίς θερμοδιακοπή με διπλή υάλωση 4-12-4 και χωρίς επίστρωση. Τα συμπαγή στοιχεία του κελύφους είναι από θερμομονωμένα μεταλλικά πάνελ πάχους 10cm. Τα υλικά αλλαγής φάσης, είναι υπό μορφή ρολού με κυψέλες, τα οποία μπορούν να τοποθετηθούν τόσο στην οροφή του κάθε ορόφου (στο διάκενο της ψευδοροφής) όσο και στις τοιχοποιίες με απλή ανάρτηση και έχουν πάχος 3,7cm. Οι εσωτερικές διαχωριστικές τοιχοποιίες είναι από σύστημα ξηράς δόμησης με πλήρωση θερμομονωτικού υλικού από πλάκες πετροβάμβακα.



Εικόνα 1: (α) Νότια όψη του κτηρίου, (β) κάτοψη τυπικού ορόφου.

Στον πίνακα 1 δίνονται οι τιμές του συντελεστής θερμοπερατότητας των δομικών στοιχείων όπως προέκυψαν από τον αναλυτικό υπολογισμό με βάση τις θερμοφυσικές ιδιότητες των επιμέρους υλικών, οι οποίες είναι σύμφωνες προς τους ελληνικούς κανονισμούς.

Πίνακας 1: Συντελεστές θερμοπερατότητας δομικών στοιχείων κτηρίου.

Συντελεστής θερμοπερατότητας	Δομικό στοιχείο				
	Εξωτερική τοιχοποιία	Εσωτερική τοιχοποιία	Δώμα	Δάπεδα	Κουφώματα
U W/m <sup>2</sup> ·K	0,311	0,305	0,372	0,484	2,725

## 2.2. Προσομοιώσεις

Η διερεύνηση της επίδρασης της χρήσης υλικών αλλαγής φάσης στην ενεργειακή απόδοση του κτηρίου έγινε με το δυναμικό προσομοιωτικό λογισμικό Design Builder 5.0. Το Design Builder είναι ένα ισχυρό δυναμικό λογισμικό ανάλυσης του κτηριακού περιβάλλοντος το οποίο συνδυάζει την ευκολία του γραφικού περιβάλλοντος και τη μοντελοποίηση με τα αξιόπιστα αποτελέσματα του λογισμικού δυναμικής θερμικής προσομοίωσης EnergyPlus, το οποίο χρησιμοποιεί ως κώδικα υπολογισμού. Επιπλέον το Energy Plus ενσωματώνει αλγόριθμο πεπερασμένων στοιχείων ο οποίος είναι ικανός να προσομοιώνει την θερμική συμπεριφορά των Υ.Α.Φ. Ο αλγόριθμος του Energy Plus και τα αποτελέσματά του Design Builder έχουν αξιολογηθεί και επικυρωθεί σε αντίστοιχες μελέτες [2],[12].

Για τον προσδιορισμό των θερμικών και ψυκτικών φορτίων του κτηρίου ορίστηκαν δύο περιοχές με διαφορετικές συνθήκες (Εικ. 1,β)

- η ζώνη των γραφείων (οκτώ σε κάθε όροφο, μια για κάθε κατεύθυνση)
- η ζώνη του διαδρόμου και του κλιμακοστασίου (δύο σε κάθε όροφο)

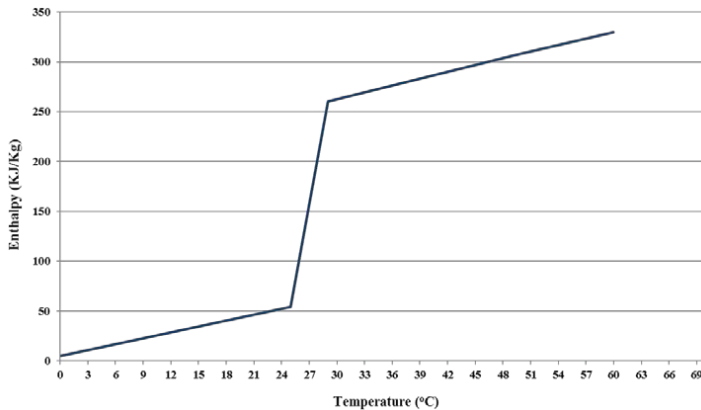
Οι ιδιότητες των Υ.Α.Φ. επιλέχθηκαν απευθείας από τη βάση δεδομένων του λογισμικού Design Builder. Στην παρούσα μελέτη έγιναν προσομοιώσεις Υ.Α.Φ. με εύρος σημείου τήξης από 21°C έως 29°C και επιλέχθηκε ως βέλτιστο σημείο τήξης των Υ.Α.Φ. οι 29°C. Το γράφημα μεταβολής της ενθαλπίας σε σχέση με τη θερμοκρασία του Υ.Α.Φ.29 (Υ.Α.Φ. με σημείο τήξης 29°C) δίνεται στην εικόνα 2α.

Επίσης, για τις προσομοιώσεις ορίστηκαν τα εξής:

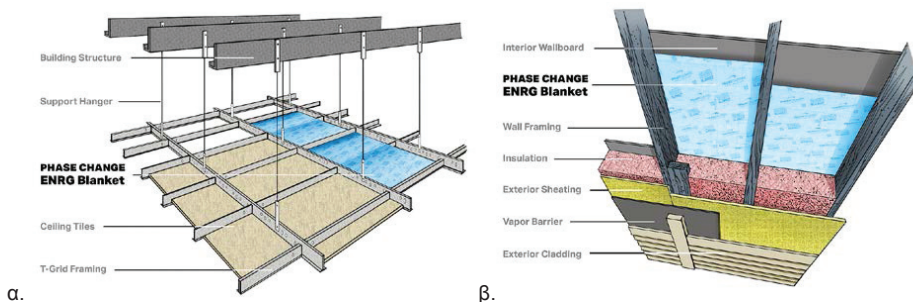
- το σύστημα κλιματισμού ενεργοποιείται όταν η εσωτερική θερμοκρασία υπερβεί τους 26° C το καλοκαίρι ή όταν η εσωτερική θερμοκρασία είναι μικρότερη των 22°C χειμώνα.
- η παροχή νωπού αέρα στο χώρο γίνεται με μηχανικό αερισμό 8,33l/s/άτομο για το διάστημα της ημέρας από τις 8:00 έως τις 18:00 (ωράριο χρήσης των γραφείων).

- διείσδυση αέρα 0,70 ac/h
- δεν υπάρχει καθόλου φυσικός (νυχτερινός) αερισμός.
- για την ενίσχυση της απόδοσης των Υ.Α.Φ. μέσω της βραδινής αποφόρτισής τους, ορίστηκε μηχανικός αερισμός 1,50 ac/h για το διάστημα από τις 18:00 έως τις 8:00.

Ως τοποθεσία αναφοράς επιλέχθηκε η Αθήνα που ανήκει στη Β κλιματική ζώνη της Ελλάδος και το κλίμα της οποίας παρουσιάζει εναλλαγή παρατεταμένων ζεστών και ξηρών καλοκαιριών και ήπιων, υγρών χειμώνων.



Εικόνα 2: Ενθαλπία-θερμοκρασία Υ.Α.Φ. 29



α.

β.

Εικόνα 3: Ενσωμάτωση Υ.Α.Φ. (α) στην οροφή και (β) σε εξωτερική τοιχοποιία [15]

### 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Προκειμένου να γίνει η ανάλυση των αποτελεσμάτων για την ενεργειακή απόδοση του κτηρίου λόγω της χρήσης Υ.Α.Φ., ορίστηκαν δύο δείκτες απόδοσης:

- $\Delta z \parallel$  : αποδίδει τη διαφορά των θερμικών/ψυκτικών φορτίων σε απόλυτη τιμή σε  $\text{KWh/m}^2$ , λόγω της χρήσης των Υ.Α.Φ. και
- $\Delta z \%$  : αποδίδει την ποσοστιαία διαφοροποίηση των θερμικών/ψυκτικών φορτίων

Θετική τιμή των δεικτών σημαίνει ότι στο ανακαινισμένο κτήριο με Υ.Α.Φ. υπάρχει μείωση των θερμικών/ψυκτικών φορτίων ενώ η αρνητική τιμή επισημαίνει εσφαλμένη χρήση Υ.Α.Φ.

### 3.1. Προκαταρκτική διερεύνηση

Όπως αναφέρθηκε, προκειμένου να υποβοηθηθεί η απόδοση των Υ.Α.Φ. κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, ορίσθηκε, από τις 6:00 το απόγευμα έως τις 8:00 το πρωί (δηλαδή τις ώρες μη λειτουργίας του κτηρίου), μηχανικός αερισμός με 1,5 εναλλαγή αέρα την ώρα. Στον πίνακα 2 δίνονται τα αποτελέσματα με τη χρήση ή όχι του βραδινού μηχανικού αερισμού. Είναι φανερό πως σε κάθε περίπτωση η απόδοση του Υ.Α.Φ. αυξάνεται 5 έως και 7 φορές κι αυτό διότι με τον αερισμό αυτόν ενισχύεται η αποφόρτιση των Υ.Α.Φ. επιτρέποντας έτσι την στερεοποίησή τους και τη λειτουργία πλήρους κύκλου. Σε αντίστοιχη μελέτη [1] αναφέρεται ότι νυχτερινός αερισμός των Υ.Α.Φ. μέχρι και 4ac/h είναι από τους βασικούς παράγοντες για την μεγιστοποίηση της απόδοσης των Υ.Α.Φ. στα κτήρια. Για την χειμερινή περίοδο δεν είναι απαραίτητη η υποβοήθηση αποφόρτισης των Υ.Α.Φ. με νυχτερινό αερισμό αφού αυτό είναι συμβαίνει λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών του κτηρίου ούτως ή άλλως.

Πίνακας 2: Επίδραση της χρήσης νυχτερινού μηχανικού αερισμού στην απόδοση των Υ.Α.Φ.

Χρήση νυχτερινού μηχανικού αερισμού	Μείωση ψυκτικών φορτίων	
	Δz    (KWh/m <sup>2</sup> )	Δz %
Χωρίς νυχτερινό μηχανικό αερισμό	0,66	0,81
Με νυχτερινό μηχανικό αερισμό	3,75	4,64

### 3.2. Σημείο τήξης των Υ.Α.Φ.

Ένας από τους βασικούς παράγοντες για την βελτιστοποίηση της απόδοσης της εφαρμογής των Υ.Α.Φ. είναι η επιλογή του σωστού σημείου τήξης και κατ' επέκταση του σημείου στερεοποίησης το οποίο είναι συνήθως 2 - 4°C χαμηλότερα. Από τη διεθνή βιβλιογραφία προκύπτει ότι τα Υ.Α.Φ. αποδίδουν καλύτερα, δηλαδή έχουν συχνούς και πλήρεις κύκλους λειτουργίας (απορρόφηση, αποθήκευση και απόδοση πίσω της θερμότητας) όταν το σημείο τήξης τους είναι κοντά στο μέσο όρο της θερμοκρασίας του χώρου στον οποίο τοποθετούνται και της θερμοκρασίας του εξωτερικού περιβάλλοντος στη διάρκεια της νύκτας. Σε μελέτη [6] για διαφορετικές περιοχές της Μεσογείου αναφέρουν ότι για την εξοικονόμηση ψυκτικών φορτίων στην περιοχή της Αθήνας τα Υ.Α.Φ. πρέπει να έχουν σημείο τήξης στους 27°C.

Με δεδομένο ότι γίνεται διερεύνηση της απόδοσης των Υ.Α.Φ. τόσο για τους θερινούς όσο και για τους χειμερινούς μήνες, χρησιμοποιώντας τη βάση δεδομένων για τα Υ.Α.Φ. του λογισμικού, το κτήριο προσομοιώθηκε για πέντε διαφορετικά σημεία τήξης των Υ.Α.Φ., για 21, 23, 25, 27 και 29°C. Στους πίνακες 4 και 5 αντίστοιχα δίνονται τα αποτελέσματα μείωσης των ψυκτικών και των θερμικών φορτίων σε απόλυτη τιμή. Για τους θερινούς μήνες τα Υ.Α.Φ. με σημείο τήξης 21-25°C έχουν χαμηλότερη απόδοσή κατά 33% περίπου σε σχέση με αυτά με σημείο τήξης 27 και 29°C ενώ, η αύξηση του σημείου τήξης των Υ.Α.Φ. δεν συνδράμει ουσιαστικά στην μείωση των ψυκτικών φορτίων.

Αντίθετα, η επίδραση των Υ.Α.Φ. στην εξοικονόμηση θερμικών φορτίων κατά τους χειμερινούς μήνες φαίνεται πολύ χαμηλή και ότι η χρήση τους για αυτό το σκοπό δεν είναι αποτελεσματική, όταν εφαρμόζουμε Υ.Α.Φ. με σημείο τήξης 29°C. Ενώ όσο χαμηλότερο είναι το σημείο τήξης του Υ.Α.Φ. τόσο μεγαλύτερη είναι η μείωση των θερμικών φορτίων. Με βάση τα αποτελέσματα του πίνακα 5 μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η εφαρμογή Υ.Α.Φ. με χαμηλότερο σημείο τήξης των 21°C δεν θα επιφέρει σημαντική περαιτέρω μείωση των θερμικών φορτίων.

Πίνακας 4: Μείωση ψυκτικών φορτίων συναρτήσει του σημείου τήξης των Υ.Α.Φ.

Επιφάνεια	Δz % - Μείωση ψυκτικών φορτίων (KWh/m <sup>2</sup> )				
	Υ.Α.Φ.21	Υ.Α.Φ. 23	Υ.Α.Φ. 25	Υ.Α.Φ. 27	Υ.Α.Φ. 29
Σύνολο κτηρίου	3,10	3,10	3,17	4,62	4,64

Πίνακας 5: Μείωση θερμικών φορτίων συναρτήσει του σημείου τήξης των Υ.Α.Φ.

Επιφάνεια	Δζ % - Μείωση θερμικών φορτίων (KWh/m <sup>2</sup> )				
	Υ.Α.Φ.21	Υ.Α.Φ. 23	Υ.Α.Φ. 25	Υ.Α.Φ. 27	Υ.Α.Φ. 29
Σύνολο κτηρίου	4,72	4,59	3,98	0,62	0,60

### 3.3. Πάχος των Υ.Α.Φ.

Σημαντικός παράγοντας στην απόδοση των Υ.Α.Φ. είναι η χρησιμοποιούμενη μάζα τους, η απαιτούμενη ποσότητα δηλαδή του υλικού που θα τοποθετηθεί στον κάθε χώρο. Στον πίνακα 6 αναλύεται η επίδραση της μεταβολής του πάχους της στρώσης των Υ.Α.Φ. Η επιλογή του πάχους έγινε απευθείας από τη βάση δεδομένων του προγράμματος, όπως αυτή διαμορφώθηκε σε συνεργασία με τον κατασκευαστή των Υ.Α.Φ. Τα ψυκτικά φορτία μειώνονται όσο αυξάνεται το πάχος των Υ.Α.Φ. Το βέλτιστο πάχος είναι τα 3,71cm ενώ, περαιτέρω αύξηση (όπως σημειώνεται και στη διεθνή βιβλιογραφία [6]) του πάχους των Υ.Α.Φ. δεν μπορεί να προσφέρει βελτιώσεις στις εσωτερικές συνθήκες ενώ ταυτόχρονα αυξάνεται σημαντικά και το κόστος επένδυσης. Επομένως, η διερεύνηση στην παρούσα εργασία γίνεται για το βέλτιστο πάχος των Υ.Α.Φ. των 3,71cm.

Πίνακας 6: Μείωση ψυκτικών φορτίων συναρτήσει του πάχους των Υ.Α.Φ.

Επιφάνεια	Πάχος των Υ.Α.Φ. στο χώρο							
	1,12 cm		2,08 cm		3,71 cm		7,42 cm	
	Δζ %	Δζ	Δζ %	Δζ	Δζ %	Δζ	Δζ %	Δζ
Σύνολο κτηρίου	2,56	2,07	2,75	2,23	4,64	3,75	3,78	3,05

### 3.4. Θέση εφαρμογής των Υ.Α.Φ.

Στις μέχρι τώρα μελέτες παρουσιάζονταν αποτελέσματα για την επίδραση των Υ.Α.Φ., από πειραματικές μετρήσεις σε πραγματικά κτήρια (κυρίως κατοικιών) ή από προσομοιώσεις, εξετάζοντας κάθε φορά μία συγκεκριμένη θέση τοποθέτησης των Υ.Α.Φ., στην εξωτερική τοιχοποιία κυρίως και σε κάποιες περιπτώσεις στις εσωτερικές τοιχοποιίες ή στην οροφή. Σε καμία περίπτωση όμως δεν υπήρχε μία σαφής ένδειξη, αν και σε κάθε μελέτη φαινόταν ξεκάθαρα η θετική επίδραση των Υ.Α.Φ., για το ποια είναι η βέλτιστη θέση τοποθέτησής τους.

Η παρούσα μελέτη διερευνά τέσσερις διαφορετικές θέσεις εφαρμογής των Υ.Α.Φ., στην οροφή, στην εσωτερική και εξωτερική παρειά της εξωτερικής τοιχοποιίας και στις εσωτερικές τοιχοποιίες. Το ενδεχόμενο τοποθέτησης των Υ.Α.Φ. στον πυρήνα της εξωτερικής τοιχοποιίας αποκλείστηκε αφού τόσο σε υφιστάμενο κτήριο με συστήματα ελαφριάς δόμησης από θερμομονωμένα μεταλλικά πάνελ όσο και σε νεοαναγειρόμενο δεν είναι εφικτή.

Πίνακας 3: Μείωση ψυκτικών φορτίων συναρτήσει της θέσης των Υ.Α.Φ.

Επιφάνεια	Θέση των Υ.Α.Φ. στο χώρο							
	Οροφή		Εξwt. τοιχοποιία-εσωτερική παρειά		Εξwt. τοιχοποιία-εξωτερική παρειά		Εσωτερική τοιχοποιία	
	Δζ %	Δζ	Δζ %	Δζ	Δζ %	Δζ	Δζ %	Δζ
Σύνολο κτηρίου	4,64	3,75	4,17	3,37	1,91	1,54	2,73	2,21

Από τον πίνακα 3, στον οποίο δίνονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων σε σχέση με τη θέση των Υ.Α.Φ., προκύπτει πως η βέλτιστη θέση τοποθέτησης των Υ.Α.Φ. είναι η οροφή έχοντας καλύτερη απόδοση κατά 10 έως 58,9% έναντι των άλλων θέσεων. Κι αυτό συμβαίνει διότι η ικανότητα των Υ.Α.Φ. να απορροφούν, να αποθηκεύουν και να αποδίδουν θερμότητα, και έτσι να μην επιτρέπουν τη έντονη θερμοκρασιακή διακύμανση στο χώρο, εξαρτάται αποκλειστικά και μόνο από τη από τον αέρα του χώρου και τη θερμοκρασία του. Αντίθετα, τοποθετώντας τα Υ.Α.Φ. στην εξωτερική τοιχοποιία επιτρέπουν μεν στο να διατηρηθεί το κέλυφος πιο δροσερό αλλά επηρεάζονται άμεσα από την ηλιακή ακτινοβολία και τις υψηλές θερμοκρασίες του περιβάλλοντος, και δη εκείνα που βρίσκονται στην εξωτερική παρειά, φτάνουν πολύ γρήγορα στο σημείο τήξης τους και παραμένουν στην υγρή φάση για πολύ περισσότερη διάρκεια μειώνοντας έτσι τους κύκλους λειτουργίας τους. Ενώ, τα Υ.Α.Φ. που τοποθετούνται στις εσωτερικές τοιχοποιίες, αν και επηρεάζονται κι αυτά κυρίως από τη θερμοκρασία του αέρα στον χώρο, έχουν μικρότερη απόδοση καθώς οι θερμές αέριες μάζες του χώρου κινούνται προς τα υψηλότερα σημεία θέτοντας με αυτόν τον τρόπο σε λειτουργία τη μάζα των Υ.Α.Φ. που βρίσκονται κυρίως από τη μέση του χώρου και πάνω.

### 3.5. Προσανατολισμός του χώρου και μηνιαία απόδοση των Υ.Α.Φ.

Στον πίνακα 7 δίνεται η ποσοστιαία και η κατά απόλυτη τιμή μείωση των ψυκτικών και θερμικών φορτίων, με Υ.Α.Φ. 29°C και 23°C αντίστοιχα, για κάθε προσανατολισμό με επιφάνεια αναφοράς τις θερμικές ζώνες του 2ου ορόφου, ο οποίος είναι ο πιο προστατευμένος αφού έχει μια μόνο εκτεθειμένη πλευρά, αυτήν της κάθε όψης.

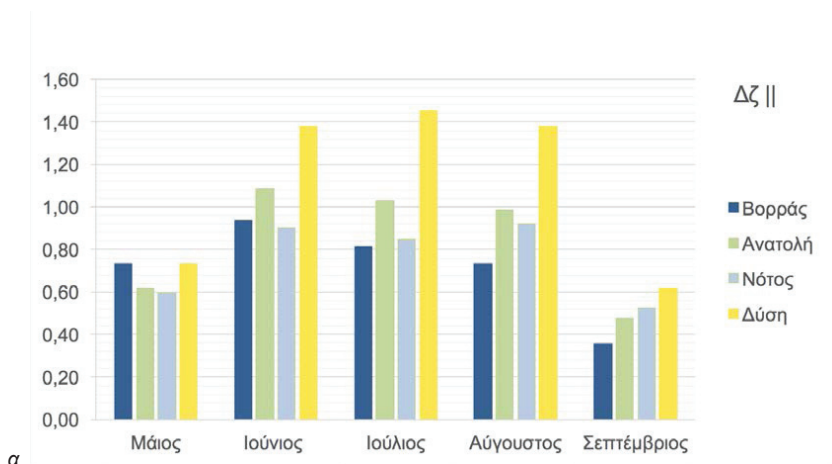
Ο βορινός προσανατολισμός παρουσιάζει τη μέγιστη μείωση των θερμικών φορτίων σε απόλυτη τιμή ενώ ο νότιος προσανατολισμός, που έχει τα περισσότερα ηλιακά κέρδη, επωφελείται λιγότερο από τους άλλους προσανατολισμούς σε απόλυτες τιμές, παρουσιάζει όμως τη μέγιστη ποσοστιαία μείωση των θερμικών φορτίων κατά 9,74%. Ωστόσο, η μείωση των θερμικών φορτίων κατά απόλυτη τιμή κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα για όλους τους προσανατολισμούς και η διαφοροποίηση μεταξύ είναι πολύ μικρή.

Σε σχέση με τα ψυκτικά φορτία, ο δυτικός προσανατολισμός παρουσιάζει την μέγιστη μείωση των φορτίων τόσο σε απόλυτη τιμή όσο και σε ποσοστιαία και ακολουθούν ο νότιος και ο ανατολικός προσανατολισμός. Τη μικρότερη κατά απόλυτη τιμή μείωση την έχει ο βόρειος προσανατολισμός, αφού με μειωμένα τα ηλιακά κέρδη, σε σχέση με τους άλλους προσανατολισμούς, δεν αναπτύχθηκαν οι συνθήκες έτσι ώστε τα Υ.Α.Φ. να καταφέρουν να εκμεταλλευτούν περισσότερο τη δυνατότητα της θερμοχωρητικότητάς τους, ωστόσο έχοντας τις μικρότερες απαιτήσεις για ψύξη εμφανίζει τη δεύτερη μεγαλύτερη μείωση ψυκτικών φορτίων σε ποσοστό. Αντίθετα, στον ανατολικό προσανατολισμό, όπου απαίτηση ψυκτικών φορτίων είναι η μεγαλύτερη, επιτυγχάνεται η μικρότερη ποσοστιαία μείωση των φορτίων καθώς τα Υ.Α.Φ. παραμένουν για περισσότερη χρονική διάρκεια στην υγρή φάση και εκμεταλλεύονται κυρίως την αισθητή θερμοχωρητικότητά τους κι όχι την λανθάνουσα, που είναι και το επιθυμητό.

Πίνακας 7: Μείωση ψυκτικών και θερμικών φορτίων συναρτήσει του προσανατολισμού - θερμικές ζώνες 2ου ορόφου.

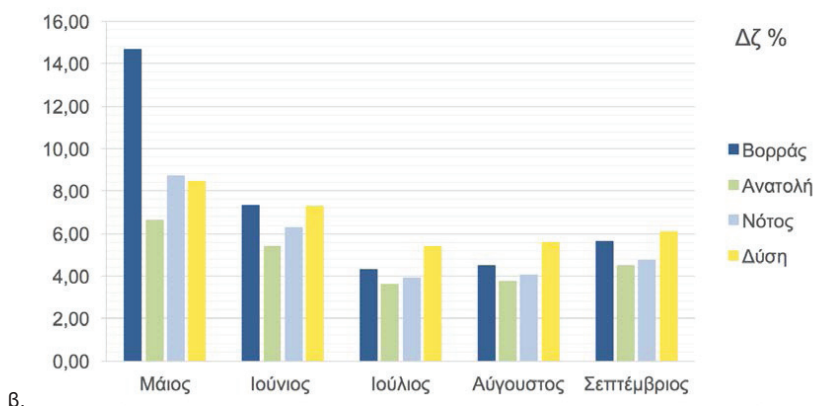
Προσανατολισμός	Ψυκτικά φορτία (KWh/m <sup>2</sup> )		Θερμικά φορτία (KWh/m <sup>2</sup> )	
	Υ.Α.Φ. 29		Υ.Α.Φ. 21	
	Δζ %	Δζ	Δζ %	Δζ
Βορράς	6,02	3,57	4,45	1,04
Ανατολή	4,41	4,20	7,24	0,90
Νότος	4,95	3,79	9,74	0,76
Δύση	6,20	5,56	5,88	0,79
<b>Σύνολο κτηρίου</b>	<b>4,64</b>	<b>3,75</b>	<b>4,72</b>	<b>0,91</b>

Στις εικόνες 4α και 4β δίνεται η μηνιαία μείωση των ψυκτικών φορτίων κατά απόλυτη και ποσοστιαία τιμή αντίστοιχα. Η επίδραση των Υ.Α.Φ. δεν είναι η ίδια για όλους τους μήνες της θερινής περιόδου σε σχέση με τον κάθε χώρο διαφορετικού προσανατολισμού.



α.

Εικόνα 4α: Μηνιαία μείωση των ψυκτικών φορτίων κατά απόλυτη τιμή.



β.

Εικόνα 4β: Μηνιαία ποσοστιαία μείωση των ψυκτικών φορτίων.

Η μέγιστη μείωση των ψυκτικών φορτίων σε απόλυτη τιμή παρουσιάζεται τον Ιούλιο για το δυτικό προσανατολισμό ενώ για τον βορινό, ανατολικό και νότιο προσανατολισμό η μέγιστη μείωση επιτυγχάνεται τον Ιούνιο. Σε ποσοστιαίες τιμές ωστόσο, η μεγαλύτερη μείωση για όλους τους μήνες της θερινής περιόδου εμφανίζεται το Μάιο. Ενώ, τον Ιούλιο υπολογίστηκαν οι μικρότερες μειώσεις και αυτό γιατί πιθανότατα η στερεοποίηση των Υ.Α.Φ. δεν ολοκληρώνεται τόσο συχνά όσο τους άλλους μήνες. Σε κάθε περίπτωση, τους μήνες Ιούνιο, Ιούλιο και Αύγουστο ο δυτικός προσανατολισμός εμφανίζει μεγαλύτερη σε απόλυτες τιμές μείωση των ψυκτικών φορτίων από τους άλλους προσανατολισμούς κατά 32% με 53%.

Τόσο από τον πίνακα 7 όσο και από τις εικόνες 3α και 3β, η απόδοση των Υ.Α.Φ. δεν φαίνεται να είναι πολύ ικανοποιητική αφού η συνεισφορά στη μείωση των θερμικών και ψυκτικών φορτίων είναι σχετικά μικρή τόσο σε ποσοστιαίες όσο και σε απόλυτες τιμές. Ωστόσο, θα πρέπει να συνυπολογιστούν κάποιοι παράγοντες πριν φτάσουμε σε οποιοδήποτε συμπέρασμα.

Όπως υπογραμμίζεται και στην βιβλιογραφία [13], η μετάδοση της θερμότητας από τον αέρα του χώρου προς τα Υ.Α.Φ. και αντίστροφα εξαρτάται από την τιμή του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας από συναγωγή. Στην παρούσα μελέτη, ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας συναγωγής κυμαίνεται από 1,4 έως 1,8W/m<sup>2</sup>·K, όπως υπολογίστηκε από το EnergyPlus ως λειτουργία της θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ του αέρα του χώρου και της επιφάνειας των Υ.Α.Φ. Οι τιμές αυτές δεν είναι αρκετά υψηλές και μπορεί να καθορίζουν τη μείωση της θερμότητας που μεταφέρεται από και προς στα Υ.Α.Φ. περιορίζοντας με αυτόν τον τρόπο την αποδοτικότητα αποθήκευσης θερμότητας.

Επιπλέον, για κάθε τιμή του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας και της θερμοκρασίας του αέρα του χώρου, η ημερήσια ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας των Υ.Α.Φ. εξαρτάται και μπορεί να υπολογιστεί με βάση το σημείο τήξης τους [14]. Η μέγιστη ημερήσια ικανότητα αποθήκευσης συνήθως επιτυγχάνεται όταν το σημείο τήξης είναι ελαφρώς μεγαλύτερο από τη μέση ημερήσια θερμοκρασία του αέρα του χώρου και μεγαλύτερο από την επιφανειακή θερμοκρασία των Υ.Α.Φ. επίσης. Ωστόσο, ακόμα κι αν το Υ.Α.Φ. λειτουργεί με τη βέλτιστη ικανότητα αποθήκευσης, δεν εκμεταλλεύεται εύκολα την λανθάνουσα θερμότητά του πλήρως εάν δεν επιτυγχάνονται μεγάλες τιμές του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας.

Αυτό σημαίνει ότι για την περίπτωση της παρούσας μελέτης, στην οποία η μέση ημερήσια θερμοκρασία της επιφάνειας των Υ.Α.Φ. ήταν γύρω στους 32°C κατά τους θερινούς μήνες, θα έπρεπε ίσως να έχει επιλεγεί Υ.Α.Φ. με υψηλότερο σημείο τήξης και κυρίως να ενισχυθεί ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας στην επιφάνεια των Υ.Α.Φ.

Τα ληφθέντα αποτελέσματα δεν είναι εύκολο να ερμηνευθούν κι αυτό γιατί η απόδοση των Υ.Α.Φ. εξαρτάται από την αλληλεπίδραση πολλών διαφορετικών παραγόντων. Οι κλιματικές συνθήκες (εξωτερική θερμοκρασία, ηλιακή ακτινοβολία, θερμοκρασία του περιβάλλοντος κ.λπ.) είναι ένας σύνθετος παράγοντας. Η θέση, η επιφάνεια και το πάχος του Υ.Α.Φ. καθώς και ο προσανατολισμός επίσης επηρεάζουν την απόδοση των Υ.Α.Φ. Ο συνδυασμός αυτών των παραγόντων (κλιματικές συνθήκες και δομικός σχεδιασμός) καθορίζει τη συνολική ροή θερμότητας διαμέσου των δομικών στοιχείων που ενσωματώνουν τα Υ.Α.Φ., καθορίζει δηλαδή τη θερμοκρασία των Υ.Α.Φ. καθώς και τον κύκλο φόρτισης και αποφόρτισής τους (κύκλος λειτουργίας: απορρόφηση, αποθήκευση και απόδοση πίσω της θερμότητας)

Για το λόγο αυτό, τα αποτελέσματα που αναφέρθηκαν σε σχέση με την ενεργειακή συνεισφορά των Υ.Α.Φ. θα πρέπει να ιδωθούν ως τάσεις με στόχο να δώσουν κατευθύνσεις ως προς το σχεδιασμό κτηρίων, είτε νέων είτε υπό ανακαίνιση, τα οποία θα ενσωματώσουν Υ.Α.Φ. στο κελυφός τους.

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα μελέτη διερευνήθηκε και παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα της ενεργειακής απόδοσης των Υ.Α.Φ. σε κτήρια γραφείων ελαφριάς κατασκευής για την περιοχή της Αθήνας, που αντιστοιχεί στην Β κλιματική περιοχή της Ελλάδας. Για τη διερεύνηση χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό του DesignBuilder με το οποίο υπολογίστηκαν οι απαιτήσεις για τα θερμικά και ψυκτικά φορτία στη διάρκεια του χρόνου.

Η ενεργειακή απόδοση των Υ.Α.Φ. εκτιμήθηκε με βάση το σημείο τήξης τους, το πάχος τους, τη θέση εφαρμογής τους μέσα στο χώρο καθώς και στη μάζα του δομικού στοιχείου (για την εξωτερική τοιχοποιία μόνον) καθώς και από τον προσανατολισμό του κτηρίου.

Από τις προσομοιώσεις προέκυψε ότι:

- για τη χειμερινή περίοδο το βέλτιστο σημείο τήξης είναι οι 21°C ενώ για τη θερινή οι 29°C.
- βέλτιστο πάχος του Υ.Α.Φ. είναι τα 3,71cm ενώ αύξηση του πάχους δε προσθέτει σημαντικά στην ενεργειακή απόδοση των Υ.Α.Φ.
- η εφαρμογή των Υ.Α.Φ. στην οροφή παρουσιάζει έως και 58,9% καλύτερα αποτελέσματα από την εφαρμογή τους στην εξωτερική τοιχοποιία ή στην εσωτερική.
- χωρίς νυχτερινό αερισμό κατά τους θερινούς μήνες η μείωση των ψυκτικών φορτίων είναι μηδαμινή.
- για τους χειμερινούς μήνες η μείωση των θερμικών φορτίων είναι ελάχιστη σε απόλυτες τιμές και παρουσιάζεται ως μέγιστη στο βόρειο προσανατολισμό, ενώ ως ποσοστό η βέλτιστη μείωση επιτυγχάνεται στο νότιο προσανατολισμό.

- για τους θερινούς μήνες, η ποσοστιαία μείωση των ψυκτικών φορτίων είναι η βέλτιστη στο δυτικό προσανατολισμό και ακολουθούν ο βόρειος, ο νότιος και ο ανατολικός προσανατολισμός.
- η μέγιστη μείωση των ψυκτικών φορτίων σε απόλυτη τιμή παρουσιάζεται τον Ιούλιο για το δυτικό προσανατολισμό ενώ για τον βορινό, ανατολικό και νότιο προσανατολισμό η μέγιστη μείωση παρουσιάζεται τον Ιούνιο.
- αντίθετα, η μέγιστη ποσοστιαία μείωση των ψυκτικών φορτίων επιτυγχάνεται τον Μάιο για κάθε προσανατολισμό και η ελάχιστη τον Ιούλιο.

Η βελτιστοποίηση της χρήσης των υλικών αλλαγής φάσης στα κτήρια για τη μείωση των ενεργειακών απαιτήσεων είναι δύσκολο να εκτιμηθεί σε ετήσια βάση. Η βελτιστοποίηση αυτή συνδέεται άμεσα με τις κλιματικές συνθήκες, τη χρήση του κτηρίου και τις ιδιότητες του υλικού αλλαγής φάσης. Από τα αποτελέσματα της διερεύνησης, η παρούσα μελέτη επιχειρεί να δώσει κατευθύνσεις για την επιλογή του κατάλληλου υλικού αλλαγής φάσης προκειμένου να επιτευχθεί μείωση των ενεργειακών απαιτήσεων.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Evola G, Marletta L, Sicurella F. A methodology for investigating the effectiveness of PCM wallboards for summer thermal comfort in buildings. *Build Environ* 2013;59:517–27.
- [2] Mi X., Liu R., Cui H., Memon Sh., Xing F., Lo Y. Energy and economic analysis of building integrated with PCM in different cities of China, *Appl. Energy* 175 (2016) 324-336.
- [3] R. Vicente, T. Silva, Brick masonry walls with PCM macrocapsules: an experimental approach, *Appl. Therm. Eng.* 67 (2014) 24–34.
- [4] D. Zhou, G.S.F. Shire, Y. Tian, Parametric analysis of influencing factors in Phase Change Material Wallboard (PCMW), *Appl. Energy* 119 (2014) 33–42.
- [5] Jin X., Medina M.A., Zhang X. Numerical analysis for the optimal location of a thin PCM layer in frame walls, *Appl. Therm. Energy* 103 (2016) 1057-1063
- [6] Ascione F., Bianco N., De Masi R.F., De Rossi F., Vanoli G. P. Energy refurbishment of existing buildings through the use of phase change materials: Energy savings and indoor comfort in the cooling season, *Appl. Energy* 113 (2014) 990-1007.
- [7] Castell A, Martorell I, Medrano M, Pérez G, Cabeza LF. Experimental study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling. *Energy Build* 2010;42:534–40.
- [8] Hasse C, Grenet M, Bontemps A, Dendievel R, Sallée H. Realization, test and modelling of honeycomb wallboards containing a phase change material. *Energy Build* 2011;43:232e8.
- [9] Na Zhu, Pengpeng Liu, Pingfang Hu, Fuli Liu, Zhangning Jiang. Modeling and simulation on the performance of a novel double shape-stabilized phase change materials wallboard. *Energy and Buildings* 107 (2015) 181–190
- [10] Markus Koschenz, Beat Lehmann. Development of a thermally activated ceiling panel with PCM for application in lightweight and retrofitted buildings. *Energy and Buildings* 36 (2004) 567-578
- [11] A. Karaoulis. Investigation of Energy Performance in Conventional and Lightweight Building Components with the use of Phase Change Materials (PCMS): Energy Savings in Summer Season, *Procedia Environmental Sciences*, Volume 38, 2017, Pages 796-803
- [12] P. Tabares-Velasco, C. Christensen, M. Bianchi. Verification and validation of EnergyPlus phase change material model for opaque wall assemblies, *Building and Environment* 54 (2012) 186e196
- [13] Liu H, Awbi HB. Performance of phase change materials boards under natural convection. *Build Environ* 2009; 44:1788e93.
- [14] Neepser DA. Thermal dynamics of wallboard with latent heat storage. *Sol Energy* 2000;68:393e403.
- [15] <https://www.phasechange.com/applications>

## ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΑΝΕΣΗΣ & ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΣΕ ΚΤΙΡΙΑ ΓΡΑΦΕΙΩΝ

Παναγιώτα Αντωνιάδου<sup>1\*</sup>, Δημήτριος Καραθάνας<sup>1</sup>, Άγις Μ. Παπαδόπουλος<sup>1</sup>

<sup>1\*</sup> Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, ΑΠΘ

e-mail: [pantoniadou@auth.gr](mailto:pantoniadou@auth.gr)

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ανάγκη βελτίωσης των εσωκλιματικών συνθηκών, χωρίς όμως την ενεργειακή επιβάρυνση των κατασκευών, είναι πλέον αδήριτη. Όπως περιγράφεται από το ισχύον εθνικό και ευρωπαϊκό νομοθετικό πλαίσιο, τα επίπεδα κατανάλωσης των κτιριακών κατασκευών, αντιστοιχώντας στο 38.1% της τελικής κατανάλωσης ενέργειας, πρέπει να μειωθούν. Στο πλαίσιο αυτό, πλήθος μέτρων και πολιτικών οφείλουν να εφαρμοστούν εστιάζοντας τόσο στην βελτίωση του ενεργειακού προφίλ των κατασκευών όσο και στην διατήρηση ή ακόμα και βελτίωση των συνθηκών άνεσης των χρηστών τους.

Οι άνθρωποι περνούν, ανάλογα με την χώρα, το 60-90% της ζωής τους, εντός του δομημένου περιβάλλοντος, οπότε η διασφάλιση υψηλών επιπέδων άνεσης και υγιεινής τους, αποτελεί στόχο μείζονος σημασίας. Ιδιαίτερο δε ενδιαφέρον σημειώνεται στις περιπτώσεις κτιρίων γραφείων. Η κατηγορία αυτή είναι η δεύτερη μεταξύ των κτιρίων του τριτογενούς τομέα και σε αυτή, οι χρήστες περνούν τουλάχιστον το ένα τρίτο της ημέρας τους. Κρίνεται, λοιπόν, αναγκαίος ο καθορισμός των εξατομικευμένων παραμέτρων και συνθηκών που επηρεάζουν την άνεση των χρηστών.

Στο πλαίσιο αυτό, διεξήχθη η συγκεκριμένη έρευνα, έχοντας ως στόχο, την ολοκληρωμένη αξιολόγηση των συνθηκών άνεσης και φυσικού αερισμού ενός κτιρίου γραφείων στην περιοχή της Θεσσαλονίκης. Αναλυτικότερα, το υπό αξιολόγηση κτίριο είναι ένα κτίριο γραφείων που βρίσκεται στην περιοχή του Πανοράματος και στεγάζει το Δημαρχείο του Δήμου Πυλαίας-Χορτιάτη. Το κτίριο αυτό κατασκευάστηκε το 2002 και είναι σύμφωνο με τον τότε ισχύοντα εθνικό κανονισμό θερμομόνωσης.

Η ολοκληρωμένη αξιολόγηση εσωκλιματικών συνθηκών άνεσης και αερισμού, πραγματοποιήθηκε κατά τη χειμερινή περίοδο του 2016, μέσω επιτόπιων μετρήσεων, έρευνας ερωτηματολογίου και με τη χρήση του προσομοιωτικού εργαλείου DIAL+. Συγκεκριμένα, προσδιορίστηκε πλήθος θερμοφυσικών παραμέτρων του εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος, με τη χρήση κατάλληλου εργαστηριακού εξοπλισμού, ενώ μέσω των ποιοτικών δεδομένων, προσδιορίστηκαν στατιστικώς σημαντικοί συσχετισμοί, οι οποίοι κατέδειξαν το σύνολο των παραμέτρων που επηρεάζουν την αντίληψη άνεσης και ποιότητας αέρας των χρηστών.

Διαπιστώνεται, λοιπόν, πως η ολοκληρωμένη αξιολόγηση εσωκλιματικών συνθηκών μπορεί να συμβάλει καθοριστικά τόσο στη βελτίωση των συνθηκών άνεσης άμεσα από τους χρήστες όσο και στην ενημέρωση των ιδύνωντων για το σύνολο των άμεσα και έμμεσα προσδιορίσιμων παραμέτρων που μπορεί να επηρεάσουν τις συνθήκες άνεσης των χρηστών.

**Λέξεις Κλειδιά:** Εσωκλιματικές συνθήκες, μεσογειακό κλίμα, κτίρια γραφείων, συνθήκες άνεσης, φυσικός αερισμός

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διατήρηση και ανάπτυξη βέλτιστων συνθηκών άνεσης και υγιεινής των εργαζομένων σε χώρους γραφείων, αποτελεί παράγοντα μείζονος σημασίας για τον σχεδιασμό και τη λειτουργία μιας κατασκευής. Ιδιαίτερη βαρύτητα δίνεται στην παράμετρο της υγείας και ευεξίας των χρηστών, με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας να ορίζει την υγεία ως τη συνθήκη πλήρους σωματικής, πνευματικής και κοινωνικής ευεξίας και όχι μόνο ως την απουσία ασθένειας ή κάποιας αναπηρίας [1].

Μέσα από τη διασφάλιση υψηλών επιπέδων υγιεινής των χώρων, επιτυγχάνεται η διατήρηση βέλτιστων συνθηκών άνεσης, ενώ παράλληλα προάγεται η παραγωγικότητα των ίδιων των χρηστών. Όπως αναφέρεται και στο διεθνές πρότυπο ISO 7730, η άνεση των χρηστών είναι άμεσα συνδεδεμένη με την παραγωγικότητα και την υγιεινή των εργαζομένων [2]. Η άνεση αποτελεί μια πολυδιάστατη παράμετρο η οποία διακρίνεται σε τέσσερις κύριους πυλώνες, τη θερμική, τη ακουστική και οπτική άνεση και την ποιότητα αέρα [3].

Για τον προσδιορισμό της θερμικής άνεσης έχει αναπτυχθεί από τον Fanger ο δείκτης PMV, μέσω του οποίου επιτυγχάνεται η ποσοτικοποίηση αυτού του τόσο υποκειμενικού και έμμεσα προσδιορίσιμου μεγέθους [4]. Εκτός από την παράμετρο της θερμικής άνεσης, η ποιότητα αέρα αποτελεί μια εξίσου σημαντική και ευρέως αξιολογούμενη πτυχή της άνεσης, η οποία προσδιορίζεται μέσα από ποιοτικούς και ποσοτικούς δείκτες. Για την διασφάλιση της ποιότητα αέρα παράμετροι όπως ο αερισμός επηρεάζουν σημαντικά τις εσωτερικές συνθήκες και μπορούν να βελτιώσουν τα επίπεδα άνεσης χωρίς να επιβαρύνουν ενεργειακά μια κατασκευή [5,6]. Ένας εκ των αντιπροσωπευτικότερων ποσοτικών δεικτών, είναι το επίπεδο συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>). Σύμφωνα με το διεθνές πρότυπο ASHRAE 62.1:2013, τα αποδεκτά επίπεδα συγκέντρωσης CO<sub>2</sub> πρέπει να αντιστοιχούν σε 700 ppm άνω των εξωτερικών επιπέδων συγκέντρωσης CO<sub>2</sub>, τα οποία κυμαίνονται στα 300 με 500 ppm. Επίπεδα συγκέντρωσης CO<sub>2</sub> που ξεπερνούν τις 5000 ppm, χαρακτηρίζονται ως επικίνδυνα για την υγεία των χρηστών του χώρου [7].

Εκτός όμως από τον προσδιορισμό των ποσοτικών δεικτών για τον προσδιορισμό των επιπέδων άνεσης, για τον ολοκληρωμένο προσδιορισμό της παραμέτρου λαμβάνεται υπόψη η εξατομικευμένη άποψη και αντίληψη του χρήστη [8–10]. Για τον συνυπολογισμό της εξατομικευμένης αυτής παραμέτρου στον της θερμικής άνεσης, έχουν πραγματοποιηθεί πλήθος μελετών την τελευταία δεκαετία. Οι μελέτες αυτές εστιάζουν τόσο σε κτίρια γραφείων όσο και κατοικιών, με ιδιαίτερη βαρύτητα να δίνεται στις περιπτώσεις κτιρίων γραφείων, όπου οι χρήστες περνούν σημαντικό διάστημα της καθημερινότητάς τους (60-90%) [11,12].

Επιπλέον, πρέπει να συνυπολογιστεί η ενεργειακή επάρκεια της κατασκευής, λαμβάνοντας υπόψη τα μέτρα που θα εφαρμοστούν για τη βελτίωση των συνθηκών άνεσης. Ο κτιριακός τομέας, σύμφωνα με τη Eurostat, είναι υπεύθυνος για το 38% της κατανάλωσης ενέργειας, όποτε τα μέτρα που θα εφαρμοστούν προς την κατεύθυνση αυτή, θα πρέπει να μην επιβαρύνουν περαιτέρω την κατασκευή [13]. Στο πλαίσιο αυτό, πλήθος ερευνών έχουν εστιάσει στην αξιοποίηση του αερισμού είτε φυσικού είτε μηχανικού, ως μέσο βελτίωσης της ποιότητας αέρα και των συνθηκών άνεσης των χρηστών αλλά και παράλληλα, την έμμεση μείωση της κατανάλωσης ενέργειας η οποία καταγράφεται με την αλόγιστη χρήση των ηλεκτρομηχανολογικών συστημάτων.

Λαμβάνοντας υπόψη το σύνολο των παραμέτρων αυτών, διεξήχθη η συγκεκριμένη έρευνα, έχοντας ως στόχο, την ολοκληρωμένη αξιολόγηση των συνθηκών άνεσης και αερισμού ενός κτιρίου γραφείων στην περιοχή της Θεσσαλονίκης. Αναλυτικότερα, πραγματοποιήθηκαν τόσο ποιοτικές όσο και ποσοτικές αναλύσεις πεδίου καθώς και προσομοιώσεις με τη χρήση του προσομοιωτικού εργαλείου DIAL+, αξιολογώντας τις επικρατούσες συνθήκες και καταδεικνύοντας εν τέλει, το σύνολο των παραμέτρων που επηρεάζουν την αντίληψη άνεσης και ποιότητας αέρας των χρηστών.

Καταληκτικά, η ολοκληρωμένη και σε βάθος αξιολόγηση των εσωκλιματικών συνθηκών αποτελεί μια ιδιαίτερα πολύπλοκη και πολυπαραμετρική διαδικασία, της οποίας τα συμπεράσματα μπορεί να συμβάλουν καθοριστικά στον προσδιορισμό των παραμέτρων που μπορούν να βελτιώσουν τα επίπεδα άνεσης. Έτσι, δίνεται η δυνατότητα συλλογής και αξιολόγησης επιπλέον πληροφοριών και καλύτερης και σε βάθος ερμηνείας έμμεσα προσδιορίσιμων στοιχείων που συμβάλλουν καθοριστικά στην ανάπτυξη των κτιρίων σχεδόν μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης διατηρώντας, παράλληλα υψηλά επίπεδα άνεσης χρηστών.

## 2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης έρευνας πραγματοποιήθηκε ολοκληρωμένη αξιολόγηση εσωκλιματικών συνθηκών εστιάζοντας στις συνθήκες άνεσης και ιδιαίτερα στον αερισμό σε περιπτώσεις κτιρίων γραφείων. Για την επίτευξη των στόχων αυτών, η μεθοδολογική προσέγγιση που ακολουθείται, διακρίνεται σε δύο κύριους άξονες, την πραγματοποίηση επιτόπιων μετρήσεων εσωκλιματικών συνθηκών και παράλληλα καταγραφή των έμμεσα προσδιορίσιμων εξατομικευμένων χαρακτηριστικών.

Αναλυτικότερα, σε ότι αφορά τις επικρατούσες περιβαλλοντικές συνθήκες, για την επίτευξη βέλτιστης καταγραφής, κρίθηκε απαραίτητος ο προσδιορισμός θερμοφυσικών παραμέτρων. Εκτός, όμως, από την διεξαγωγή μετρήσεων πεδίου, στο πλαίσιο της έρευνας, κρίνεται αναγκαία η καταγραφή των εξατομικευμένων αναγκών των χρηστών του, ώστε να προσδιοριστούν και πιθανές έμμεσες παράμετροι που επιδρούν στην άνεση των χρηστών. Τέλος, παράλληλα με την αξιολόγηση των επικρατούντων συνθηκών για την επίτευξη ολοκληρωμένης αξιολόγησης, έγινε χρήση εργαλείων προσομοίωσης εσωκλιματικών συνθηκών.

Στόχοι της μεθοδολογικής αυτής προσέγγισης είναι: (α) η αξιολόγηση των εσωκλιματικών συνθηκών και ιδιαίτερα των στοιχείων άνεσης και ποιότητας αέρα στο χώρο εργασίας λαμβάνοντας υπόψη τόσο θερμοφυσικές παραμέτρους όσο και εξατομικευμένες ανάγκες των χρηστών, (β) ο προσδιορισμός των έμμεσα μετρήσιμων εξατομικευμένων παραμέτρων που επιδρούν στις συνθήκες αυτές και (γ) η αξιολόγηση αποτελεσματικότητας χρήσης του λογισμικού DIAL+ στον προσδιορισμό των παραμέτρων άνεσης και ποιότητας αέρα, όπως εξετάζονται στο πλαίσιο της έρευνας.

Το μεθοδολογικό αυτό πλαίσιο, εφαρμόστηκε στο Δημαρχείο του Δήμου Πυλαίας-Χορτιάτη, το οποίο βρίσκεται στην περιοχή του Πανοράματος, Θεσσαλονίκης. Οι κλιματικές συνθήκες που χαρακτηρίζουν την περιοχή αντιστοιχούν στην τρίτη ψυχρότερη κλιματική ζώνη, σύμφωνα με τον ισχύοντα εθνικό κανονισμό, και το κλίμα χαρακτηρίζεται ως μεσογειακό [14,15].

### 2.1. Χαρακτηριστικά Κτιρίου

Το κτίριο είναι σύγχρονη κατασκευή του 2002, η οποία είναι σύμφωνη τις απαιτήσεις του πρώτου ελληνικού κανονισμού θερμομόνωσης κτιρίων [16]. Η κατασκευή αποτελείται από δύο όγκους κτιρίων που ενώνονται με εξωτερικό προστατευμένο διάδρομο. Το σύνολο των κτιρίων χρησιμοποιούνται ως χώροι γραφείων, με το ανατολικό κτίριο να περιλαμβάνει λιγότερους χώρους γραφείων και κατά κύριο λόγο αίθουσες συνεδριάσεων και αίθουσες δραστηριοτήτων των δημοτών.

Όσον αφορά τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του συγκροτήματος, το σύνολο των κτιρίων που απαρτίζουν την κατασκευή είναι πανταχόθεν ελεύθερα, έχοντας ανοίγματα σε όλες τις όψεις τους. Τα κουφώματα της κατασκευής είναι συρόμενα, πλαίσια αλουμινίου, με διπλούς υαλοπίνακες και εσωτερικές περσίδες. Στο δυτικό κτίσμα υπάρχει σε τμήμα του κοινόχρηστου χώρου γυάλινη οροφή στην οποία έχουν εγκατασταθεί εξωτερικές περσίδες. Το σύνολο των μέτρων αυτών, έχουν εφαρμοστεί στο πλαίσιο σωστής διαχείρισης του φυσικού φωτισμού και μείωσης πιθανών συνθηκών θάμβωσης των χρηστών από τις εξωτερικές περιβαλλοντικές συνθήκες. Επιπροσθέτως, το πλήθος, η θέση και οι διαστάσεις των ανοιγμάτων είναι τέτοια, ώστε να διασφαλίζεται επαρκής φωτισμός και αερισμός των χώρων.

Αναφορικά με τα ηλεκτρομηχανολογικά συστήματα της κατασκευής, τόσο για τη θέρμανση όσο και τη ψύξη υπάρχει εγκατεστημένο κεντρικό σύστημα κλιματισμού με χρήση φυσικού αερίου, με διπλό σύστημα αγωγού για την κυκλοφορία ζεστού και ψυχρού αέρα, αντίστοιχα. Το σύστημα θέρμανσης λειτουργεί από τις 6:00π.μ. έως τις 4:00μ.μ. Αυτό το σύστημα αγωγών χρησιμοποιείται και για τον αερισμό του κτιρίου. Εκτός από τον τεχνητό αερισμό, πραγματοποιείται και φυσικός αερισμός ιδιαίτερα κατά την φθινοπωρινή και εαρινή περίοδο. Τέλος, ως προς τον τεχνητό φωτισμό, στο σύνολο της κατασκευής υπάρχουν εγκατεστημένοι λαμπτήρες φθορισμού με φωτιστικά με ανακλαστήρες και διαχυτές.

### 2.2. Ανάλυση Εσωκλιματικών Συνθηκών

Η διεξαχθείσα ανάλυση εστιάζει στην αξιολόγηση των εσωκλιματικών συνθηκών και στην επίδραση του αερισμού στο αίσθημα άνεσης. Για την ολοκληρωμένη αξιολόγηση, πραγματοποιήθηκαν τόσο μετρήσεις πεδίου, για τον προσδιορισμό άμεσα και έμμεσα μετρούμενων παραμέτρων, όσο και προσομοιώσεις χώρων με τη χρήση του λογισμικού DIAL+, ώστε να πραγματοποιηθεί ολοκληρωμένη αξιολόγηση των χώρων.

Το σύνολο των επιτόπιων μετρήσεων και προσομοιώσεων, πραγματοποιήθηκαν σε αντιπροσωπευτικούς χώρους της κατασκευής, οι οποίοι επιλέχθηκαν βάση της χρήσης τους και των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών τους, όπως παρουσιάζονται στις κατόψεις. Το σύνολο των χώρων καθώς και το πλήθος εργαζομένων ανά γραφείο, παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Χώροι γραφείων υλοποίησης επιτόπιων μετρήσεων.

Γραφείο	Χαρακτηριστικά Χώρων Υπό Αξιολόγηση	
	Θέση	Πλήθος Εργαζομένων
Γραφείο 1	Ενδιάμεσο, 1 <sup>ου</sup> ορόφου, ΒΑ, Κτίριο 1	5
Γραφείο 2	Γωνιακό, 1 <sup>ου</sup> ορόφου, ΝΑ-ΝΔ, Κτίριο 1	5
Γραφείο 3	Γωνιακό, 1 <sup>ου</sup> ορόφου, ΒΑ-ΝΑ, Κτίριο 2	4
Γραφείο 4	Ενδιάμεσο, 1 <sup>ου</sup> ορόφου, ΝΔ, Κτίριο 2	2
Γραφείο 5	Γωνιακό, ισογείου, ΒΑ-ΝΑ, Κτίριο 2	4
Γραφείο 6	Ενδιάμεσο, ισογείου, ΒΑ, Κτίριο 2	4
Γραφείο 7	Ενδιάμεσο, ισογείου, ΝΔ, Κτίριο 2	4
Γραφείο 8	Ενδιάμεσο, υπογείου, ΝΔ, Κτίριο 2	2

### 2.2.1. Μετρήσεις Πεδίου

Κατά την διεξαγωγή μετρήσεων πεδίου, προσδιορίστηκαν άμεσα και έμμεσα μετρούμενες παράμετροι. Αναλυτικότερα, προσδιορίστηκε πλήθος θερμοφυσικών παραμέτρων εσωκλιματικών (θερμοκρασία και σχετική υγρασία αέρα, ταχύτητα ανέμου, φωτεινότητας και συγκέντρωση CO<sub>2</sub>) και εξωκλιματικών συνθηκών καθώς και οι δείκτες θερμικής άνεσης. Το σύνολο των παραμέτρων αυτών, προσδιορίστηκε με τη χρήση εξειδικευμένου εργαστηριακού εξοπλισμού για την περίπτωση των εσωκλιματικών συνθηκών που παρουσιάζεται στον Πίνακα 2, ενώ οι εξωτερικές συνθήκες προσδιορίστηκαν με την εγκατάσταση στην περιοχή φορητού μετεωρολογικού σταθμού (HOBO U 30) σε ιστό 5 μέτρων.

Πίνακας 2: Εργαστηριακός εξοπλισμός προσδιορισμού εσωκλιματικών συνθηκών [12].

Εξοπλισμός	Προσδιορίσιμες Παράμετροι	Εύρος
HOBO UX 100-003	Αισθητήρας καταγραφής θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας αέρα στο εσωτερικό περιβάλλον	-20°C έως 70°C 15% έως 95% RH
Testo 540	Αισθητήρας καταγραφής φωτεινότητας σε χώρους γραφείων	0 έως 99999 Lux
Testo 480 με αισθητήρες Άνεσης, Εσωκλιματικών συνθηκών και θερμόμετρο σφαιρικού δοχείου	Μετρητικό προσδιορισμού εσωκλιματικών συνθηκών: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Θερμοκρασία αέρα</li> <li>• Σχετική υγρασία αέρα</li> <li>• Ακτινοβολούμενη θερμοκρασία</li> <li>• Ταχύτητα ανέμου</li> <li>• Συγκέντρωση CO<sub>2</sub></li> <li>• Δείκτες PMV/PPD σύμφωνα με τον αλγόριθμο του ISO 7730</li> </ul>	0 έως 50°C 0 έως 100% RH 0 έως +120°C 0 έως +5m/s 0 έως 10000 ppm -3 έως +3

Το σύνολο των μετρήσεων, διεξήχθησαν την χειμερινή περίοδο του 2016 και διήρκεσαν μια εβδομάδα. Η τοποθέτηση των αισθητήρων, το διάστημα μέτρησης καθώς και η συχνότητα καταγραφής τους είναι σύμφωνη με τις αρχές που περιγράφονται από το διεθνές πρότυπο ISO 7726 [17]. Ο εργαστηριακός εξοπλισμός τοποθετήθηκε στο σύνολο των χώρων που περιγράφονται στον Πίνακα 2. Στο σύνολο των χώρων αυτών, προσδιορίστηκαν τα επίπεδα θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας αέρα, ενώ μόνο στο Γραφείο 7 πραγματοποιήθηκε καταγραφή των επιπέδων συγκέντρωσης CO<sub>2</sub> και των δεικτών άνεσης (PMV/PPD).

Εκτός, όμως, από τις άμεσα μετρούμενες παραμέτρους, προσδιορίστηκαν και έμμεσα μετρούμενα δεδομένα. Το σύνολο των δεδομένων αυτών, συλλέχθηκαν μέσα από την διεξαγωγή έρευνας ερωτηματολογίου. Η μεθοδολογική αυτή προσέγγιση, εφαρμόζεται ευρέως και είναι ιδιαίτερα ελπιδοφόρα, καθώς δίνει τη δυνατότητα προσδιορισμού των παραμέτρων που πρέπει να ληφθούν υπόψη, συμβάλλοντας ακόμα και στην αναδιαμόρφωση του τρόπου προσέγγισης της φάσης σχεδιασμού. Η συνθήκη αυτή, αποτελεί απόρροια της δυνατότητας προσδιορισμού των έμμεσα προσδιορισίμων παραμέτρων [18,19]. Για τον προσδιορισμό του συνόλου των παραμέτρων που επηρεάζουν την αντίληψη άνεσης και ποιότητας αέρας των χρηστών, το μεθοδολογικό πλαίσιο που ακολουθείται για την διεξαγωγή της έρευνας ερωτηματολογίου και την καταγραφή των εξατομικευμένων αναγκών των χρηστών, διακρίνεται σε τέσσερις βασικούς άξονες: (α) την αξιολόγηση των παραμέτρων, (β) τον προσδιορισμό τους μέσω ερωτηματολογίων, (γ) τη συλλογή δεδομένων και (δ) την ανάλυσή τους.

### 2.2.2. Χρήση Προσομοιωτικού Εργαλείου

Παράλληλα με την διεξαγωγή επιτόπιων μετρήσεων, κρίθηκε σκόπιμη και η προσομοίωση των χώρων με το Dial+. Το λογισμικό αυτό, είναι ένα πρόγραμμα που περιλαμβάνει 4 μοντέλα προσομοίωσης και επιτρέπει την εκτίμηση της απόδοσης φυσικού φωτισμού, τεχνητού φωτισμού, τη θερμική συμπεριφορά και την απόδοση του φυσικού αερισμού κάθε χώρου που εισάγεται στο πρόγραμμα. Τα μοντέλα προσομοίωσης που ακολουθεί, είναι:

DIAL+Lighting	Φυσικός Φωτισμός
DIAL+Artificial	Τεχνητός Φωτισμός
DIAL+Cooling	Θερμική Συμπεριφορά
DIAL+Ventilation	Φυσικός Αερισμός

Ειδικότερα, για τη διενέργεια των προσομοιώσεων τα στοιχεία που εισάγονται στο πρόγραμμα σχετίζονται με 7 κύριους πυλώνες: (α) τα αδιαφανή δομικά στοιχεία, (β) τα στοιχεία εξωτερικού περιβάλλοντος, (γ) τα διαφανή στοιχεία σε κατακόρυφες και οριζόντιες επιφάνειες, (δ) τα εσωτερικά στοιχεία του χώρου, (ε) οι παράμετροι φυσικού και τεχνητού φωτισμού, (στ) οι παράμετροι θερμικής επάρκειας, (η) οι παράμετροι αερισμού.

## 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Οι εσωτερικές περιβαλλοντικές συνθήκες είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με την άνεση, την υγεία και την παραγωγικότητα των χρηστών. Για την διατήρηση και την διασφάλιση υψηλών επιπέδων άνεσης κρίνεται αναγκαία η διατήρηση σταθερών εσωκλιματικών συνθηκών χωρίς την καταγραφή έντονων μεταβολών.

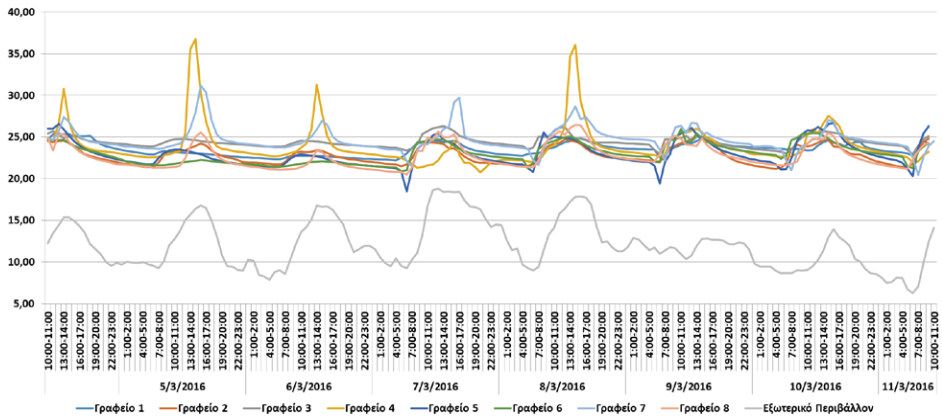
### 3.1.1. Μετρήσεις Πεδίου

#### 3.1.1.1 Εσωκλιματικές Συνθήκες

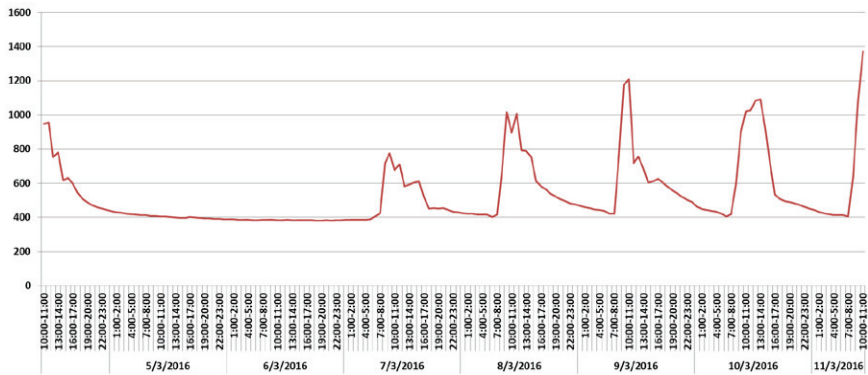
Για τον προσδιορισμό των εσωκλιματικών συνθηκών, κρίνεται απαραίτητος ο προσδιορισμός πλήθους θερμοφυσικών παραμέτρων, όπως τα επίπεδα θερμοκρασίας, CO<sub>2</sub> και φωτεινότητας, ενώ για τον προσδιορισμό των επιπέδων άνεσης, οι δείκτες PMV/PPD είναι οι αντιπροσωπευτικότεροι. Στο πλαίσιο αυτό, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις εσωκλιματικών συνθηκών από τις 4/3/2016 μέχρι τις 11/3/2016.

Τα επίπεδα θερμοκρασίας, προσδιορίστηκαν στο σύνολο των υπό ανάλυση χώρων και στην Εικόνα 1 καταγράφονται οι διακυμάνσεις που σημειώθηκαν. Όπως προκύπτει από τα στοιχεία που συλλέχθηκαν, οι εσωτερικές θερμοκρασίες κυμαίνονται από τους 20°C μέχρι τους 25°C την περίοδο χρήσης των χώρων, ενώ στη διάρκεια που το κτίριο δεν λειτουργεί, το εύρος τιμών είναι μεγαλύτερο, και στις περιπτώσεις των χώρων με νοτιοδυτικό προσανατολισμό ιδιαίτερα κατά τις μεσημβρινές περιόδους, καταγράφονται υψηλές θερμοκρασίες. Τα επίπεδα θερμοκρασίας, όπως αυτά προέκυψαν από τις μετρήσεις, καταδεικνύουν πως σημειώνονται επιθυμητές συνθήκες άνεσης εντός του χώρου.

Ακολούθως, τα επίπεδα συγκέντρωσης CO<sub>2</sub> προσδιορίστηκαν, ως δείκτης ποιότητας αέρα του χώρου. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της Εικόνας 2, τα επίπεδα CO<sub>2</sub> κυμαίνονται από 400 ppm μέχρι 1000ppm, σημειώνοντας όμως για μεμονωμένη στιγμή επίπεδα συγκέντρωσης 1200ppm. Τα εύρη αυτά των τιμών αντιστοιχούν, σε ικανοποιητικές εσωκλιματικές συνθήκες που καταδεικνύουν επιθυμητές συνθήκες ποιότητας αέρα, όπως προκύπτει από το διεθνές πρότυπο ASHRAE 62.1 [7].



Εικόνα 1: Διακυμάνσεις θερμοκρασίας αέρα στο εσωτερικό των υπό ανάλυση χώρων.



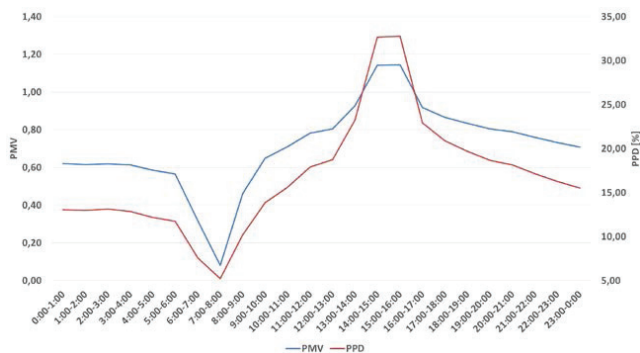
Εικόνα 2: Διακύμανση επιπέδων CO<sub>2</sub> του Γραφείου 7.

Πίνακας 3: Αποτελέσματα μετρήσεων φωτεινότητας εκάστοτε χώρου.

Γραφείο	1η Μέτρηση	2η Μέτρηση
Γραφείο 1	340	520
Γραφείο 2	735	418
Γραφείο 3	555	572
Γραφείο 4	405	1480
Γραφείο 5	550	570
Γραφείο 6	517	601
Γραφείο 7	206	245
Γραφείο 8	450	535

Επιπροσθέτως, τα επίπεδα φωτεινότητας αξιολογήθηκαν. Για την εξαγωγή των δεδομένων φωτεινότητας πραγματοποιήθηκαν 2 μετρήσεις για κάθε χώρο, σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, την ίδια μέρα (9/3/2016), με την πρώτη να πραγματοποιείται την πρωινή και τη δεύτερη την μεσημβρινή περίοδο. Στον Πίνακα 3 καταγράφονται οι διάφορες τιμές για τον κάθε χώρο. Λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις του EN 12464-1/2011, τα επίπεδα φωτεινότητας σε χώρους γραφείων πρέπει να κυμαίνονται από 200 έως 750 lux [20]. Όπως προκύπτει από τον πίνακα οι τιμές βρίσκονται εντός των αποδεκτών ορίων, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως αυτή του Γραφείου 4, τα επίπεδα φωτεινότητας αγγίζουν υψηλά επίπεδα χωρίς όμως να προκαλούν προβλήματα στους εργαζομένους.

Για την περιγραφή των επιπέδων θερμικής άνεσης όπως ορίζεται και από το διεθνές πρότυπο 7730, κρίνεται απαραίτητος ο προσδιορισμός των δεικτών PMV και PPD, οι οποίοι εκφράζουν αντίστοιχα, το επίπεδο θερμικής άνεσης και το ποσοστό δυσαρεστημένων για τις αντίστοιχες συνθήκες [2]. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην Εικόνα 3, ο δείκτης PMV για το διάστημα παραμονής των χρηστών στο χώρο (7.00-16.00) καταγράφει συνεχώς ανοδική πορεία με τη μέγιστη τιμή να καταγράφεται τις μεσημβρινές. Το εύρος τιμών του δείκτη κυμαίνεται από 0 μέχρι 1,10 τιμές αποδεκτές για το συνολικό διάστημα λειτουργίας του χώρου. Το εύρος αυτό διακύμανσης του δείκτη αντιστοιχεί σε χαμηλά επίπεδα μη ικανοποιημένων χρηστών, καθώς δεν ξεπερνούν το 30%.



Εικόνα 3: Διακύμανση δεικτών PMV και PPD μιας τυπικής ημέρας (10/03/2016).

### 3.1.1.2 Εξατομικευμένη Αξιολόγηση Συνθηκών

Για την ολοκληρωμένη αξιολόγηση των επικρατούσων συνθηκών, εκτός από την διεξαγωγή επιτόπιων μετρήσεων, κρίνεται απαραίτητη η καταγραφή έμμεσα μετρούμενων εξατομικευμένων παραμέτρων. Στο πλαίσιο αυτό, όπως προαναφέρθηκε υλοποιήθηκε έρευνα ερωτηματολογίου στο σύνολο των χρηστών γραφείων του κτιρίου. Από τη διεξαχθείσα ανάλυση συλλέχθηκαν 63 ερωτηματολόγια, από το σύνολο των εργαζομένων του κτιρίου, έχοντας σφάλμα 4% και επίπεδο εμπιστοσύνης 95%.

Το τελικό δείγμα που συλλέχθηκε, αποτελείται από 42,9% γυναίκες και από 57,1% άνδρες, με το ηλικιακό εύρος να κυμαίνεται από 26 μέχρι 73 ετών, με μέση τιμή τα 45 χρόνια και τιμή απόκλισης στα 8,762. Το τελικό δείγμα που έχει συλλεχθεί απαρτίζεται τόσο από γυναίκες όσο και από άνδρες, με ηλικίες που αντιστοιχούν στα μέσα χαρακτηριστικά των εργαζομένων στα δημοτικά κτίρια γραφείων.

Από την έρευνα ερωτηματολογίου που διεξήχθη αναφορικά με τις εσωκλιματικές συνθήκες για την χειμερινή περίοδο, προέκυψε πως η πλειοψηφία των ερωτώμενων, 73,7% περιγράφουν τα επίπεδα θερμοκρασίας αέρα στο εσωτερικό της κατασκευής ως ικανοποιητικά. Επιπλέον, οι χρήστες αξιολόγησαν την ποιότητα αέρα του χώρου εργασίας τους και το 60,8% εξέφρασε ικανοποίηση. Ακόμα, η παράμετρος του φωτισμού και του θορύβου αξιολογήθηκαν και από την ανάλυση προέκυψε πως το 83,9% των χρηστών εκφράζει ικανοποίηση αναφορικά με τα επίπεδα φωτισμού, ενώ σε ότι αφορά τον θόρυβο, κατά την χειμερινή περίοδο το 50% των ερωτώμενων εξέφρασε ικανοποίηση ενώ το 37,1% δυσαρέσκεια. Τέλος, ζητήθηκε από τους εργαζόμενους να αξιολογήσουν την συνολικά επίπεδα άνεσης όπως γίνονται αντιληπτά από αυτούς. Από την ανάλυση αυτή, προέκυψε πως το 74,2% εκφράζουν ικανοποίηση αναφορικά με το θέμα αυτό.

Επιπροσθέτως, για τον προσδιορισμό των παραμέτρων που επιδρούν στην ποιότητα αέρα και τον αερισμό του χώρου, ζητήθηκε από τους ερωτώμενους να αξιολογήσουν τον αερισμό σε μία

επταβάθμια κλίμακα ,από το 1 (μη ικανοποιημένοι) έως το 7 (ικανοποιημένοι), να προσδιορίσουν τα παράπονά τους αναφορικά με τις επικρατούσες εσωκλιματικές συνθήκες και να τις αξιολογήσουν. Λόγω της φύσης των δεδομένων, πραγματοποιήθηκαν τόσο μη παραμετρικοί έλεγχοι Wilcoxon όσο και Kruskal-Wallis (Πίνακας 4). Το σύνολο των αναλύσεων που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4 και αποτελούν στατιστικώς σημαντικούς συσχετισμούς με διάστημα εμπιστοσύνης 99%.

Πίνακας 4: Αποτελέσματα επαγωγικών στατιστικών αναλύσεων

Παράμετροι Ανάλυσης	Είδος Ανάλυσης	Z	X <sup>2</sup>	df	Asymp. Sig
Συχνότητα αερισμού-Αξιολόγηση αερισμού	Wilcoxon	-4,848	-	-	0,000
Ποιότητα αέρα τον χειμώνα-Αξιολόγηση αερισμού	Wilcoxon	-2,298	-	-	0,022
Θόρυβοι από συστήματα του κτιρίου-Αξιολόγηση αερισμού	Wilcoxon	-5,830	-	-	0,000
Παράπονα αναφορικά με τον αερισμό-Αξιολόγηση αερισμού	Kruskal-Wallis	-	12,790	5	0,025
Παράπονα αναφορικά με τον τεχνητό φωτισμό- Αξιολόγηση αερισμού	Kruskal-Wallis	-	16,503	5	0,006
Παράπονα αναφορικά με το εργασιακό περιβάλλον- Αξιολόγηση αερισμού	Kruskal-Wallis	-	21,845	5	0,001

Αναλυτικότερα, τα αποτελέσματα αυτά καταδεικνύουν πως, όσο πιο συχνά αερίζεται ο χώρος, τόσο πιο θετικά αξιολογούν οι εργαζόμενοι τον αερισμό, στοιχείο αναμενόμενο καθώς η συχνότητα αερισμού ενός χώρου καθορίζει την ποιότητα του αέρα σε αυτόν. Επιπλέον, θετική συσχέτιση προέκυψε μεταξύ της ποιότητας αέρα και της αξιολόγησης του αερισμού από τους ερωτώμενους. Αντίθετα στην περίπτωση του θορύβου από τα συστήματα του κτιρίου, καταγράφηκε στατιστικώς σημαντική συσχέτιση μεταξύ των παραμέτρων, με την μείωση ικανοποίησης των ερωτώμενων αναφορικά με τον αερισμό καθώς αυξάνονται τα επίπεδα θορύβου.

Επιπλέον, ελέγχθηκαν πιθανοί συσχετισμοί μεταξύ της αξιολόγησης του αερισμού από την πλευρά των χρηστών και την καταγραφή παραπόνων. Από την ανάλυση αυτή προέκυψε πως στατιστικώς σημαντικοί συσχετισμοί έχουν προκύψει μεταξύ της αξιολόγησης του αερισμού και των παραπόνων αναφορικά με τον αερισμό, τον τεχνητό φωτισμό και το εργασιακό περιβάλλον. Για το σύνολο των παραμέτρων αυτών, προσδιορίστηκε πως όσο μικρότερο είναι το ποσοστό των ικανοποιημένων αναφορικά με τον αερισμό τόσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό χρηστών που εκφράζει παράπονα για το σύνολο των προαναφερθέντων παραμέτρων.

### 3.1.2. Χρήση Προσομοιωτικού Εργαλείου

Με τη χρήση του προσομοιωτικού εργαλείου DIAL+ αξιολογήθηκε ο κάθε υπό μελέτη χώρος ανεξάρτητα και προσδιορίστηκαν για τον κάθε χώρο, και για όλη τη διάρκεια του έτους, στοιχεία που σχετίζονται με την σκίαση του χώρου, τον φυσικό και τεχνητό φωτισμό καθώς και τον φυσικό αερισμό. Για τον προσδιορισμό του εκάστοτε χώρου, πραγματοποιήθηκε λεπτομερής περιγραφή του είδους του χώρου καθώς και των κατασκευαστικών λεπτομερειών που τον χαρακτηρίζουν. Ιδιαίτερο γνώρισμα του λογισμικού αυτού είναι πως δίνει τη δυνατότητα στον διαχειριστή να περιγράψει με μεγάλη ακρίβεια τόσο τον κοντινό όσο και τον μακρινό ορίζοντα της υπό ανάλυση περιοχής.

Αρχικά, όσον αφορά την σκίαση του εκάστοτε χώρου, παρουσιάζονται στον Πίνακα 5 οι τιμές του ηλιακού δείκτη, οι οποίες κυμαίνονται από 0,72 έως 0,95 με τις χαμηλότερες τιμές να σημειώνονται τους θερινούς μήνες, ενώ οι υψηλότερες τους χειμερινούς. Οι υψηλές τιμές των δεικτών αυτών είναι απόρροια τόσο των μικρών διαστάσεων των μόνιμων σκιαδίων όσο και της θέσης του ηλίου, ιδιαίτερα κατά την καλοκαιρινή περίοδο, οπότε και βρίσκεται στη υψηλότερή του θέση, επιτρέποντας την είσοδο μικρότερης ποσότητας ηλιακού φωτός την περίοδο αυτή σε σύγκριση με την χειμερινή περίοδο.

Πίνακας 5: Μηνιαίο ηλιακού δείκτης εκάστοτε χώρου γραφείων σύμφωνα με το DIAL+.

Γραφείο	Μήνας											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Γραφείο 1	0,94	0,91	0,87	0,83	0,81	0,80	0,82	0,83	0,86	0,90	0,93	0,95
Γραφείο 2	0,95	0,92	0,88	0,83	0,77	0,72	0,75	0,81	0,86	0,91	0,94	0,95
Γραφείο 3	0,92	0,90	0,86	0,82	0,79	0,77	0,79	0,81	0,85	0,89	0,92	0,93
Γραφείο 4	0,93	0,90	0,87	0,82	0,78	0,76	0,77	0,81	0,85	0,89	0,92	0,94
Γραφείο 5	0,92	0,90	0,86	0,82	0,79	0,77	0,79	0,81	0,85	0,89	0,92	0,93
Γραφείο 6	0,89	0,84	0,80	0,79	0,79	0,78	0,80	0,80	0,81	0,84	0,88	0,90
Γραφείο 7	0,92	0,89	0,85	0,80	0,77	0,74	0,76	0,80	0,83	0,87	0,91	0,93
Γραφείο 8	0,94	0,93	0,90	0,86	0,84	0,81	0,82	0,86	0,88	0,91	0,94	0,95

Επιπροσθέτως, πραγματοποιήθηκε αξιολόγηση του φυσικού φωτισμού του εκάστοτε χώρου. Από την αξιολόγηση αυτή, προέκυψε πως οι μέγιστες τιμές καταγράφονται κοντά στην περιοχή των ανοιγμάτων, ενώ οι μέσες και ελάχιστες τιμές καθώς και οι δείκτες ομοιογένειας, καταδεικνύουν πως ο φυσικός φωτισμός είναι ικανοποιητικός. Παρόλα αυτά, η αποκλειστική αξιοποίηση του φυσικού φωτισμού, δεν μπορεί να επιφέρει τα επιθυμητά συνολικά επίπεδα φωτισμού στο χώρο γραφείων. Παράγοντες που καθορίζουν τις τιμές των δεικτών είναι το εμβαδό του συνόλου των ανοιγμάτων συγκριτικά με το εμβαδόν του γραφείου και ο προσανατολισμός. Χαρακτηριστικό παράδειγμα, αποτελεί το Γραφείο 8, όπου διαπιστώθηκε ότι παρουσιάζει το μέγιστο δείκτη φυσικού φωτισμού, παρατηρείται και η μέγιστη αναλογία συνολικού εμβαδού ανοιγμάτων προς εμβαδό γραφείου (Πίνακας 6).

Πίνακας 6: Αξιολόγηση φυσικού φωτισμού εκάστοτε χώρου γραφείων σύμφωνα με το DIAL+.

Γραφείο	Μέγιστη Τιμή	Μέση Τιμή	Διάμεσος	Ελάχιστη Τιμή	Ομοιογένεια
Γραφείο 1	8,4	1,7	0,67	0,22	0,13
Γραφείο 2	8,2	1,4	0,72	0,23	0,17
Γραφείο 3	10,6	2,3	1,4	0,09	0,04
Γραφείο 4	10,3	1,2	0,66	0,29	0,23
Γραφείο 5	9,9	2,8	1,9	0,58	0,21
Γραφείο 6	11,2	1,9	0,87	0,28	0,15
Γραφείο 7	13,5	2,9	1,8	0,77	0,27
Γραφείο 8	16,1	2,9	1,7	0,92	0,32

Παρόμοια ανάλυση φωτισμού πραγματοποιήθηκε και για τον τεχνητό φωτισμό. Η μέση ένταση τεχνητού φωτισμού κυμαίνεται από 85 lux έως 161 lux και οι τιμές καθορίζονται από το πλήθος των λαμπτήρων και τη θέση τους στο χώρο (Πίνακας 7). Επειδή ο αριθμός των λαμπτήρων είναι περίπου ίδιος σε όλους τους χώρους, στα μικρότερα γραφεία, όπως στο Γραφείο 8, εντοπίζεται η μέγιστη τιμή της έντασης τεχνητού φωτισμού.

Πίνακας 7: Αξιολόγηση τεχνητού φωτισμού εκάστοτε χώρου γραφείων σύμφωνα με το DIAL+.

Γραφείο	Μέγιστη Τιμή [Lux]	Μέση Τιμή [Lux]	Διάμεσος [Lux]	Ελάχιστη Τιμή [Lux]	Ομοιογένεια
Γραφείο 1	309	85	65	7	0,08
Γραφείο 2	327	126	114	10	0,08
Γραφείο 3	297	118	98	15	0,09
Γραφείο 4	378	118	98	15	0,13
Γραφείο 5	313	92	76	10	0,11
Γραφείο 6	323	137	132	23	0,17
Γραφείο 7	329	141	132	24	0,17
Γραφείο 8	467	161	150	29	0,18

Τέλος, πραγματοποιήθηκε και αξιολόγηση του φυσικού αερισμού. Από την ανάλυση, προέκυψε ότι οι τιμές εισροής και εκροής αέρα κυμαίνονται 436 m<sup>3</sup>/h έως 2046 m<sup>3</sup>/h (Πίνακας 8), με τις μέγιστες τιμές να σημειώνονται στα γραφεία με το μεγαλύτερο εμβαδό ανοιγμάτων. Οι αυξημένες αυτές τιμές σε συνδυασμό με τα μικρού μεγέθους γραφεία οδηγούν σε μικρά χρονικά διαστήματα ανανέωσης του αέρα. Διαπιστώνεται, λοιπόν, ότι σε όλους τους υπό εξέταση χώρους, ο χρόνος ανανέωσης του αέρα είναι σχετικά σύντομος και μπορεί να επιτευχθεί από τους εργαζομένους χωρίς να προκαλεί όχληση.

Πίνακας 8: Αξιολόγηση φυσικού αερισμού εκάστοτε χώρου γραφείων σύμφωνα με το DIAL+.

Γραφείο	Ποσοστό Ανανέωσης	Ρυθμός Εισροής [m <sup>3</sup> /h]	Ρυθμός Εκροής [m <sup>3</sup> /h]	Στιγμιαία εναλλαγή [vol/h]	Ύψος Ισορροπίας [m]	Χρονικό Διάστημα Ανανέωσης [s]
Γραφείο 1	50%	476	476	9,9	1,75	4
Γραφείο 2	50%	436	477	10,1	1,74	4
Γραφείο 3	50%	650	622	14,2	1,76	3
Γραφείο 4	50%	657	657	6,7	1,75	6
Γραφείο 5	50%	566	618	17,7	1,77	2
Γραφείο 6	50%	1082	1082	12,7	1,75	3
Γραφείο 7	50%	1269	1269	15,3	1,75	3
Γραφείο 8	50%	2046	2046	25,5	1	2

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η επίτευξη υψηλών συνθηκών άνεσης και υγιεινής των εργαζομένων σε χώρους γραφείων, θεωρείται ως μία αυτονόητη πραγματικότητα στους σύγχρονους χώρους εργασίας. Στο πλαίσιο αυτό, και λαμβάνοντας υπόψη την πολυπλοκότητα και πολυπαραμετρικότητα που χαρακτηρίζει τον προσδιορισμό της θερμικής άνεσης, κρίθηκε απαραίτητη η σε βάθος προσέγγιση των κύριων παραμέτρων που την επηρεάζουν. Έτσι, πραγματοποιήθηκε παράλληλα με την έρευνα πεδίου και προσομοίωση των χώρων, ώστε να επιτευχθεί μια ολοκληρωμένη απεικόνιση της υφιστάμενης κατάστασης.

Λαμβάνοντας υπόψη τον σκοπό της έρευνας, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις πεδίου για τον προσδιορισμό των εσωτερικών συνθηκών, οι οποίες συμπεριλάμβαναν μετρήσεις θερμοκρασίας αέρα, σχετικής υγρασίας, ταχύτητας αέρα, φωτεινότητας, συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα και επομένως των δεικτών θερμικής άνεσης, οι οποίοι συσχετίστηκαν με τις εξωτερικές συνθήκες. Επιπλέον, προσδιορίστηκαν οι δείκτες θερμικής άνεσης (PMV/PPD) και προέκυψε, πως βρίσκονται

εντός των αποδεκτών ορίων. Παράλληλα, πραγματοποιήθηκε έρευνα ερωτηματολογίου μέσω της οποίας καταγράφηκε η άποψη των χρηστών αναφορικά με τις εσωκλιματικές συνθήκες καθώς και πλήθος εξατομικευμένων χαρακτηριστικών. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης, επιβεβαίωσαν αυτά των επιτόπιων μετρήσεων και παράλληλα κατέδειξαν κάποιες αρχικές σχέσεις συσχέτισης μεταξύ παραμέτρων σχετικών με την ποιότητα αέρα.

Στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκε το προσομοιωτικό πρόγραμμα DIAL+ και αξιολογήθηκαν οι παράμετροι της σκίασης, του φυσικού και τεχνητού φωτισμού και του φυσικού αερισμού. Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων προέκυψε καταρχάς, πως το προσομοιωτικό εργαλείο αυτό, δίνει μία πολύ ρεαλιστική απεικόνιση για το σύνολο των παραμέτρων αυτών. Εν συνεχεία, προέκυψε ότι το υπό μελέτη κτίριο φαίνεται να αξιοποιεί σε πολύ καλό βαθμό τον φυσικό φωτισμό, αφού παρουσιάζει μεγάλα ποσοστά αυτονομίας στα περισσότερα γραφεία. Έτσι παρουσιάζεται μειωμένη η ετήσια ενεργειακή κατανάλωση για φωτισμό. Ακόμα έγινε εμφανές ότι για κάθε υπολογιστικό μοντέλο το πρόγραμμα συνυπολογίζει όλες τις παραμέτρους, όπως είναι ο προσανατολισμός, το μέγεθος των ανοιγμάτων, το μέγεθος και η μορφή του γραφείου, οι επιφάνειες σε επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον καθώς και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα γραφείων που συνδυάζουν μεγάλα ανοίγματα, μικρό βάθος και νοτιοανατολικό προσανατολισμό, τα οποία εμφανίζουν πολύ μεγάλες μέσες τιμές ποσοστών αυτονομίας λόγω φυσικού φωτισμού.

Διαπιστώνεται, λοιπόν, πως το προσομοιωτικό πρόγραμμα DIAL+ είναι ιδιαίτερα χρήσιμο τόσο για τη σχεδίαση ενός νέου κτιρίου, όσο και για παρεμβάσεις βελτίωσης της συμπεριφοράς υφιστάμενων κτιρίων. Οι εκτιμήσεις που γίνονται από τα υπολογιστικά μοντέλα του προγράμματος συμβάλουν στην αποφυγή λαθών τόσο στην κατασκευή των κτιρίων όσο και στην επιλογή των χαρακτηριστικών που καθορίζουν τη θερμική συμπεριφορά τους, τα οποία μπορούν να μειώσουν δραστικά τα επίπεδα συνθηκών εσωτερικού περιβάλλοντος. Η προσομοίωση της κατανομής της έντασης του τεχνητού και φυσικού φωτισμού στο χώρο συμβάλουν προς σε αυτήν την κατεύθυνση. Ιδιαίτερα σημαντική είναι και η προσομοίωση του φυσικού αερισμού και των χρόνων ανανέωσης του αέρα, αφού η έκθεση σε μεγάλες ταχύτητες αέρα επιφέρει μεγάλη δυσφορία στους χρήστες. Στο υπό μελέτη κτίριο η ανανέωση του αέρα των χώρων γίνονται σε πολύ μικρά χρονικά διαστήματα χωρίς να προκαλείται όχληση. Έτσι οι κατασκευαστές μπορούν να εξασφαλίσουν συνθήκες θερμικής άνεσης για τους χρήστες των κτιρίων.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς θα ήθελαν να ευχαριστήσουν το Δήμαρχο του Δήμου Πυλαίας-Χορτιάτη κ. Ιγνάτιο Καίπετζη καθώς και τους υπαλλήλους του Δημαρχείου για την υποστήριξη τους και την συμμετοχή τους στην διεξαχθείσα έρευνα. Επίσης, ιδιαίτερες ευχαριστίες πρέπει να δοθούν στην ESTIA S.A. για την παροχή της εκπαιδευτικής άδειας του λογισμικού DIAL +.

Τέλος, η διεξαχθείσα έρευνα, υλοποιήθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού έργου «Προσδιορισμός και Αξιολόγηση του Αντιληπτού Επιπέδου Άνεσης σε Κτίρια Γραφείων με χρήση Υβριδικών, Εξατομικευμένων Μοντέλων». Η χρηματοδότηση του έργου πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του προγράμματος «ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΑΡΙΣΤΕΙΑΣ IKY/SIEMENS» και στο πλαίσιο αυτό, οι συγγραφείς θα ήθελαν να εκφράσουν την ευγνωμοσύνη τους προς το IKY/Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] World Health Organization, 2017, "WHO Health Definition."
- [2] CEN (European Committee for Standardization), 2005, "ISO 7730: Ergonomics of the Thermal Environment Analytical Determination and Interpretation of Thermal Comfort Using Calculation of the PMV and PPD Indices and Local Thermal Comfort Criteria," Geneva Int. Stand. Organ., 3, pp. 605–615.
- [3] Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος, 2010, "Οδηγία Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων- Τεχνική Οδηγία- Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2010 - Αναλυτικές Εθνικές Προδιαγραφές Παραμέτρων Για Τον Υπολογισμό Της Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων Και Την Έκδοση Του Πιστοποιητικού Ενεργειακής Απόδοσης."
- [4] Fanger, P. O., 1970, *Thermal Comfort. Analysis and Applications in Environmental Engineering*, Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering.

- [5] Seppänen, O., and Fisk, W. J., 2002, "Association of Ventilation System Type with SBS Symptoms in Office Workers," *Indoor Air*, 12(2), pp. 98–112.
- [6] Zweers, T., Preller, L., Brunekreef, B., and Boleij, J. S. M., 1992, "Health and Indoor Climate Complaints of 7043 Office Workers in 61 Buildings in the Netherlands," *Indoor Air*, 2(3), pp. 127–136.
- [7] ASHRAE Standard 62.1, 2013, *Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality*, American Society of heating, refrigerating and air conditioning engineers.
- [8] Indraganti, M., Ooka, R., Rijal, H. B., and Brager, G. S., 2014, "Adaptive Model of Thermal Comfort for Offices in Hot and Humid Climates of India," *Build. Environ.*, 74, pp. 39–53.
- [9] Antoniadou, P., and Papadopoulos, A. M., 2017, "Occupants' Thermal Comfort: State of the Art and the Prospects of Personalized Assessment in Office Buildings," *Energy Build.*, 153(C), pp. 136–149.
- [10] Rupp, R. F., Vássquez, N. G., and Lamberts, R., 2015, "A Review of Human Thermal Comfort in the Built Environment," *Energy Build.*, 105, pp. 178–205.
- [11] Jantunen, M., Oliveira Fernandes, E., Carrer, P., and Kephelopoulou, S., 2011, *Promoting Actions for Healthy Indoor Air (IAIAQ)*.
- [12] Antoniadou Panagiota, and Papadopoulos Agis, 2017, "Development of an Integrated, Personalized Comfort Methodology for Office Buildings," *Energies*, 10(8), p. 1202.
- [13] Eurostat, 2015, "Final Energy Consumption by Sector" [Online]. Available: <http://ec.europa.eu/eurostat/tgm/table.do?tab=table&init=1&language=en&pcode=teina225&plgin=1>. [Accessed: 26-Jun-2017].
- [14] Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος, 2010, "Οδηγία Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων- Τεχνική Οδηγία - Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-3/2010 - Κλιματικά Δεδομένα Ελληνικών Περιοχών."
- [15] Wilcock, A. A., 1968, "Köppen after Fifty Years," *Ann. Assoc. Am. Geogr.*, 58(1), pp. 12–28.
- [16] Προεδρικό Διάταγμα-Presidential Decree, 1979, "Κανονισμός Θερμομόνωσης Κτιρίων-Thermal Insulation of Buildings Regulation," *Επίσημη Εφημερίδα της Ελληνικής Δημοκρατίας-Official Gaz. Hell. Repub.*, 362(Δ), pp. 3960–4035.
- [17] CEN (European Committee for Standardization), 2002, "ISO 7726:Ergonomics of the Thermal Environment - Instruments for Measuring Physical Quantities."
- [18] Ben-Akiva, M., Bradley, M., Morikawa, T., Benjamin, J., Novak, T., Oppewal, H., and Rao, V., 1994, "Combining Revealed and Stated Preferences Data," *Mark. Lett.*, 5(4), pp. 335–349.
- [19] Samuelson, P. A., 1938, "A Note on the Pure Theory of Consumer's Behaviour," *Economica*, 5(17), pp. 61–71.
- [20] CEN (European Committee for Standardization), 2011, "ISO 12464-1: Light and Lighting - Lighting of Workplaces - Part 1: Indoor Workplaces," *Geneva Int. Stand. Organ.*

## ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΣΕ ΑΙΓΟΠΡΟΒΑΤΟΣΤΑΣΙΟ

**Δ.Κ. Φεΐδαρος<sup>1\*</sup>, Α.Α. Μπαξεβάνου<sup>2</sup>, Θ. Μπαρτζάνας<sup>2</sup>, Ν. Κατσούλας<sup>1\*</sup>**

<sup>1</sup>Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 38221, Βόλος,

<sup>2</sup>Ινστιτούτο Έρευνας και Τεχνολογίας - Θεσσαλίας, ΕΚΕΤΑ,  
e-mail: [dfeidaros@gmail.com](mailto:dfeidaros@gmail.com)

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα προβατοστάσια είναι ανοιχτά κτήρια στα οποία ο φυσικός αερισμός λόγω ανεμοπίεσης (διαμετρής αερισμός) σε συνδυασμό με φυσικό αερισμό λόγω θερμικής άνωσης (μέσω κεντρικού ανοίγματος στην οροφή) χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση του μικροκλίματος έτσι ώστε να εξασφαλίζονται συνθήκες θερμικής άνεσης για τα ζώα. Οι συνθήκες θερμικής άνεσης συνίστανται σε συγκεκριμένα όρια θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας, ταχύτητας αέρα και συνδυασμού των παραπάνω καθώς και σε ανεκτά όρια συγκέντρωσης ρύπων. Στην περίπτωση ενός ανοιχτού κτηρίου ο αερισμός χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας και για την απομάκρυνση της υγρασίας και των ρύπων υπό τον όρο ότι οι ταχύτητα του αέρα στο επίπεδο των ζώων θα παραμένει σε ανεκτά επίπεδα ανάλογα με την εποχή. Ωστόσο το θέμα του αερισμού στην περίπτωση των προβατοστασίων δεν έχει μελετηθεί επαρκώς με αποτέλεσμα τα ανοίγματα αερισμού να κατασκευάζονται κυρίως με εμπειρικούς κανόνες ενώ η λειτουργία των ανοιγμάτων είναι χειροκίνητη και πραγματοποιείται βάσει της υποκειμενικής αίσθησης θερμικής άνεσης του εκάστοτε σταβλίτη. Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε ένας state-of-the-art θάλαμος προβατοστασίου με δυναμικότητα 1000 ζώων εγκατεστημένος στην Κεντρική Ελλάδα προκειμένου να εξεταστεί η βέλτιστη γεωμετρία ανοιγμάτων.

Η μελέτη έγινε με προσομοίωση των φαινομένων μεταφοράς μέσα στο θάλαμο με μεθόδους υπολογιστικής ρευστοδυναμικής. Αναπτύχθηκαν δύο μοντέλα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD) ένα απλό 2D και ένα πλήρες 3D τα οποία πιστοποιήθηκαν μέσω μετρήσεων του μικροκλίματος. Στη συνέχεια τα υπολογιστικά μοντέλα χρησιμοποιήθηκαν για παραμετρικές μελέτες. Αρχικά εξετάστηκε σε 2D γεωμετρία με απλό μοντέλο το οποίο επιλύει μόνο τις εξισώσεις συνέχειας, ορμής, ενέργειας και τύρβης ο αερισμός του κτηρίου λόγω ανεμοπίεσης και θερμικής άνεσης για διαφορετικές εποχές του χρόνου, για διαφορετικά μεγέθη πλευρικών ανοιγμάτων και τύπο ανοιγμάτων (κατακόρυφα και ανακλινόμενα) καθώς και διαφορετικές θέσεις του καλύμματος του κεντρικού ανοίγματος αερισμού. Συμπεράσματα εξήχθησαν για τον βέλτιστο και μέγεθος ανοίγματος ανάλογα με την εποχή του έτους βάσει της θερμοκρασίας και της ταχύτητας αέρα στο επίπεδο των προβάτων. Τέλος συμπεράσματα για τις συνθήκες θερμικής άνεσης σε όλο το χώρο του εξεταζόμενου προβατοστασίου εξάγονται με τη βοήθεια 3D προσομοίωσης όλου του κτηρίου με πλήρες μοντέλο το οποίο περιλαμβάνει και τη μοντελοποίηση της υγρασίας και της διασποράς της αμμωνίας. Τα ζώα μέσα στο θάλαμο προσομοιώθηκαν ως πορώδεις όγκοι και πηγές θερμότητας, υγρασίας και αμμωνίας.

**Λέξεις Κλειδιά:** Φυσικός αερισμός, Θερμική άνωση, CFD, Κτηνοτροφικό κτήριο, Θερμική άνεση Ευζωία ζώων

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο αερισμός των κτηρίων, συμβατικών και ειδικών, χρησιμοποιείται για τον έλεγχο του μικροκλίματος μέσα σε αυτά και για την εξασφάλιση συνθηκών υγιεινής. Ειδικά στην περίπτωση ανοιχτών κτηρίων, όπως είναι ένα προβατοστάσιο συχνά ο φυσικός αερισμός είναι και ο μόνος τρόπος ελέγχου του μικροκλίματος και της ποιότητας αέρα κυρίως μέσω της γεωμετρίας των ανοιγμάτων. Στα προβατοστάσια είναι ο πλέον συνήθης συνδυασμός φυσικού αερισμού που βασίζεται στην ανεμοπίεση λόγω αερισμού, στην θερμική άνωση και στον συνδυασμό διαμπερών ανοιγμάτων και του ανοίγματος οροφής.

Στην Ελλάδα σήμερα, ακόμα και στις πιο σύγχρονες εγκαταστάσεις προβατοστασίων ο σχεδιασμός των ανοιγμάτων είναι εμπειρικός χωρίς τις περισσότερες φορές να γίνεται ούτε η στοιχειώδης αναλυτική μελέτη του ροϊκού πεδίου που αναμένεται να αναπτυχθεί μέσα στο προβατοστάσιο. Ενώ ο χειρισμός των ανοιγμάτων είναι χειροκίνητος και γίνεται με καθαρά υποκειμενικά κριτήρια των εργαζομένων σε αντίθεση με τα κλειστά κτηνοτροφικά κτήρια όπως είναι τα πτηνοτροφεία, στα οποία ο αερισμός είναι τεχνητός και ελέγχεται με αυτοματισμούς. Αποτέλεσμα αυτού είναι η αδυναμία επίτευξης ικανοποιητικού μικροκλίματος μέσα στο προβατοστάσιο με δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία και την παραγωγικότητα των ζώων.

Μια συνήθης μέθοδος μελέτης του μικροκλίματος σε κτήρια με φυσικό αερισμό είναι μέσω μετρήσεων πεδίου [13, 15, 16] προκειμένου να εξεταστεί η εμφάνιση περιοχών θερμικής καταπόνησης ζώων σε φυσιολογικές κλιματικές συνθήκες ή σε περιόδους καύσωνα ή να μετρηθούν τα επίπεδα σωματιδίων. Ωστόσο οι μετρήσεις δεν μπορούν να δώσουν ενδείξεις για το τι συμβαίνει σε μια περιοχή στην οποία δε γίνονται μετρήσεις. Μπορούν όμως να αξιοποιηθούν για την ποιοτική πιστοποίηση υπολογιστικών μοντέλων. Πολύ πιο σπάνιες είναι πειραματικές μελέτες σε αεροσήραγγες.

Αριθμητικές μέθοδοι όπως αυτές της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (CFD) έχουν αναπτυχθεί ευρέως για τον υπολογισμό του μικροκλίματος μέσα σε συμβατικά κτήρια με φυσικό ή τεχνητό αερισμό [17, 18] αλλά και μέσα σε κτηνοτροφικά κτήρια προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η λειτουργία των ανοιγμάτων [8, 14]. Οι υπολογιστικές αυτές μέθοδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για παραμετρικές μελέτες προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση του εξωτερικού ροϊκού πεδίου (διεύθυνση και ταχύτητα ανέμου) στον επιτυχημένο αερισμό του κτηρίου [9]. Ακόμα και τεχνικές που έχουν αναπτυχθεί για συμβατικά κτήρια μπορούν να αξιοποιηθούν για την αξιολόγηση του αερισμού μέσα σε κτήρια [10]. Οι τελευταίες αφορούν τεχνικές που στοχεύουν στον υπολογισμό δεικτών μικροκλίματος όπως είναι ο Δείκτης Θερμοκρασίας – Υγρασίας (THI) [11] ή ο ωριαίος αριθμός εναλλαγών αέρα [12]. Στην εργασία [7] γίνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση των μεθόδων μοντελοποίησης των εκπομπών αμμωνίας από κτηνοτροφικά κτήρια.

Στην εργασία [6] έχει αναπτυχθεί ένα μοντέλο υπολογιστικής ρευστοδυναμικής για τον υπολογισμό του εσωτερικού μικροκλίματος μέσα σε ένα κτήριο προβατοστασίου. Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η περαιτέρω εξέλιξη αυτού του μοντέλου σε δύο υπολογιστικές υποπεριπτώσεις μελέτης που αφορούν ένα τρισδιάστατο (3D) και ένα δισδιάστατο (2D) προβατοστάσιο με σκοπό τη διερεύνηση της επίδρασης κατασκευαστικών τροποποιήσεων στην αποτελεσματική λειτουργία ανοιγμάτων αερισμού ενός φυσικά αεριζόμενου ανοιχτού κτηρίου προβατοστασίου για διαφορετικές εξωτερικές κλιματικές συνθήκες.

## 2. Μεθοδολογία

### 2.1. Μαθηματικό μοντέλο

Για την προσομοίωση των φαινομένων μεταφοράς χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των πεπερασμένων όγκων κάνοντας χρήση του εμπορικού κώδικα FLUENT [19]. Επιλύθηκαν οι εξισώσεις συνέχειας, διατήρησης της ορμής και της ενέργειας καθώς και βαθμωτές εξισώσεις διατήρησης για  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CO}_2$  και υγρασία. Για τη σύζευξη των εξισώσεων συνέχειας και πίεσης χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος SIMPLIC [18]. Η ροή θεωρήθηκε σε κάθε φορά μόνιμη, τυρβώδης και ασυμπίεστη. Για να ληφθεί υπόψη η επίδραση της θερμικής άνωσης η πυκνότητα του αέρα υπολογίζεται βάσει της προσέγγισης Boussinesq. Η ροή θεωρείται παντού τυρβώδης και τα ζώα, η στρωμνή και οι αντανεμικές σήτες θεωρούνται πορώδεις περιοχές που συνεισφέρουν στις εξισώσεις ορμής όρους πηγής που προκαλούν πτώση πίεσης. Τα ζώα θεωρούνται πηγή θερμότητας, υδρατμών,  $\text{NH}_3$  και  $\text{CO}_2$ .

Κατ' εξαίρεση στις 2Δ προσομοιώσεις που στόχο έχουν τη μελέτη της συμπεριφοράς αερισμού και μόνο, οι αντανεμικές σήτες θεωρούνται συμπαγές υλικό και δεν επιλύονται οι εξισώσεις που αφορούν την υγρασία, και τη μεταφορά  $\text{NH}_3$  και  $\text{CO}_2$ . Στο 3Δ μοντέλο χρησιμοποιείται αποκλειστικά το μοντέλο τύρβης k- $\omega$ . Στο 2Δ μοντέλο αρχικά χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο τύρβης k- $\omega$  και στη συνέχεια το μοντέλο τύρβης RSM.

## 2.2. Οριακές συνθήκες

Στο 2Δ μοντέλο το έδαφος θεωρείται αδιαβατικός τοίχος. Η είσοδος του υπολογιστικού πεδίου θεωρείται περιοχή με γνωστή τιμή της ταχύτητας, της θερμοκρασίας και των ποσοτήτων που χαρακτηρίζουν την τύρβη. Ορίζεται η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 50 m και η καθ' ύψος κατανομή των παραμέτρων  $u_x$ ,  $k$  και  $\omega$  καθορίζεται ανάλογα με το ύψος θεωρώντας ύψος τραχύτητας εδάφους  $z_0=0.03$  και ύψος οριακού στρώματος 200 m [17]. Η ταχύτητα  $u_x$  θεωρείται παντού μηδενική. Οι ίδιες συνθήκες επιβάλλονται και στο άνω όριο του υπολογιστικού πεδίου. Στην έξοδο του υπολογιστικού πεδίου λαμβάνεται μηδενική κλίση πίεσης.

Στην περίπτωση του 3Δ μοντέλου οι τοίχοι και η οροφή θεωρούνται ισοθερμοκρασιακοί τοίχοι των οποίων η θερμοκρασία καθορίζεται βάσει της εξωτερικής θερμοκρασίας. Τα ανοίγματα τα οποία είναι καλυμμένα με πλαστικές σίτες θεωρούνται πορώδεις επιφάνειες στις οποίες η πίεση είναι ίση με την ατμοσφαιρική ενώ η ίδια οριακή συνθήκη επιβάλλεται και στα ανοίγματα του κορφιά.

## 3. Περίπτωση μελέτης

### 3.1. Φυσικό πρόβλημα

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται ο φυσικός αερισμός λόγω ανεμοπίεσης και θερμικής άνεσης σε προβατοστάσιο συνολικής επιφάνειας 1800 m<sup>2</sup>, δυναμικότητας 900 (μικρών μηρυκαστικών) ζώων. Σύμφωνα με την εργασία [1] η βέλτιστη θερμοκρασία για πρόβατα κυμαίνεται μεταξύ 10-17°C με τη σχετική υγρασία μεταξύ 60-80%. Για κριούς, προβατίνες και παχιά πρόβατα αυτά τα όρια γίνονται 8-17°C ενώ η σχετική υγρασία παραμένει 60-85%. Οι ανάγκες αερισμού ορίζονται σε 10-30 ACH για το θέρος με ελάχιστο 4 ACH για το χειμώνα.

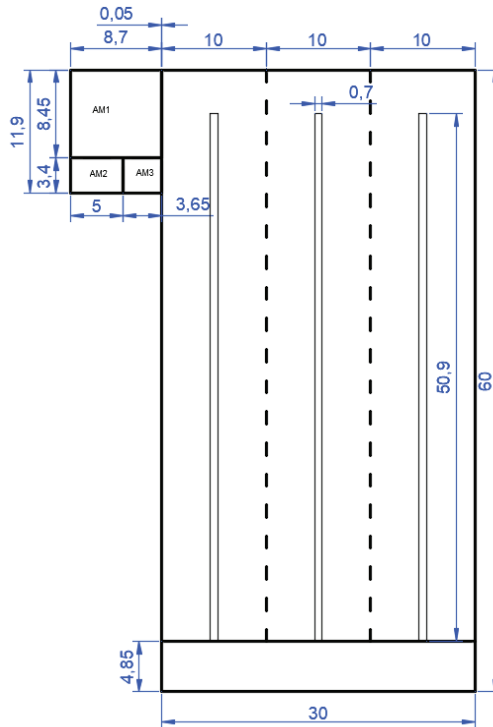
Σύμφωνα με την μελέτη [2] η ανεκτή θερμοκρασία για τα πρόβατα είναι μεταξύ 5 και 21°C με βέλτιστη στους 13°C, για τα αρνιά μεταξύ 18 και 25°C, για τις γίδες μεταξύ 10 και 20°C ενώ για τα κατσίκια είναι 15°C. Τα ζώα δυσκολεύονται να προσαρμοστούν σε θερμοκρασίες μικρότερες των 5 έως 8°C και μεγαλύτερες από 25-35°C. Η βέλτιστη προτεινόμενη σχετική υγρασία είναι μεταξύ 70-75%. Οι ανεκτές ταχύτερες αέρα είναι 0.5 m/s για τα ενήλικα ζώα και 0.25 m/s για τα νεαρά ζώα.

Σύμφωνα με την εργασία [3] η βέλτιστη σχετική υγρασία για τα ενήλικα ζώα είναι μεταξύ 60 έως 80% ενώ για τα νεαρά ζώα κυμαίνεται μεταξύ 70-75%. Οι ανάγκες αερισμού ανά ζώο ορίζονται σε 20 m<sup>3</sup>/h για το χειμώνα ενώ φτάνουν τα 100-150 m<sup>3</sup>/h κατά την θερινή περίοδο για τα ενήλικα ζώα. Για ζώα ηλικίας 0-3 εβδομάδων τα παραπάνω όρια μειώνονται σε 3 έως και 15 m<sup>3</sup>/h ενώ για τα ζώα στο στάδιο του απογαλακτισμού ανεβαίνουν σε 6 έως και 30 m<sup>3</sup>/h.

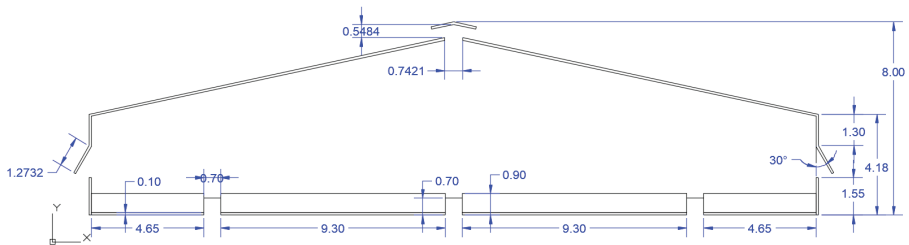
### 3.2. Γεωμετρία

Η συνολική επιφάνεια του στάβλου είναι 1800 m<sup>2</sup> εκ των οποίων τα 1785,45 m<sup>2</sup> διατίθενται για τα ζώα και τα υπόλοιπα είναι ο προθάλαμος εισόδου. Ο χώρος των ζώων είναι χωρισμένος σε τρία τμήματα καθένα από τα οποία τροφοδοτείται με ταινία παροχής τροφής. Στο χώρο των ζώων το τιμμεντένιο δάπεδο καλύπτεται με στρωμένη από άχυρα πάχους μέχρι και 15 cm. Το ύψος του προβατοστασίου κυμαίνεται από 4.3 m στις άκρες μέχρι 7.2 στο κέντρο. Στο κέντρο και κατά μήκος του στάβλου υπάρχει άνοιγμα αερισμού πλάτους 0,70 m το οποίο καλύπτεται από 'καπέλο' σε ύψος 7.8 m. Η στέγη είναι κατασκευασμένη από πάνελ πολυουρεθάνης πάχους 4 cm. Οι πλαϊνοί τοίχοι αποτελούνται από δρομική τοιχοποιία μέχρι ύψους 1,55 m αποτελούμενη από απλό ανεπίχριστο τούβλο πάχους 7.5cm. Πάνω από το ύψος αυτό καλύπτονται από αντανεμική σίτα τοποθετημένη σε πλαίσια τα οποία μπορούν να ανοίγουν (πλήρως ανακλινόμενα) για τον αερισμό του χώρου. Ειδικά ο αριστερός τοίχος στα τελευταία 12 m σε ύψος υπερκείμενο της τουβλοδομής είναι καλυμμένος με πάνελ πολυουρεθάνης στην περιοχή στην οποία εφάπτεται με το αμελκτήριο. Ο τοίχος της όψης καλύπτεται από τούβλα μέχρι του ύψους 2.88 m και στη συνέχεια υπάρχουν διάφανα παράθυρα (μόνος υαλοπίνακας και μεταλλικό πλαίσιο χωρίς θερμοδιακοπή). Τα διάφανα παράθυρα είναι ανοιγόμενα και μη. Συγκεκριμένα υπάρχουν 5 ανοιγόμενα παράθυρα διαστάσεων 1.75 x 0.82 m. Ο τοίχος της πίσω όψης αποτελείται από χαμηλά τμήματα τουβλοδομής πάνω από τα οποία υπάρχει αντανεμική σίτα

και φέρει δύο μεγάλες μεταλλικές πόρτες, διαστάσεων 6x4.4 m. Στα Σχήματα 1 και 2 δίνονται η κάτοψη του θαλάμου και η τομή του προβατοστασίου.



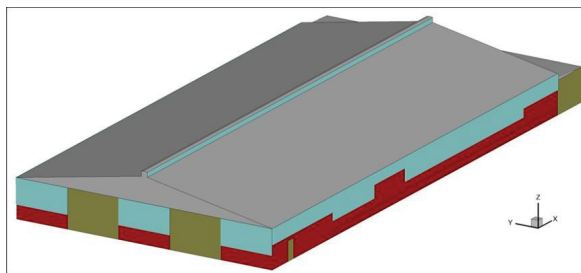
Σχήμα 1. Κάτοψη προβατοστασίου



Σχήμα 2. Τομή προβατοστασίου

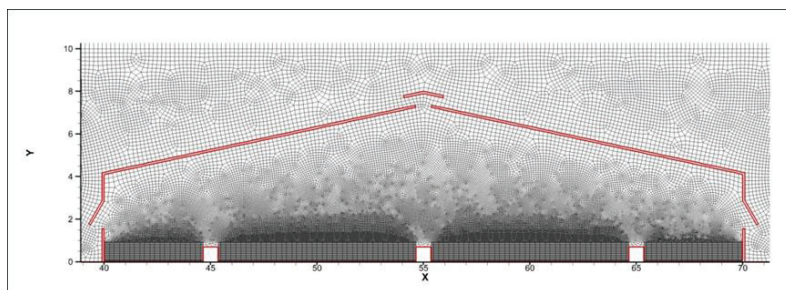
### 3.3. Υπολογιστικό πλέγμα

Στην περίπτωση της 3Δ γεωμετρίας η εσωτερική επιφάνεια του θαλάμου ταυτίζεται με το υπολογιστικό πεδίο. Θεωρείται ότι τα αντιανεμικά δίχτυα είναι πλήρως κατεβασμένα και ο αερισμός γίνεται μόνο λόγω θερμικής άνωσης. Το 3Δ υπολογιστικό πλέγμα αποτελείται από 59 τμήματα (59 blocks) υβριδικής πλεγματοποίησης με εξαεδρικά κελιά στον πυρήνα κάθε τμήματος. Στην πλειονότητα των τμημάτων έχουν χρησιμοποιηθεί αλγόριθμοι διατήρησης της ορθογωνικότητας των εξαεδρικών κελιών και ληφθεί μεριμνά για πύκνωση του πλέγματος στις οριακές επιφάνειες και εκεί όπου παρατηρούνται μεγάλες βαθμίδες των βαθμωτών και διανυσματικών μεγεθών που επιλύονται από το αριθμητικό μοντέλο. Το πλέγμα αποτελείται από 4008700 κελιά και από 5241370 κόμβους. Το υπολογιστικό πεδίο του 3Δ μοντέλου δίνεται στο Σχήμα 3.



Σχήμα 3. Υπολογιστικό πεδίο 3D μοντέλου

Στην περίπτωση της 2D γεωμετρίας εφόσον ο αερισμός γίνεται και μέσω ανεμοπίεσης το υπολογιστικό πεδίο εκτείνεται εμπρός, πάνω και μετά την τομή. Έτσι είναι δυνατό να οριστεί η εξωτερική ταχύτητα, ως ταχύτητα του αδιατάρακτου πεδίου σε απόσταση ίση με 6 ύψη κτηρίου σταβλικών εγκαταστάσεων  $H$  ( $6 \times 8 = 48\text{m}$ ) από την προσήνεμη πλευρά του κτηρίου (όπου  $H$  το ύψος του κτηρίου). Το υπολογιστικό πεδίο εκτείνεται κατά  $6.5 H$  πάνω από το ανώτερο σημείο της οροφής του κτηρίου ενώ εκτείνεται και κατά  $25 H$  στην υπήνεμη πλευρά του κτηρίου έτσι ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί συνθήκη μηδενικής κλίσης πίεσης. Έχει χρησιμοποιηθεί υβριδικό πλέγμα από περίπου 400000 ορθογωνικά και μη τετράπλευρα κελιά. Σχηματική παράσταση αυτού δίνονται στις εικόνες που ακολουθούν. Στο Σχήμα 4 δίνεται το συνολικό υπολογιστικό μοντέλο του 2D πεδίου και στο Σχήμα 5 η λεπτομέρεια που αφορά το κτηνοτροφικό κτήριο.



Σχήμα 5. 2D πλέγμα κτηνοτροφικού κτιρίου

### 3.4. Λεπτομέρειες αριθμητικού μοντέλου

Οι όροι διάχυσης σε όλες τις εξισώσεις διακριτοποιήθηκαν με τη μέθοδο των κεντρικών διαφορών. Οι όροι συναγωγής των εξισώσεων ορμής και ενέργειας με δεύτερης τάξης ανάντη σχήμα ενώ οι όροι διάχυσης των υπολοίπων εξισώσεων με πρώτης τάξης ανάντη σχήμα. Το κριτήριο σύγκλισης για όλες τις εξισώσεις ήταν  $10^{-4}$  ενώ για την εξίσωση της ενέργειας ήταν  $10^{-6}$ .

### 3.5. Ιδιότητες υλικών

Το δάπεδο είναι κατασκευασμένο από οπλισμένο σκυρόδεμα (στεγάνωση, οπλισμένο σκυρόδεμα, τσιμεντοκονία). Η οροφή είναι κατασκευασμένη από πάνελ πολυουρεθάνης με πάχος 4 cm. Η στρωμή αποτελείται από άχυρα. Η τοιχοποιία είναι οπτοπλινθοδομή με διάτρητους οπτόπλινθους ανεπίχριστη και τέλος η σίτα είναι κατασκευασμένη από PVC. Το πρόβιο θεωρείται ότι αποτελείται από 72% νερό και το υπόλοιπο κρέας ενώ γύρω υπάρχει μαλλί πάχους 5 cm. Για τον προσδιορισμό των θερμοφυσικών του ιδιοτήτων αντιμετωπίζεται ως κύλινδρος διαμέτρου 0.3 m και μήκους 0.7 m με μέσο βάρος 60 kg. Στον πίνακα 1 που ακολουθεί δίνονται οι θερμοφυσικές ιδιότητες όλων των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση.

Η στρωμή θεωρείται πορώδες υλικό με συντελεστή πορώδους 0.7 [5] και παράλληλα ως πηγή θερμότητας με παραγωγή  $66.25 \text{ W/m}^3$ , υδρατμών με ρυθμό  $1.835 \times 10^{-6} \text{ kg/(s} \cdot \text{m}^2)$  και αμμωνίας με ετήσιο ρυθμό εκπομπής ανά ζώο 1.34 kg. Η σίτα θεωρείται επίσης πορώδες υλικό με συντελεστή πορώδους 0.25. Τα ζώα θεωρούνται και αυτά πορώδες υλικό με συντελεστή πορώδους 0.917 βάσει

του οποίου υπολογίζεται η αεροδυναμική αντίσταση που προβάλλουν [4] καθώς επίσης και ως πηγή θερμότητας  $118.46 \text{ W/m}^2$ , και υδρατμών με ρυθμό εκπομπής  $0.8 \text{ gr/(kg}\cdot\text{h)}$  ανά μέσο ζώο [20, 21, 22].

Πίνακας 1. Θερμοφυσικές ιδιότητες δομικών υλικών

Υλικό	Πυκνότητα, $\rho$ [ $\text{kg/m}^3$ ]	Θερμική αγωγιμότητα, $\lambda$ [ $\text{W/mK}$ ]	Θερμοχωρητικότητα, $c_p$ , [ $\text{J/kg/K}$ ]
Δάπεδο	2216.67	2.87	1002.76
Οροφή	2686.67	0.045	525.81
Στρωμνή	200	0.07	1380
Τοιχοποιία	1900	0.64	1000
Σίτα	1390	0.17	900
Ζώα	524	0.365	2923

### 3.6. Παραμετρική μελέτη

Η παραμετρική μελέτη αφορά το μέγεθος και τον τύπο των ανοιγμάτων και εξετάστηκε στο 2D μοντέλο. Πέραν της αρχικής γεωμετρίας που αντιστοιχεί με τα ανακλινόμενα παράθυρα στον πραγματικό θάλαμο εξετάστηκαν 2 τροποποιήσεις: α) αύξηση στο ύψος του κορφιά κατά 10%, β) τέσσερις περιπτώσεις με κατακόρυφα ανοίγματα τα οποία αφήνουν ελεύθερο το 12.5%, 25%, 50% και 75% της επιφάνειας των ανοιγμάτων αντίστοιχα. Να σημειωθεί ότι στην περίπτωση των ανακλινόμενων ανοιγμάτων με γωνία  $30^\circ$  το ελεύθερο άνοιγμα αντιστοιχεί στο 58% της επιφάνειας του συνολικού ανοίγματος.

Σε ότι αφορά τις εξωτερικές κλιματικές συνθήκες η προσομοίωση αναφοράς της πραγματικής γεωμετρίας αναφέρονται στην 2/5/2015 ώρα 23:00 με εξωτερική θερμοκρασία αέρα  $15.7^\circ\text{C}$ , ταχύτητα ανέμου στο επίπεδο του κτιρίου  $2.2 \text{ m/s}$ , επίπεδο τύρβης  $13.1\%$  και σχετική υγρασία  $64.4\%$ . Εκτός αυτών των συνθηκών εξετάστηκαν άλλες δύο ταχύτητες ανέμου ( $1.7 \text{ m/s}$  και  $0.78 \text{ m/s}$ ) καθώς και άλλες δύο περιπτώσεις εξωτερικής θερμοκρασίας ( $0^\circ\text{C}$  και  $30^\circ\text{C}$ ). Άρα το σύνολο των παραμετρικών μελετών συνοψίζεται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 2. Παραμετρική μελέτη για 2D γεωμετρία

Γεωμετρία	Ταχύτητα αέρα, $u_x$ [ $\text{m/s}$ ]	Θερμοκρασία εξωτερικού αέρα [ $^\circ\text{C}$ ]
Αρχική γεωμετρία	2.2	15.7
1 <sup>η</sup> τροποποίηση (κορφιάς)	2.2	15.7
2 <sup>η</sup> τροποποίηση άνοιγμα 12.5%	2.2	15.7
2 <sup>η</sup> τροποποίηση άνοιγμα 25%	2.2	15.7
2 <sup>η</sup> τροποποίηση άνοιγμα 50%	2.2	15.7
2 <sup>η</sup> τροποποίηση άνοιγμα 75%	2.2	15.7
Αρχική γεωμετρία	1.7	15.7
Αρχική γεωμετρία	0.78	15.7
Αρχική γεωμετρία	2.2	0
Αρχική γεωμετρία	2.2	30

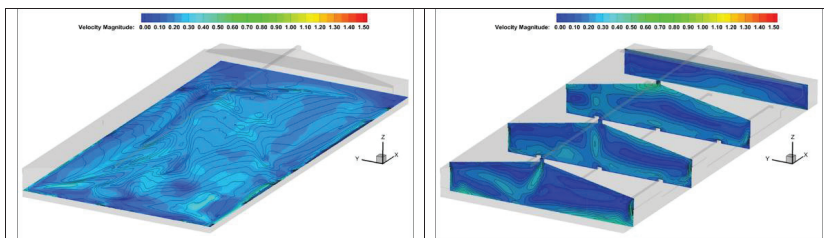
## 4. Αποτελέσματα

### 4.1. Τρισδιάστατο μοντέλο

Στην περίπτωση της προσομοίωσης του 3D μοντέλου του ροϊκού πεδίου η οποία χρησιμοποιήθηκε για την πιστοποίηση τα ανοίγματα ήταν πλήρως καλυμμένα με τις πλαστικές σίτες συνεπώς ο αερισμός γίνεται κυρίως λόγω θερμικής άνωσης. Όλα τα ανοίγματα θεωρούνται επιφάνειες με ατμοσφαιρική πίεση. Το έδαφος θεωρείται αδιαβατικός τοίχος. Οι τοίχοι θεωρούνται ισοθερμοκρασιακοί με τιμές: α) Τουβλοποιία  $20.09^\circ\text{C}$ , β) Ανοίγματα κλειστά  $20.18^\circ\text{C}$ , γ) Οροφή  $22.27^\circ\text{C}$ , δ) Ανοίγματα καλυμμένα με

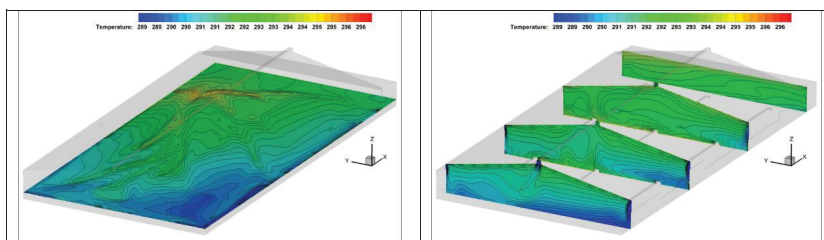
λαμαρίνα 17.78°C. Η μέση θερμοκρασία στο εσωτερικό του θαλάμου σύμφωνα με τις μετρήσεις είναι 20.09°C. Οι εξωτερικές συνθήκες που λαμβάνονται υπόψη στα ανοίγματα είναι θερμοκρασία 15.7 °C, σχετική υγρασία 64.4 %, και συγκέντρωση αμμωνίας 0 [ppm]. Οι τιμές θερμοκρασίες λαμβάνονται κατά προσέγγιση ομοιόμορφες, κάτι που συναινεί στο γεγονός της νυκτερινής προσομοίωσης.

Στο Σχήμα 6 δίνονται οι ισοϋψείς ταχύτητας σε επίπεδο με στάθμη 1 m από το έδαφος καθώς και οι ισοϋψείς ταχύτητας σε κατακόρυφες τομές μέσα στο θάλαμο για την 2/5/2015 ώρα 23.00. Το γεγονός ότι στο πάνω αριστερό μέρος του θαλάμου υπάρχει το αμελκτήριο και όχι άνοιγμα ευθύνεται για τη διαφοροποίηση του ροϊκού πεδίου κατά μήκος του θαλάμου ενώ η λειτουργία των ανοιγμάτων οροφής και οριζοντίων για τη διαφοροποίηση της κατακόρυφες τομές.



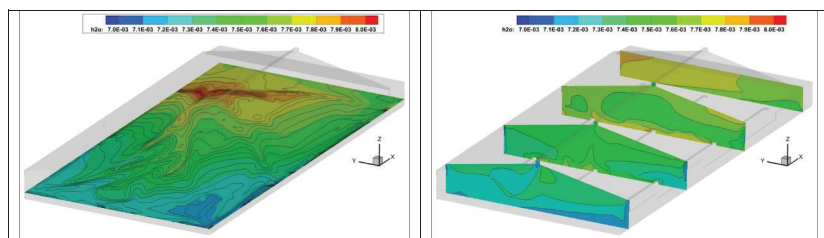
Σχήμα 6. Ισοϋψείς ταχύτητας

Στο Σχήμα 7 δίνονται οι ισοϋψείς της θερμοκρασίας σε επίπεδο ύψους 1 m από το έδαφος και σε κατακόρυφες τομές. Το πεδίο θερμοκρασιών φαίνεται να επηρεάζεται από το πεδίο ροής δίνοντας υψηλές θερμοκρασίες κοντά στην είσοδο του αμελκτηρίου.



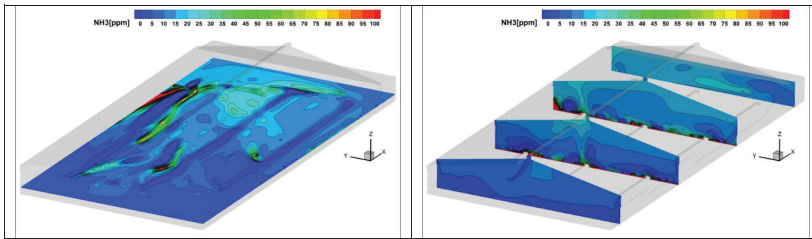
Σχήμα 7. Ισοϋψείς θερμοκρασίας

Στο Σχήμα 8 δίνονται ισοϋψείς της απόλυτης υγρασίας για οριζόντιο επίπεδο 1 m και κατακόρυφες τομές. Επίσης το πεδίο υγρασίας ακολουθεί το πεδίο θερμοκρασίας με αύξηση της απόλυτης υγρασίας κοντά στην είσοδο του αμελκτηρίου



Σχήμα 8. Ισοϋψείς συγκέντρωσης απόλυτης υγρασίας

Τέλος στο σχήμα 9 δίνονται οι ισοϋψείς της αμμωνίας η οποία πηγάζει από τη στρωμνή και διαχέεται ανάλογα με το θερμικό και ροϊκό πεδίο. Έτσι εμφανίζει μέγιστες συγκεντρώσεις κοντά στη στρωμνή και σε περιοχές με φτωχό αερισμό όπου παρατηρούνται ανακυκλοφορίες.

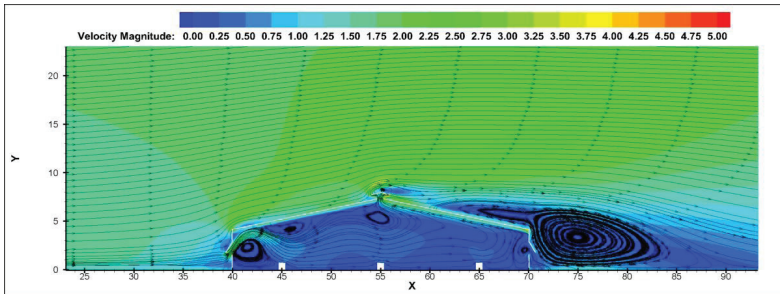


Σχήμα 9. Ισοΰψεις συγκέντρωσης αμμωνίας

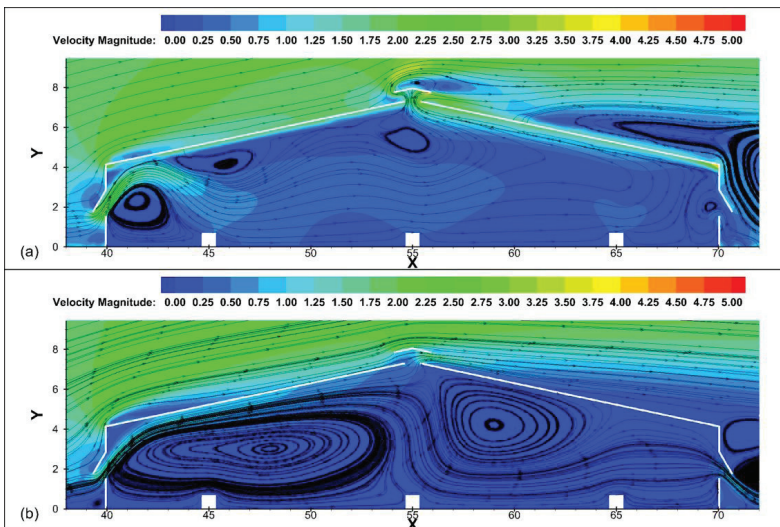
## 4.2. Διδιάστατο μοντέλο

### 4.2.1. Ροϊκά πεδία

Στο Σχήμα 10 δίνεται το συνολικό ροϊκό πεδίο για την αρχική γεωμετρία ενώ στο Σχήμα 11 δίνεται λεπτομερέστερα το ροϊκό πεδίο μέσα στο θάλαμο της βασικής περίπτωσης (α) και για τον θάλαμο της 1ης τροποποίησης (β) με την αύξηση του ύψους του κορφιά κατά 10%. Ακόμα και αυτή η μικρή τροποποίηση στη γεωμετρία διαφοροποιεί τη βασική μορφή του ροϊκού πεδίου δημιουργώντας μια ανακυκλοφορία στο κέντρο του θαλάμου αλλά και στις μέγιστες και ελάχιστες τιμές ταχυτήτων.

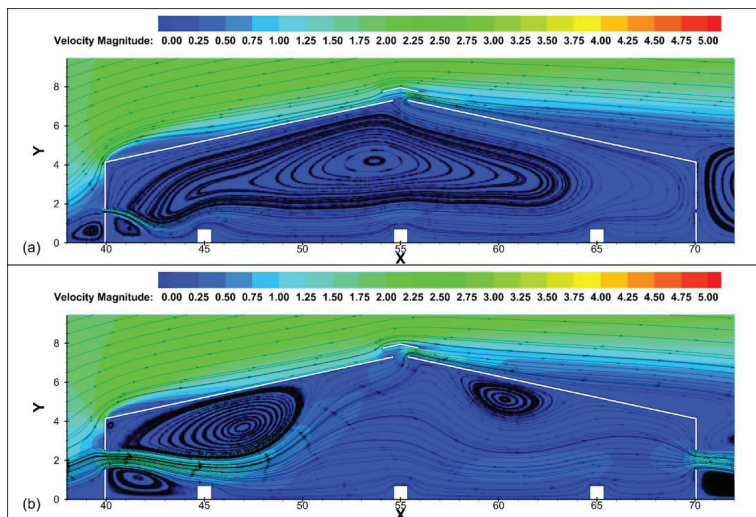


Σχήμα 10. Συνολικό ροϊκό πεδίο αρχικής γεωμετρίας



Σχήμα 11. Ροϊκό πεδίο μέσα στο θάλαμο της αρχικής γεωμετρίας (α) και της και της πρώτης τροποποίησης (β)

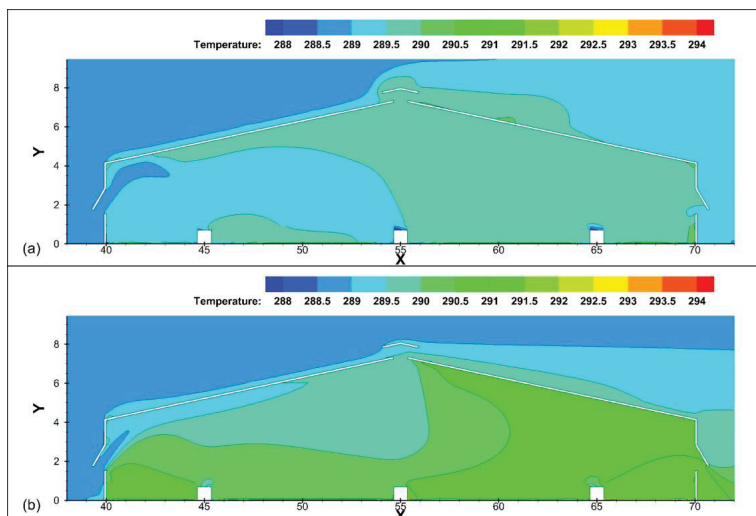
Στο Σχήμα 12 δίνονται τα αντίστοιχα ροϊκά πεδία της 2<sup>ης</sup> τροποποίησης της αρχικής γεωμετρίας για ανοίγματα 12.5% και 75% αντίστοιχα με το ύψος κορφιά να παραμένει ίδιο με αυτό της αρχικής γεωμετρίας. Παρατηρείται ότι σημειώνονται τροποποιήσεις του βασικού ροϊκού πεδίου τόσο συγκριτικά με την αρχική γεωμετρία όσο και ανάμεσα στις δύο περιπτώσεις της 1<sup>ης</sup> τροποποίησης. Ανάλογα με τη γεωμετρία των ανοιγμάτων και για τις ίδιες εξωτερικές συνθήκες, αλλάζει η λειτουργία του αερισμού, τα ανοίγματα που χρησιμοποιούνται και οι μηχανισμοί που αξιοποιούνται.



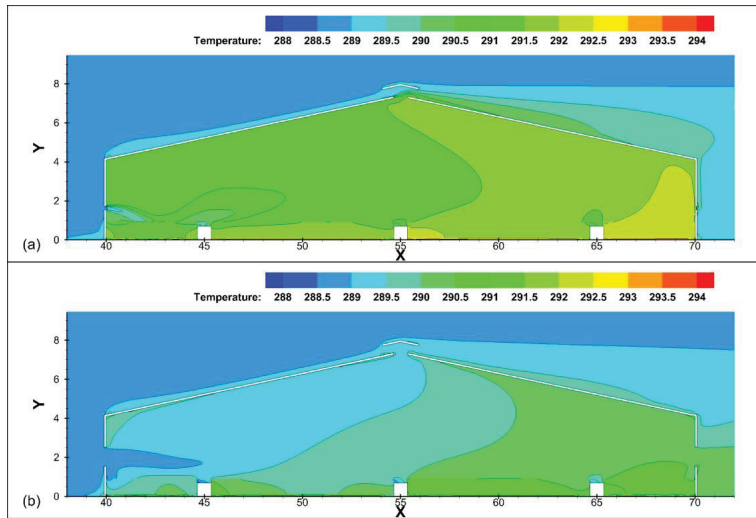
Σχήμα 12. Ροϊκό πεδίο θαλάμου 2ης τροποποίησης με ανοίγματα 12.5%(α) και με ανοίγματα 75% (β)

#### 4.2.2. Θερμοκρασιακά πεδία

Στο Σχήμα 13 παρατίθενται τα θερμοκρασιακά πεδία που αναπτύσσονται μέσα στο θάλαμο για την αρχική γεωμετρία και την 1<sup>η</sup> τροποποίηση και στο Σχήμα 14 για τις δύο περιπτώσεις της 2<sup>ης</sup> τροποποίησης. Η μεταβολή του ροϊκού τροποποιεί σημαντικά το θερμοκρασιακό πεδίο.



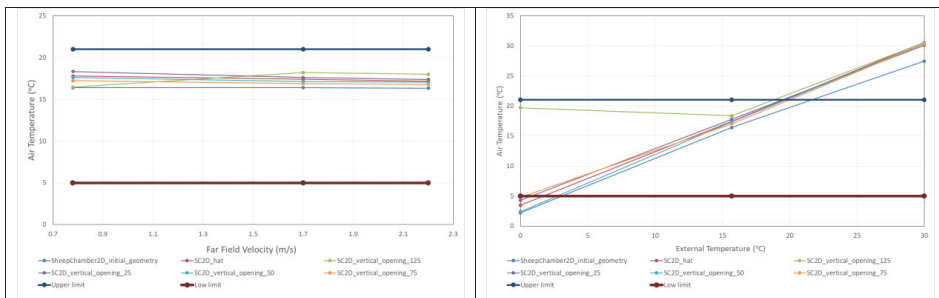
Σχήμα 13. Θερμοκρασιακό πεδίο θαλάμου αρχικής γεωμετρίας (α) και πρώτης τροποποίησης (β)



Σχήμα 14. Θερμοκρασιακό πεδίο θαλάμου δεύτερης τροποποίησης για ανοίγματα 12.5% (α) και για ανοίγματα 75% (β)

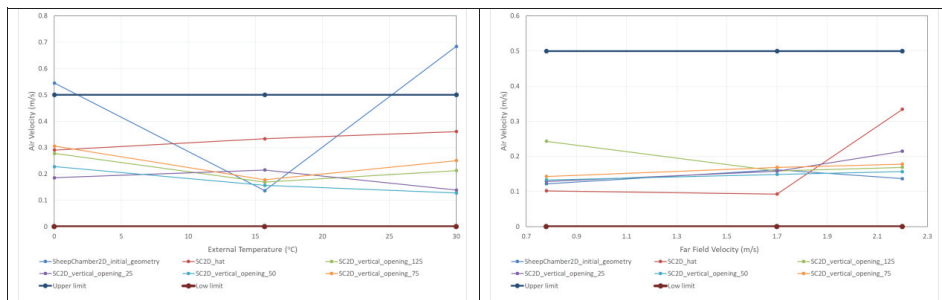
#### 4.2.3. Έλεγχος συνθηκών θερμικής άνεσης

Στο Σχήμα 15 δίνεται η μέση θερμοκρασία στο επίπεδο του λαιμού (70 cm) των ζώων συναρτήσει της εξωτερικής θερμοκρασίας και της εξωτερικής ταχύτητας αέρα. Σε κάθε περίπτωση δίνονται και τα ανεκτά άνω και κάτω όρια των κλιματικών συνθηκών για τα ζώα. Για εξωτερική θερμοκρασία 15.7 °C, η θερμοκρασία στο επίπεδο των ζώων δε τίθεται ποτέ εκτός ορίων θερμικής άνεσης. Σε ότι αφορά την περίπτωση υψηλής εξωτερικής θερμοκρασίας, σε καμιά περίπτωση δεν μπορεί να επιτευχθεί θερμική άνεση χωρίς χρήση κάποιας μεθόδου δροσισμού. Σε ότι αφορά την περίπτωση χαμηλής εξωτερικής θερμοκρασίας θερμική άνεση πετυχαίνει μόνο η γεωμετρία που αντιστοιχεί στη 2η τροποποίηση με μέγεθος ανοίγματος 12.5%.

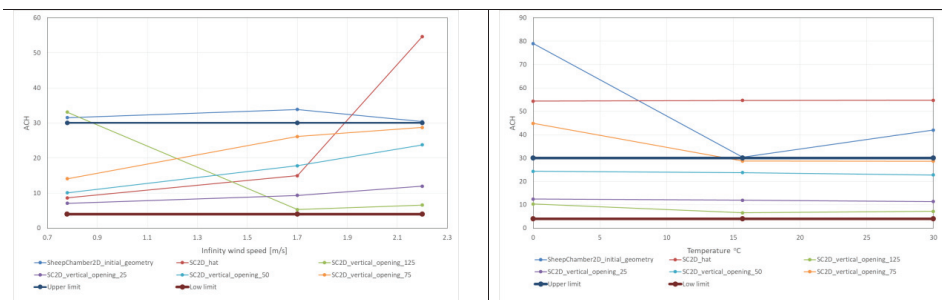


Σχήμα 15. Μέση θερμοκρασία στο επίπεδο του λαιμού των ζώων συναρτήσει της εξωτερικής ταχύτητας αέρα θερμοκρασίας (αριστερά) και της εξωτερικής θερμοκρασίας αέρα (δεξιά)

Στο Σχήμα 16 παρουσιάζεται η μέση ταχύτητα αέρα και πάλι στο επίπεδο του λαιμού των ζώων συναρτήσει της εξωτερικής θερμοκρασίας και της εξωτερικής ταχύτητας αέρα. Η αρχική γεωμετρία σε ακραίες εξωτερικές θερμοκρασίες διαμορφώνει εσωτερικό ροϊκό πεδίο που οδηγεί σε ταχύτητες αέρα μη ανεκτές από τα ζώα στο επίπεδο των ζώων, ενώ και οι δύο τροποποιήσεις εξασφαλίζουν ανεκτό ροϊκό πεδίο στο επίπεδο των ζώων. Ενώ, στο Σχήμα 17 δίνεται ο ρυθμός αερισμού ACH συναρτήσει της εξωτερικής θερμοκρασίας και της εξωτερικής ταχύτητας αέρα για τις εξεταζόμενες γεωμετρίες. Η αρχική γεωμετρία και η 1η τροποποίηση (γεωμετρίες με τα ανοίγματα σε ανάκλιση) δίνουν ρυθμούς αερισμού μεγαλύτερους από τους ζητούμενους. Το ίδιο ισχύει και για τη 2η τροποποίηση με άνοιγμα 75%. Σε όλες τις περιπτώσεις εξασφαλίζεται η ελάχιστη απαιτούμενη ποσότητα αερισμού.



Σχήμα 16. Μέση ταχύτητα αέρα στο επίπεδο του λαιμού των ζώων συναρτήσει της εξωτερικής θερμοκρασίας (αριστερά) και της εξωτερικής ταχύτητας αέρα (δεξιά)



Σχήμα 17. Συνολικός αερισμός θαλάμου συναρτήσει εξωτερικής ταχύτητας αέρα (αριστερά) και της εξωτερικής θερμοκρασίας (δεξιά)

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι γεωμετρίες με ανακλιόμενα ανοίγματα αξιοποιούν περισσότερο το άνοιγμα στον κορφιά ακόμα και στις περιπτώσεις της εξαναγκασμένης συναγωγής. Οι γεωμετρίες με κάθετα ανοίγματα αξιοποιούν κυρίως το κατάντη άνοιγμα σε περιπτώσεις εξαναγκασμένης συναγωγής ενώ σε περιπτώσεις που η εξαναγκασμένη συναγωγή είναι συγκρίσιμη με τη φυσική συναγωγή λόγω θερμικής άνωσης αξιοποιούν και το άνοιγμα στον κορφιά. Με βάση τα παραπάνω ως βέλτιστη προκρίνεται η γεωμετρία με κάθετα ανοίγματα τα οποία θα είναι δυνατό να μεταβάλλουν το μέγεθος του ανοίγματος ανάλογα με τις εξωτερικές συνθήκες από 12.5 έως 50% του ανοίγματος σε ύψος που ξεκινάει από 1.5 m. Θεωρητικά κατά τους χειμερινούς μήνες το μέγεθος αυτό των ανοιγμάτων εξασφαλίζει τον απαιτούμενο αερισμό χωρίς να δημιουργεί συνθήκες ψύχους για τα ζώα. Αντιθέτως για υψηλή εξωτερική θερμοκρασία ο φυσικός αερισμός πρέπει να εξασφαλίσει συνθήκες θερμικής άνεσης. Συνεπώς κρίνεται απαραίτητη η χρήση συστήματος δροσισμού εξατμιστικής ψύξης κατά τους θερινούς μήνες προκειμένου να εξασφαλιστεί και σε αυτές τις συνθήκες θερμική άνεση και να αποφευχθεί θερμικό στρες. Επίσης κρίνεται απαραίτητος ο χειρισμός των ανοιγμάτων με αυτόματο τρόπο συναρτήσει τιμών θερμοκρασίας και ταχύτητας ανέμου εντός ή εκτός του προβατοστασίου.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία υλοποιήθηκε στο πλαίσιο του προγράμματος ΠΑΒΕΤ 2013 'Ανάπτυξη και αποτίμηση εξοπλισμού και κατασκευαστικών πρακτικών για την παραγωγή αειφορικών αιγοπροβατοτροφικών προϊόντων' το οποίο χρηματοδοτήθηκε από τη ΓΓΕΤ.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Νικίτα – Μαρτζοπούλου Χ., 2006, "Κτηνοτροφικές εγκαταστάσεις", Εκ. Γιαχούδη, Θεσσαλονίκη

- [2] Βαλεγράκης Γ.Ε., 2009, “Σταβλισμός – Υγιεινή” Σημειώσεις εργαστηρίου Ζωοτεχνίας, Τμ. Κτηνιατρικής ΑΠΘ
- [3] Παναγάκης Π., 2015, “Αιολοπροβατοστάσια”, Σημειώσεις Τμήματος Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων & Γεωργικής Μηχανικής, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών
- [4] Ergum S., 1952, ‘Fluid flow through packed columns’, *Chemical Engineering Progress*, 48, pp. 89-94
- [5] Zhang Y., Ghaly A.E. and Li B., 2012, “Physical properties of wheat straw varieties cultivated under different climatic and soil conditions in three continents”, *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 5(2), pp 98-106
- [6] Baxevanou C., Fidaros D., Papanastasiou D., Bartzanas T. and Kittas C., 2017, “Numerical simulation of flow and transport phenomena in a livestock building”, in press *Environmental Engineering and Management Journal*
- [7] Bjerg B., Cascone G., Leel-B., Bartzanas T., Norton T., Hong S-W., Seoll-H., Banhazi T., Liberati P., Marucci A. And Zhang G., 2013, “Modelling of ammonia emissions from naturally ventilated livestock buildings. Part 3: CFD modelling”, *Biosystems Engineering*, 116(3), pp. 259-275
- [8] Ecim-Djuric O. and Topisirovic G., 2010, “Energy efficiency optimization of combined ventilation systems in livestock buildings”, *Energy and Buildings*, 42, pp. 1165-1171
- [9] Norton T., Sun D.-W., Grant J., Fallon R. and Dodd V., (2007), “Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the modelling and design of ventilation systems in the agricultural industry: A review”, *Bioresource Technology*, 98, pp. 2386-2414.
- [10] Norton T., Grant J., Fallon R. and Sun D-W., 2009, “Assessing the ventilation effectiveness of naturally ventilated livestock buildings under wind dominated conditions using computational fluid dynamics”, *Biosystems Engineering*, 103, pp.78-99.
- [11] Osczevski R. and Bluestein M., 2005, “The New Wind Chill Equivalent Temperature Chart”, *Bulletin of the American Meteorological Society*, pp. 1453–1458
- [12] Bernabucci U., Lacetera N., Danieli P., Bani P., Nardone A. and Ronchi B., 2009, “Influence of different periods of exposure to hot environment on rumen function and diet digestibility in sheep”, *International Journal of Biometeorology*, 53, pp. 387-395
- [13] Papanastasiou D., Fidaros D., Bartzanas T. and Kittas C., 2011, “Monitoring particulate matter levels and climate conditions in a Greek sheep and goat livestock building”, *Environmental Monitoring and Assessment*, 183, pp. 285-296
- [14] Fidaros D., Baxevanou C., Bartzanas Th. and C. Kittas, 2016, “Numerical study of mechanically ventilated broiler house equipped with evaporative pads”, *CIGR-Ag Eng 2016*, Aarhus, Denmark, 26-29 June 2016
- [15] Papanastasiou D., Bartzanas T., Panagakis P., Zhang G. and Kittas C., 2016, “Study of heat-stress levels in naturally ventilated sheep barns during heat waves: development and assessment of regression models”, *International Journal of Biometeorology* 60, pp. 1637 – 1644.
- [16] Papanastasiou D. and Bartzanas T., 2016, “Air quality and climate interactions in a naturally ventilated sheep barn under hot weather”, *International Conference of Agricultural Engineering, CIGR – AgEng 2016*, 26 – 29 June, Aarhus, Denmark. Proceedings in electronic version
- [17] Baxevanou C., Fidaros D. and Tsangrassoulis A., 2017, “Management of natural ventilation in high-rise building – a CFD study”, *Procedia Environmental Sciences*, 38, pp. 428-432
- [18] Chiu Y.H. and Etheridge D.W., 2007, “External flow effects on the discharge coefficients of two types of ventilation opening”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 95 pp. 225–252
- [18] Ferziger, J. and Peric, M., 1996. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Springer, London.
- [19] Pedersen S. and Sallvik K., 2002, “Heat and moisture production at animal and house levels”, 4<sup>th</sup> Report of Working Group on Climatology of Animal Houses. Research Centre Bygholm, Danish Institute of Agricultural Sciences, Horsens, Denmark
- [20] Woodson W.E., Tillman B. and Tillman P., 1992, “Human factors design handbook: information and guidelines for the design of systems, facilities, equipment, and products for human use”, McGraw-Hill, New York, USA
- [21] Battye W., Aneja V.P. and Roelle P.A., 2003, “Evaluation and improvement of ammonia emissions inventories”, *Atmospheric Environment* 37, pp. 3873-3883

## ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΡΟΗΣ ΑΕΡΑ ΔΙΑ ΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΚΤΗΡΙΟΥ ΜΕ ΑΝΟΙΓΜΑΤΑ

**Β. Παππά<sup>1</sup>, Μ. Πάνος<sup>2</sup>, Μ. Μανωλέσος<sup>3</sup>, Δ. Μπούρης<sup>4</sup>**

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο 15780  
Ζωγράφου

e-mail: <sup>1</sup>[vaswpappa@gmail.com](mailto:vaswpappa@gmail.com), <sup>2</sup>[meletpan@gmail.com](mailto:meletpan@gmail.com), <sup>3</sup>[marinos@fluid.mech.ntua.gr](mailto:marinos@fluid.mech.ntua.gr),  
<sup>4</sup>[dbouris@fluid.mech.ntua.gr](mailto:dbouris@fluid.mech.ntua.gr)

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ροή γύρω από κυβικής μορφής σώμα επί στερεής επιφάνειας έχει μελετηθεί στο παρελθόν τόσο αριθμητικά όσο και πειραματικά, λόγω της προφανούς συσχέτισης με την αντοχή δομικών στοιχείων που εκτίθενται σε ανέμους υψηλών ταχυτήτων. Ωστόσο, ακόμη και σε ανέμους χαμηλών ταχυτήτων, ο ρυθμός αερισμού, η διείσδυση αέρα και τελικά η ποιότητα αέρα στο εσωτερικό και εξωτερικό περιβάλλον του κτηρίου, εξαρτώνται από το πεδίο ροής και τη κατανομή πιέσεων στις εξωτερικές του επιφάνειες. Τα χαρακτηριστικά του ανάντι ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος είναι καθοριστικά για την εξάρτηση αυτή αλλά η συσχέτισή τους με θέματα αερισμού και ποιότητας αέρα δεν έχει διερευνηθεί επαρκώς μέχρι σήμερα. Στη παρούσα εργασία, εξετάζονται πειραματικά και υπολογιστικά οι στοιχειώδεις καταστάσεις ενός κυβικής μορφής πρότυπου κτηρίου που εκτίθεται στη ροή δύο διαφορετικών τυρβωδών οριακών στρωμάτων. Το κτηριακό κέλυφος έχει ανοίγματα που επιτρέπουν τη διείσδυση αέρα στο εσωτερικό του και διερευνάται η αλληλεπίδραση της εσωτερικής και εξωτερικής ροής και κατανομής πίεσης και οι επιπτώσεις στην ανανέωση αέρα στο εσωτερικό και εξωτερικό περιβάλλον του κτηρίου.

Όλες οι μετρήσεις έγιναν στο μεγάλο χώρο δοκιμής (3.5m x 2.5m x 12.0m – πλάτος x ύψος x μήκος) της αεροσήραγγας του Τομέα Ρευστών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ. Επιτεύχθηκε ενιαία κλίμακα γεωμετρικής και δυναμικής ομοιότητας ~1:400 για το κτήριο και το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα. Μετρήθηκαν κατατομές ταχύτητας και τυρβώδους κινητικής ενέργειας με ανεμόμετρο θερμού νήματος, κατανομές πιέσεων στις εξωτερικές επιφάνειες του κτηρίου με διαφορικό μανόμετρο και αυτόματο σαρωτή πιέσεων και κατανομές μέσω ταχυτήτων και χαρακτηριστικών τύρβης στο εξωτερικό περιβάλλον του κτηρίου με στερεοσκοπικό PIV.

Με μη εμπορικό λογισμικό υπολογιστικής ρευστομηχανικής, έγιναν προσομοιώσεις μόνιμης κατάστασης της τρισδιάστατης, τυρβώδους ροής γύρω από το πρότυπο κτήριο. Οι προσομοιώσεις συμπεριλάμβαναν τόσο το εξωτερικό όσο και το εσωτερικό του κτηρίου και εκμεταλλεύομενοι τεχνικές τοπικής πύκνωσης της χωρικής διακριτοποίησης (πλέγματος) επιτεύχθηκε ο υπολογισμός του ρυθμού αερισμού και διείσδυσης αέρα, ο οποίος συσχέτιστηκε με τα χαρακτηριστικά του ανάντι οριακού στρώματος.

Παρατηρείται σημαντική εξάρτηση του πεδίου ροής γύρω από το κτήριο αλλά και του ρυθμού ανανέωσης αέρα με το ανάντι οριακό στρώμα. Η εξάρτηση αυτή, ωστόσο, δεν είναι εμφανής στην κατανομή της πίεσης στις εξωτερικές επιφάνειες του κτηρίου. Αυτό έχει άμεσο ενδιαφέρον για τον υπολογισμό του αερισμού με τις ευρέως εφαρμοζόμενες εμπειρικές μεθόδους, οι οποίες στηρίζονται σε αυτή τη κατανομή.

**Λέξεις Κλειδιά:** *Αερισμός Κτηρίων, Ατμοσφαιρικό Οριακό Στρώμα, Υπολογιστική Ρευστομηχανική, Αεροδυναμική Σήραγγα, Particle Image Velocimetry*

## 1) ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο μηχανικός αερισμός των κτηρίων αποτελεί στις ημέρες μας μια κοινώς αποδεκτή πρακτική, λόγω της συνεχούς ανάγκης για παροχή θερμικής άνεσης και καλής ποιότητας αέρα σε κλειστούς εσωτερικούς χώρους. Η κατανάλωση ενέργειας η οποία σχετίζεται με τη λειτουργία της θέρμανσης, του αερισμού και του κλιματισμού (HVAC) είναι σημαντική: σύμφωνα με μελέτες [1], σχεδόν το 68% της συνολικής ενέργειας η οποία χρησιμοποιείται για παροχή υπηρεσιών και κατοικιών, αποδίδεται στα συστήματα HVAC. Από την άλλη μεριά, ο φυσικός αερισμός προσάγει νωπό εξωτερικό αέρα χωρίς κατανάλωση ενέργειας ενώ ταυτόχρονα διευκολύνει την αντιμετώπιση προβλημάτων υγείας που συνδέονται με ανεπαρκή συντήρηση των συστημάτων κλιματισμού (HVAC). Για αυτούς τους λόγους, τα τελευταία χρόνια επικεντρώνεται το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας, στην ενσωμάτωση του φυσικού αερισμού ως παράμετρο κατά το σχεδιασμό των κτηρίων.

Ο σωστός σχεδιασμός ενός κτηρίου που υπόκειται σε φυσικό αερισμό αποτελεί μια σύνθετη και απαιτητική διαδικασία λόγω της πολυπλοκότητας των φυσικών φαινομένων. Συγκεκριμένα, η ροή του αέρα διαμέσου ενός ανοίγματος, είτε η ροή επιβάλλεται είτε παρέχεται κατά τυχαίο τρόπο, εξαρτάται από τη διαφορά πίεσης μεταξύ των πλευρών του ανοίγματος καθώς επίσης και από την αντίσταση του ίδιου του ανοίγματος που αντιτίθεται στη ροή του αέρα. Η αντίσταση του ανοίγματος αποτελεί συνάρτηση του ίδιου του σχήματος του ανοίγματος και των διαστάσεών του. Η διαφορά πίεσης παράγεται από την ένταση του ανέμου και από ανωστικές δυνάμεις. Αυτός είναι και ο λόγος που έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές μελέτες προκειμένου να κατανοηθεί εις βάθος η μεταξύ τους αλληλεπίδραση. Σύμφωνα με την εργασία των [2], συμπεραίνεται ότι, υπό ορισμένες συνθήκες, η επίδραση του ανέμου μπορεί να θεωρηθεί μη επωφελής, καθώς μπορεί να μειώσει το ρυθμό αερισμού ο οποίος είναι αποτέλεσμα μόνο ανωστικών δυνάμεων. Στην παρούσα μελέτη, το ενδιαφέρον εστιάζεται στη μελέτη του φυσικού αερισμού λόγω της έντασης του ανέμου.

Για την απόκτηση αξιόπιστων πληροφοριών σχετικά με τη ροή του αέρα και την κατανομή της πίεσης εντός και εκτός φυσικά αεριζόμενου κτηριακού κελύφους πραγματοποιούνται μετρήσεις πλήρους κλίμακας. Ωστόσο, προτιμώνται οι δοκιμές σε μικρής κλίμακας μοντέλα τα οποία διεξάγονται εντός αεροσήραγγας, μιας και επιτρέπουν τον έλεγχο της ταχύτητας του ανέμου και του προσανατολισμού του κτηρίου καθώς και περαιτέρω συνδυασμούς των μεταξύ τους διατάξεων.

Μια εναλλακτική προσέγγιση της λεπτομερούς ανάλυσης του φυσικού αερισμού βασίζεται στη χρήση της Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής (CFD) η οποία επιτρέπει την αριθμητική επίλυση των εξισώσεων που διέπουν το φυσικό πρόβλημα και οι οποίες περιγράφουν το πεδίο ροής. Η αυξημένη χρήση του CFD σε τέτοιου είδους μελέτες αποδίδεται στην ισχυρή αλληλεπίδραση μεταξύ της εξωτερικής και της εσωτερικής ροής αέρα όπου ο φυσικός αερισμός συμβαίνει διαμέσου μεγάλων ανοιγμάτων, γεγονός που αδυνατεί να προβλεφθεί μέσω αναλυτικών ή ημιεμπειρικών μοντέλων.

Μεταξύ των διαθέσιμων μοντέλων, οι εξισώσεις RANS (Reynolds-Averaged Navier Stokes) και η μεθοδολογία LES (Large-Eddy Simulation) είναι τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα μοντέλα [3]. Η επίλυση των RANS εξισώσεων βασίζεται στο χρονικό μέσο όρο του πεδίου ροής που δίνει τις εξισώσεις, το οποίο σημαίνει ότι η αστάθεια θεωρείται μέρος της τύρβης και λαμβάνεται η μέση τιμή της. Στη μοντελοποίηση LES επιλύονται πλήρως χωρικά και χρονικά οι μεγάλες δίνες, ενώ οι μικρές, που επηρεάζουν πολύ λιγότερο τη μέση ροή και τα τυρβώδη χαρακτηριστικά της, μοντελοποιούνται με απλά μοντέλα, καθώς είναι ισότροπες. Αν και η μεθοδολογία LES είναι εγγενώς, μια περισσότερο ακριβής μέθοδος για υπολογιστικές προσομοιώσεις ροών ανέμου, η χρήση της συνεπάγεται (πολύ) μεγάλη αύξηση των υπολογιστικών απαιτήσεων (π.χ.παράγοντας  $>10^2$ ) και ως εκ τούτου θεωρείται μια υπολογιστικά δυσχερής επιλογή.

Ανατρέχοντας στην βιβλιογραφική ανασκόπηση η οποία παρέχει μια σύνοψη των υπολογιστικών προσομοιώσεων που χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη του φυσικού αερισμού και οι οποίες προσομοιώσεις έχουν επικυρωθεί είτε με πειράματα πλήρους κλίμακας (πειράματα πεδίου) είτε μειωμένης κλίμακας (πειράματα αεροσήραγγας) παρατηρείται έντονα η επιλογή επίλυσης των RANS εξισώσεων με μοντέλα τύρβης δύο εξισώσεων. Η πλειοψηφία των πρόσφατων δημοσιεύσεων δίνει μια τάση κατά την οποία συμπεραίνεται ότι η καλύτερη συμφωνία μεταξύ πειραματικών και αριθμητικών δεδομένων σε σχέση με τα πεδία

διανυσμάτων των μέσων ταχυτήτων και τις ισοϋείς καμπύλες της τυρβώδους κινητικής ενέργειας προκύπτει όταν εφαρμόζεται το μοντέλο τύρβης 2-εξισώσεων, SST k- $\omega$ . [4]

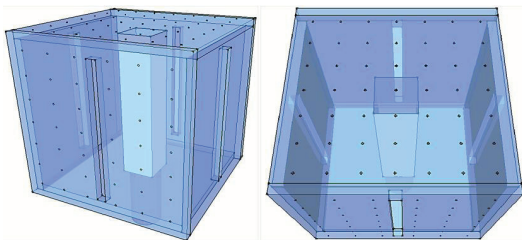
Συνεπώς στην παρούσα εργασία, εξετάζεται η υπολογιστική προσομοίωση για την περίπτωση κυβικής μορφής πρότυπου κτηρίου, εκτιθέμενο στη ροή δύο διαφορετικών ανάντι τυρβωδών οριακών στρωμάτων. Η πιστοποίηση των υπολογιστικών αποτελεσμάτων επιτεύχθηκε με τα πειραματικά αποτελέσματα μειωμένης κλίμακας που διεξήχθησαν στην αεροσήραγγα. Εξετάζεται η επίδραση των τυρβωδών χαρακτηριστικών του οριακού στρώματος, του προσανατολισμού του κύβου και της παρουσίας ανοιγμάτων στις κάθετες πλευρές του στη διαμόρφωση της επιφανειακής κατανομής πίεσης καθώς επίσης και στην επίδραση τους στον ρυθμό αερισμού του κτηριακού κελύφους.

Η εξάρτηση του αερισμού από παραμέτρους εκτός της κατανομής πίεσης στις εξωτερικές επιφάνειες του κτηρίου είναι βαρύνουσας σημασίας για την αξιολόγηση των εμπειρικών μεθόδων υπολογισμού του αερισμού.

## 2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

### 2.1 Περιγραφή του Πειράματος

Το σύνολο των μετρήσεων πραγματοποιήθηκαν στον μεγάλο χώρο δοκιμής (3.5m x 2.5m x 12.0m – πλάτος x ύψος x μήκος) της αεροσήραγγας του Τομέα Ρευστών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών, Ε.Μ.Π. Εντός της αεροσήραγγας τοποθετήθηκε κυβικό πρότυπο κτηρίου [7] (Εικόνα 1), το οποίο εξετάστηκε ως προς τη ροή του αέρα και ως προς διαφορετικές καταστάσεις ανάντι οριακού στρώματος. Το κυβικής μορφής κτήριο αποτελείται από πλευρικές τετράγωνων φύλλων Plexiglass και έχει διαστάσεις 0.11m x 0.11m x 0.11m (πλάτος x ύψος x μήκος). Η κάθε κατακόρυφη πλευρά περιελάμβανε ένα λεπτό κατακόρυφο άνοιγμα (0.90m x 0.06m), το οποίο αντιστοιχούσε περίπου, στο 4.5% του εμβαδού της. Εσωτερικά στο κέντρο του κύβου, υπήρχε μια κατακόρυφη στήλη τετραγωνικής διατομής με πλευρά 0.022m. Το πάχος του τοιχώματος και της οροφής ήταν ίσο με 0.005m. Κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων, προσομοιώθηκε ροή, με και χωρίς παρουσία ανοιγμάτων. Εξετάστηκε η περίπτωση ύπαρξης ανοιγμάτων στην ανάντη και κατάντη πλευρά του κύβου. Για αυτό το λόγο οι συνδέσεις στο εσωτερικό του κύβου καλύφθηκαν με δεύτερο φύλλο Plexiglass οπότε οι επιφάνειες παρέμειναν λείες και το μόνο εμπόδιο ήταν η κεντρική στήλη τετραγωνικής διατομής.



Εικόνα 1: Ο πρότυπος κύβος. [6]

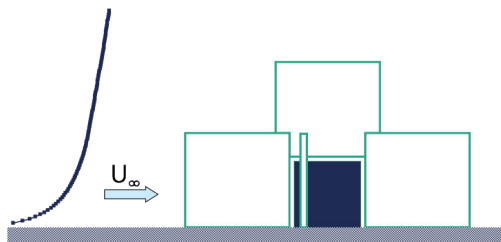
Δύο διαφορετικά ανάντι τυρβώδη οριακά στρώματα εξετάστηκαν χρησιμοποιώντας συνδυασμούς οβελίσκων (spires) και στοιχείων τραχύτητας κατά τη μέθοδο του Irwin [5]. Οι συνδυασμοί αυτοί επέτρεπαν τον έλεγχο της κατατομής της μέσης ταχύτητας, της επιφανειακής διαμητρικής τάσης καθώς επίσης της έντασης και ολοκληρωτικής κλίμακας μήκους της τύρβης.

Οι μετρήσεις κατατομής ταχύτητας και τύρβης [6] έγιναν με ανεμόμετρο μονού θερμού νήματος (TSI, IFA 300) με ταχύτητα δειγματοληψίας 10 kHz και χρόνο δειγματοληψίας 100s για κάθε σημείο. Οι τιμές αυτές προέκυψαν κατόπιν δοκιμών προκειμένου να λαμβάνονται στατιστικά σταθερά μεγέθη μέσης ταχύτητας και τύρβης. Οι μετρήσεις κατανομής πιέσεων [4] στις εξωτερικές επιφάνειες του κύβου έγιναν με διαφορικό μανόμετρο και αυτόματο σαρωτή

πίεσεων (FCO16, FCS421, Furness Controls Ltd). Η συχνότητα δειγματοληψίας των πιέσεων σε κάθε σημείο ήταν 50Hz για χρόνο 10s και η εκτιμώμενη αβεβαιότητα στο μετρούμενο αδιάστατο συντελεστή πίεσης Cp ήταν μικρότερη από 3% (95%).

Χρησιμοποιήθηκαν 2 κάμερες 4MPixel και ανεμόμετρο μονού θερμού νήματος για την πραγματοποίηση των δοκιμών με τη μεθοδολογία Stereo Particle Image Velocimetry (sPIV) [7]. Οι κάμερες τοποθετήθηκαν στις πλευρές του κυβικού μοντέλου και το φύλλο λείζερ κατευθύνθηκε στην επιθυμητή θέση μέσω ενός καθρέφτη ο οποίος τοποθετήθηκε εγκάρσια, στον άξονα της αεροσήραγγας, αρκετά πάνω από τον κύβο. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε 4 επίπεδα για προσανατολισμό  $0^\circ$ , όπως φαίνεται στην Εικόνα 2. Για κάθε επίπεδο, ελήφθησαν 1000 στιγμιότυπα και τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται αποτελούν τις μέσες τιμές των μετρούμενων μεγεθών.

Προτιμήθηκε και χρησιμοποιήθηκε ως χρόνος διαχωρισμού παλμών η τιμή των 85  $\mu\text{sec}$ , καθώς υψηλότερες τιμές αυξάνουν τη μέτρηση θορύβου και καθιστούν δυσκολότερη την ανίχνευση κορυφής. Η αντίστοιχη ελάχιστη ταχύτητα, η οποία αντιστοιχεί στην μετατόπιση του 0.1px, ήταν ίση με 0.12m/s σύμφωνα με τους [8] ενώ τιμές κάτω του ορίου αυτού δε θεωρούνται αξιόπιστες. Η μετατόπιση σωματιδίων ήταν σε όλες τις περιπτώσεις μικρότερη από το 1/4 της περιοχής ανάκτησης (interrogation area)  $32 \times 32\text{px}$  και χρησιμοποιήθηκαν επικαλύψεις 50%, οι οποίες οδηγούν σε απόσταση 1.8 mm μεταξύ διανυσμάτων σε όλες τις διαστάσεις.



Εικόνα 2: Πλευρική όψη των επιπέδων μέτρησης για προσανατολισμό  $0^\circ$ . Η ροή είναι από τα αριστερά στα δεξιά και ο κύβος παριστάνεται με το σκούρο μπλε χρωματισμό. [7]

Οι μετρημένες κατατομές μέσης ταχύτητας και έντασης τύρβης που χαρακτηρίζουν τα δύο οριακά στρώματα, μικρής (A) και μεγάλης (B) διάμεσης, απεικονίζονται στην Εικόνα 3. Θεωρώντας ότι η κατατομή μέσης ταχύτητας ( $\bar{u}$ ) καθ' ύψος ( $z$ ) ακολουθεί λογαριθμική κατανομή ( $\kappa=0.41$ ):

$$u = \left( \frac{u_*}{\kappa} \right) \ln \left( \frac{z}{z_0} \right), \quad u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad (1)$$

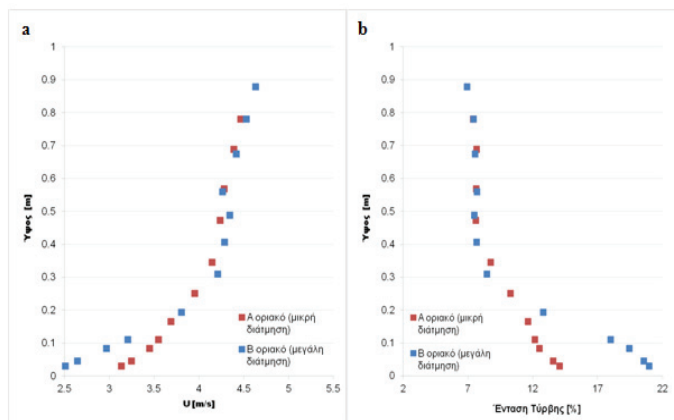
προκύπτουν οι τιμές της ταχύτητας διάμεσης  $u_*$  και του ύψους τραχύτητας  $z_0$ . Από την προσαρμογή προέκυψαν οι τιμές για το A οριακό στρώμα  $u_* = 0.19 \text{ m/s}$ ,  $z_0 = 0.05 \text{ mm}$  και για το B οριακό στρώμα  $u_* = 0.27 \text{ m/s}$ ,  $z_0 = 0.70 \text{ mm}$ . [4],[5]

Η τιμή της έντασης της τύρβης υπολογίζεται για τα δύο οριακά στρώματα από την σχέση:

$$I_u = z = \frac{u_{rms}}{u} \quad (2), \quad \text{όπου } u_{rms} = z \text{ η τυπική απόκλιση της ταχύτητας για δεδομένο ύψος η}$$

$$\text{οποία από τη σχέση } u_{rms} = z = \sqrt{u'^2} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i'^2 \quad (3)$$

Με βάση τις μετρημένες τιμές της ταχύτητας διάμεσης  $u_*$  και του ύψους τραχύτητας  $z_0$  καθώς και τις κατατομές της ολοκληρωτικής κλίμακας της τύρβης, κατά τη μεθοδολογία του Cook [9] επιτεύχθηκε κλίμακα ομοιότητας τόσο του πρότυπου κτηρίου όσο και του ανάντι τυρβώδους οριακού στρώματος ίση με 1:400.



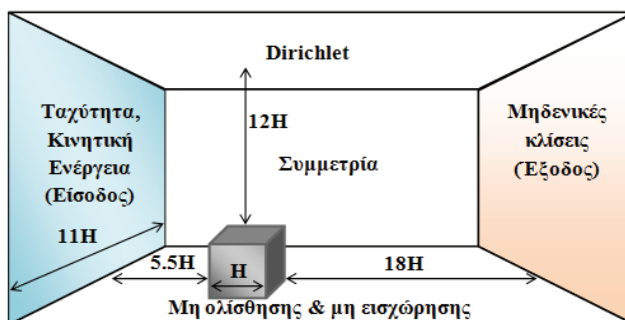
Εικόνα 3: Μετρημένες κατατομές μέσης ταχύτητας (α) και έντασης τύρβης (β) για τα δύο οριακά στρώματα μικρής [Α] και μεγάλης διάμετσης [Β]. [5],[6]

## 2.2 Υπολογιστική προσομοίωση

### 2.1.1. Γεωμετρία, υπολογιστικό χωρίο και πλέγμα

Το υπολογιστικό μοντέλο αντιπροσωπεύει το μοντέλο μειωμένης κλίμακας που χρησιμοποιήθηκε στις πειραματικές μετρήσεις της αεροσήραγγας. Το πάχος των τοιχωμάτων και του δαπέδου των 5 mm λήφθηκε υπόψιν κατά τις προσομοιώσεις.

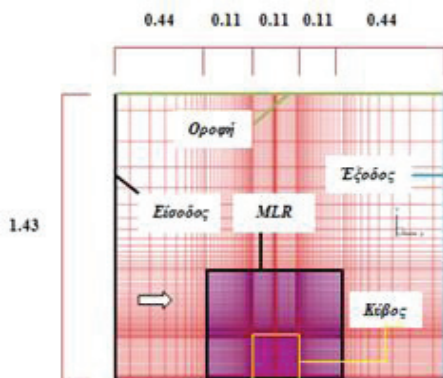
Το υπολογιστικό χωρίο κατασκευάστηκε βασιζόμενο στις συστάσεις που συντάχθηκαν στο COST Action 732 [10] και συμβαδίζουν με τις κατευθυντήριες γραμμές του AIJ για τις μελέτες περιβαλλοντικών επιπτώσεων των πεζών [11]. Πιο συγκεκριμένα, η ανάντη απόσταση μεταξύ της εισόδου και της προσήνεμης πρόσοψης του κτηρίου είναι ίση με 0.605m (5.5H), ενώ η απόσταση μεταξύ της υπήνεμης πρόσοψης του κτηρίου και της εξόδου είναι ίση με 1.98m (18H). Η απόσταση μεταξύ των πλευρικών τοιχωμάτων του κτηρίου και των πλευρικών επιφανειών του υπολογιστικού χωρίου είναι 0.55m (5H), και στις δύο πλευρές. Τέλος, το πλέγμα επεκτάθηκε κατά απόσταση ίση με 1.32m (12H), από την οροφή του κτηρίου. Συνεπώς, οι συνολικές διαστάσεις του υπολογιστικού χωρίου είναι 1.21m x 1.43m x 2.695m (πλάτος x ύψος x μήκος). (Εικόνα 4).



Εικόνα 4: Το υπολογιστικό χωρίο και οι οριακές συνθήκες

Η γεωμετρία που χρησιμοποιήθηκε στις υπολογιστικές προσομοιώσεις εξήχθη από μη εμπορικό λογισμικό, αφορά 3D δομημένο, καρτεσιανό υπολογιστικό πλέγμα, κάνοντας χρήση

εσωτερικού αλγορίθμου για τον ορισμό των στερεών περιοχών εντός του. Κατά τις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκαν 3 διαφορετικά δομημένα πλέγματα με συνολικό αριθμό κελιών  $3.3 \times 10^6$ ,  $5 \times 10^6$ ,  $8 \times 10^6$ . Οι πλευρές του κύβου ήταν διακριτοποιημένες με 50,60 και 78 κελιά σε κάθε κατεύθυνση, αντίστοιχα. Παρατηρήθηκε ότι το αραιότερο πλέγμα περιγράφει ικανοποιητικά το πεδίο ροής, εξασφαλίζει ικανοποιητικό βαθμό ανεξαρτησίας των αποτελεσμάτων από το πλέγμα με το μικρότερο υπολογιστικό κόστος. Αποφασίστηκε η δημιουργία ενός  $4^{ου}$  πλέγματος, ίδιου συνολικού αριθμού κελιών με το αραιότερο ( $\approx 3.3 \times 10^6$ ), ενσωματώνοντας την μεθοδολογία πολλαπλής τοπικής πύκνωσης (Multi-Local Refinement, MLR). Οι πλευρές του κύβου ήταν διακριτοποιημένες με 52 κελιά ανά κατεύθυνση ενώ επιλέχθηκε ως περιοχή πύκνωσης η γεωμετρία του κύβου, επεκτεινόμενη κατά 1H ανάντι και κατόντι του κύβου, κατά 1H στις πλευρικές επιφάνειες και κατά 1.5H άνωθεν της οροφής του κύβου (Εικόνα 5). Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων της Ενότητας 3, αφορούν αποτελέσματα που έχουν εξαχθεί από το πλέγμα με ενσωματωμένη τοπική πύκνωση.



Εικόνα 5: Υπολογιστικό πλέγμα με μέθοδο πολλαπλής τοπικής πύκνωσης (Multi-Local Refinement, MLR).

### 2.1.2. Οριακές Συνθήκες

Τα καταμετρημένα κατακόρυφα προφίλ της μέσης ταχύτητας ανέμου  $u$  και της έντασης της τύρβης  $I_u$  χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό των συνθηκών εισόδου στις υπολογιστικές προσομοιώσεις. Το προφίλ εισόδου της μέσης ταχύτητας ανέμου περιγράφεται από τον λογαριθμικό νόμο σύμφωνα με την Εξ.(1), όπου  $u_*$  είναι η ταχύτητα τριβής,  $k$  είναι η σταθερά von Karman ίση με 0.42 και  $z$  η συντεταγμένη ύψους. Κατά τις προσομοιώσεις του Α και Β οριακού στρώματος, χρησιμοποιούνται οι τιμές των  $u_*$  και  $z_0$  αντίστοιχα, όπως έχουν υπολογιστεί στην Ενότητα 2.1. Για τον προσδιορισμό της τυρβώδους κινητικής ενέργειας, απαιτούνται πληροφορίες σχετικά με τις τυπικές αποκλίσεις των ταχυτήτων  $u, v$  και  $w$ :

$$k(z) = \frac{1}{2} (\sigma_u^2(z) + \sigma_v^2(z) + \sigma_w^2(z)) \quad (4)$$

Η τυρβώδης κινητική ενέργεια σχετίζεται με την ένταση της τύρβης μέσω της σχέσης:

$$k(z) = \frac{3}{2} (I_u(z) u(z))^2 \quad (5)$$

Η καταστροφή της τυρβώδους κινητικής ενέργειας υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\varepsilon(z) = \frac{0.01 \times C_\mu \times \rho \times k^2}{\mu_t} \quad (6)$$

όπου  $C_\mu$ : σταθερά, ίση με 0.09,  $\rho$ : πυκνότητα του αέρα,  $k$ : τυρβώδης κινητική ενέργεια,  $\mu_t$ : τυρβώδης συνεκτικότητα

Ο ειδικός ρυθμός καταστροφής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας υπολογίζεται από την σχέση:

$$\omega(z) = \frac{\varepsilon(z)}{C_\mu \times k(z)} \quad (7)$$

Για τις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο τύρβης SST k- $\omega$ . Για το έδαφος, δεν χρησιμοποιήθηκαν συναρτήσεις τοιχώματος αλλά τέθηκαν συνθήκες μη ολίσθησης και μη εισχώρησης για τις ταχύτητες και μηδενισμός της τυρβώδους κινητικής ενέργειας ( $U=0$ ,  $k=0$ ) ενώ για το  $\omega$  επιβλήθηκαν σταθερές τιμές. Στην κορυφή τέθηκε συνθήκη τέτοια η οποία επιβάλλει στα όρια του χώρου τις καταστάσεις μεσοκλίμακας που επικρατούν εκτός αυτού και θεωρούνται σταθερές (ανεπηρέαστες από το υπολογιστικό χώρο). Στις πλευρικές επιφάνειες, επιβλήθηκαν συνθήκες συμμετρίας (μηδενικές κλίσεις για όλες τις μεταβλητές) εκτός των ταχυτήτων που είναι κάθετες στο όριο και οι οποίες θεωρούνται μηδενικές. Στην έξοδο, οι μεταβλητές ακολουθούν οριακές συνθήκες Neumann (μηδενική κλίση). Η αδιάστατη κάθετη απόσταση  $y^+$  λαμβάνει τιμές περίπου ίσες με 10 κοντά στα τοιχώματα του κύβου αλλά φθάνει σε μια μέγιστη τιμή ίση με 20, κοντά στις ακμές και στα ανοίγματα εισόδου-εξόδου του πρότυπου κτηρίου.

### 2.1.3. Επιλύτης

Το υπό ανάπτυξη εργαλείο [12],[13],[14] στηρίζεται στην αριθμητική επίλυση των εξισώσεων RANS (Reynolds-Averaged Navier Stokes) ολοκληρωμένων σε όγκους αναφοράς και σε καρτεσιανές συντεταγμένες. Η σύζευξη ταχυτήτων και πιέσεων γίνεται με την γνωστή μέθοδο SIMPLE [15] αλλά με τις απαιτούμενες μετατροπές των Rhie and Chow [16] για ομόθετη διάταξη των μεταβλητών στο πλέγμα διακριτοποίησης του χώρου. Χρησιμοποιήθηκε αριθμητικό σχήμα που είναι συνδυασμός ανάντι παραγωγίσις δεύτερης τάξης ακρίβειας για τους όρους διάχυσης και κεντρικών διαφορών για τους υπόλοιπους. Το κριτήριο σύγκλισης που τέθηκε ως παράμετρος επίλυσης του εν λόγω φυσικού προβλήματος και αφορούσε όλα τα μεγέθη, ήταν για τιμές μικρότερες των  $1 \times 10^{-3}$ . Τέλος, για όλες τις μεταβλητές τέθηκε η τιμή 0.4 ως συντελεστής υποχαλάρωσης πλην της πίεσης για την οποία ο συντελεστής υποχαλάρωσης λαμβάνει την τιμή 0.2.

## 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 3.1. Πεδίο κατανομής ταχύτητας

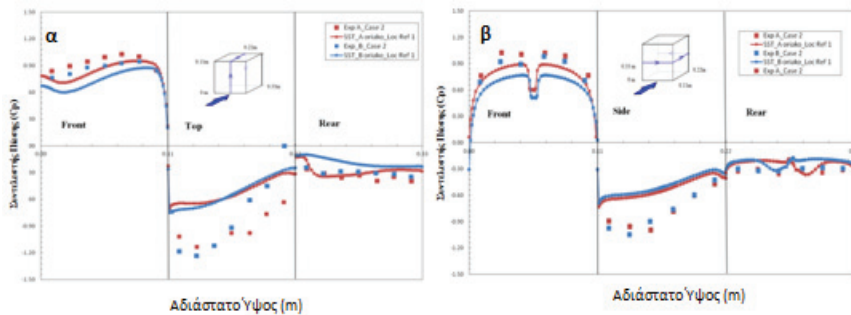
Στην Εικόνα 6 απεικονίζεται το πειραματικά μετρημένο πεδίο ταχυτήτων μέσω της μεθόδου PIV και στην Εικόνα 7 το αντίστοιχο από τις προσομοιώσεις υπολογιστικής ρευστομηχανικής.

Αρχικά, θα πρέπει να αναφερθεί ότι τόσο οι πειραματικές τιμές των ταχυτήτων όσο και οι υπολογιστικές, έχουν αδιαστατοποιηθεί, διαιρούμενες με την τιμή της ταχύτητας στην ανάντη ελεύθερη ροή του πεδίου ( $U_\infty \approx 5.1 \text{ m/s}$ ) [6].

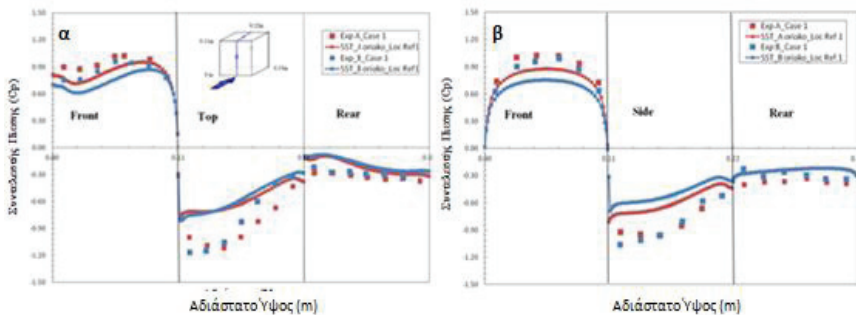
Από τη σύγκριση των Εικόνων 6 και 7, παρατηρείται ότι υπάρχουν αποκλίσεις μεταξύ των πειραματικών και των υπολογιστικών αποτελεσμάτων στο πεδίο ταχυτήτων, για τις ίδιες γεωμετρίες. Οι αποκλίσεις μπορούν να αποδοθούν στην αδυναμία των μοντέλων τύρβης RANS να προλέξουν με ακρίβεια περιοχές με σημεία ανακοπής και αποκόλληση της ροής καθώς και στον τρόπο με τον οποίο διαμορφώνεται μέχρι να φτάσει το κύβο το επιβαλλόμενο οριακό στρώμα στην είσοδο του υπολογιστικού χωρίου. Ωστόσο, είναι εμφανές ότι τα αποτελέσματα που προκύπτουν και από τις πειραματικές και από τις υπολογιστικές προσομοιώσεις φανερώνουν ιδιαίτερη ευαισθησία ως προς τα χαρακτηριστικά του ανάντι προφίλ το οποίο επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό το πεδίο ροής εκατέρωθεν του κύβου. Πιο συγκεκριμένα, το προφίλ μικρής διάτμησης περιέχει συνολικά υψηλότερη ορμή μέχρι το ύψος του κύβου επομένως η ανοδική τάση κοντά στον κύβο είναι εντονότερη και η περιοχή ανακυκλοφορίας μεγαλύτερη. Το αντίθετο φαινόμενο παρατηρείται στην περίπτωση του Β οριακού στρώματος, με υψηλή διάτμηση.

όπου  $P$ : στατική πίεση στην επιφάνεια του κύβου,  $P_0$ : η στατική πίεση στην αδιατάρακτη ροή ανάντι του κύβου (απόσταση  $z=0.4\text{m}$  από την είσοδο του υπολογιστικού χωρίου και σε ύψος  $y=1.43\text{m}$ ),  $\rho$ : η πυκνότητα του αέρα ίση με  $1.16\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $U_H$ : η μέση ταχύτητα της ροής 5H ανάντι του κέντρου του κύβου και στο ύψος του κύβου (A οριακό στρώμα,  $U_H=3.55\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , B οριακό στρώμα,  $U_H=3.21\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ).

Παρατηρείται ότι στα διαγράμματα (α,β) των Εικόνων 8 και 9, οι υπολογιστικές προσομοιώσεις προσεγγίζουν ποιοτικά και ποσοτικά τις πειραματικά μετρούμενες τιμές και για τα δύο οριακά στρώματα, με εξαίρεση τη περιοχή της οροφής όπου παρατηρείται εκτεταμένη αποκόλληση της ροής. Είναι ωστόσο εμφανής, τόσο από τις μετρήσεις όσο και από τις υπολογιστικές προσομοιώσεις, η προοδευτική τάση μεταβολής της κατατομής των πιέσεων από τη περίπτωση χαμηλής διάτμησης προς αυτή της υψηλότερης. Χαμηλά στην ανάντι πλευρά η περιοχή ανακοπής εξασθενίζει και ανεβαίνει σε μεγαλύτερο ύψος όσο μεγαλύτερη είναι η διάτμηση στο οριακό στρώμα ενώ και στην οροφή φαίνεται ότι η ελάχιστη πίεση εμφανίζεται πιο κοντά στην ανάντη ακμή. Η μεταβολή που παρατηρείται ανάμεσα στις περιπτώσεις των δυο οριακών στρωμάτων πιθανόν να είναι ένδειξη της τάσης της ροής να επανακολληθεί στη περίπτωση μεγάλης διάτμησης. Στο συμπέρασμα αυτό καταλήγει και η πειραματική διάταξη του Castro [17].



Εικόνα 8: Σύγκριση υπολογιστικών και πειραματικών κατατομών αδιάστατου συντελεστή πίεσης στις πλευρές του κύβου για προσανατολισμό  $0^\circ$ : α),β) με ανοιχτά ανοίγματα και οριακό στρώμα μικρής (A) και μεγάλης (B) διάτμησης. [6]



Εικόνα 9: Σύγκριση υπολογιστικών και πειραματικών κατατομών αδιάστατου συντελεστή πίεσης στις πλευρές του κύβου για προσανατολισμό  $0^\circ$ : α),β) με κλειστά ανοίγματα και οριακό στρώμα μικρής (A) και μεγάλης (B) διάτμησης. [6]

Στην Εικόνα 10 διακρίνονται οι μεγάλες περιοχές ανακοπής της ροής στην ανάντη πλευρά του κύβου καθώς και οι μεγάλες περιοχές αρνητικών πιέσεων με την προοδευτική ανάκτηση πίεσης στα πλευρικά τοιχώματα και στην οροφή. Παρατηρείται ότι για το οριακό στρώμα A, οι τιμές των συντελεστών πίεσης στην ανάντη πλευρά είτε παρουσία είτε απουσία ανοιγμάτων είναι υψηλότερες σε σχέση με το οριακό στρώμα B, ενώ παρατηρούνται περισσότερο

αρνητικές τιμές στην οροφή του κύβου για την περίπτωση του Α οριακού στρώματος συγκριτικά με την αντίστοιχη του Β. Γενικά, συμπεραίνεται ότι οι τιμές των συντελεστών πίεσης για κάθε περίπτωση οριακού στρώματος εμφανίζουν μικρές διαφορές είτε παρουσία είτε απουσία ανοιγμάτων.

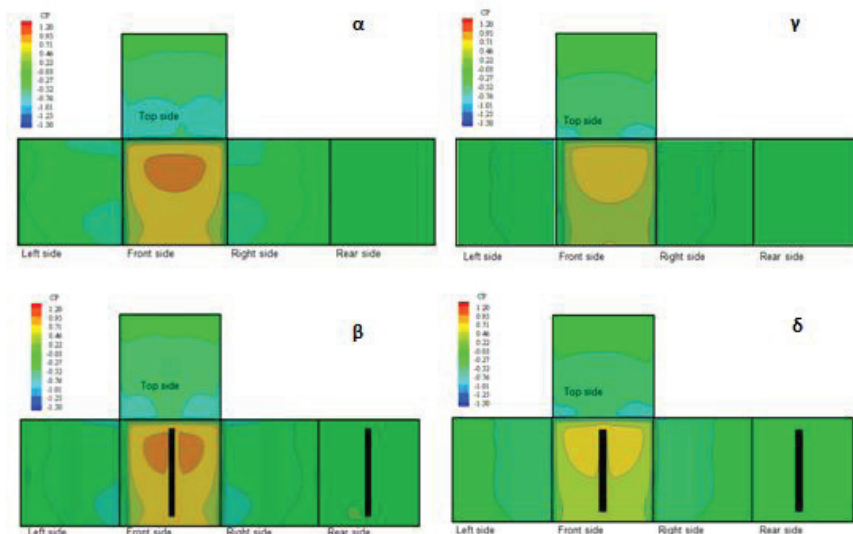
### 3.3. Ρυθμός Αερισμού

Ο υπολογισμός του ρυθμού ροής του αέρα ο οποίος παρέχεται μέσω του φυσικού αερισμού συνήθως υπολογίζεται μέσω απλών σχέσεων. Αναφορικά με τον εγκάρσιο φυσικό αερισμό, το ακόλουθο ημιεμπειρικό μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί, το οποίο προκύπτει από την εξίσωση Bernoulli και δίνεται ίσο με [18]:

$$Q_{CR} = C_d \cdot A_{eff} \cdot U_{bh} \cdot \sqrt{\Delta C_p} \quad (9)$$

όπου  $C_d$  : συντελεστής παροχής των ανοιγμάτων,  $\Delta C_p$  : η διαφορά μεταξύ των μέσων συντελεστών πίεσης που συνδέονται με τα απέναντι ανοίγματα,  $U_{bh}$ : η ταχύτητα αναφοράς του αέρα μετρημένη στο ύψος του κύβου και  $A_{eff}$  ( $m^2$ ) είναι η ενεργός ζώνη η οποία ορίζεται ως:

$$\frac{1}{A_{eff}^2} = \frac{1}{A_m^2} + \frac{1}{A_{out}^2} \quad (10)$$



Εικόνα 10: Μετρημένες κατανομές συντελεστών πίεσης για οριακό στρώμα μικρής διάμεσης (Α), προσανατολισμός  $0^\circ$ , α) Κλειστά ανοίγματα β) Ανοιχτά ανοίγματα. Μετρημένες κατανομές συντελεστών πίεσης για οριακό στρώμα μεγάλης διάμεσης (Β), προσανατολισμός  $0^\circ$ , γ) Κλειστά ανοίγματα δ) Ανοιχτά ανοίγματα.

Στην παρούσα μελέτη περίπτωσης η ενεργός ζώνη είναι ίση με  $A_{eff} = 3.18 \times 10^{-3} m^2$ . Η ταχύτητα αναφοράς του αέρα στην υπο εξέταση μελέτη μετρήθηκε ίση με  $U_{bh} = 3.55 m \cdot s^{-1}$  για Α οριακό στρώμα και  $U_{bh} = 3.21 m \cdot s^{-1}$  για Β οριακό στρώμα. Επίσης γίνεται η υπόθεση ότι η τιμή του  $C_d = 0.61$ , η οποία θεωρείται τυπική τιμή του συντελεστή αντίστασης για απότομο άνοιγμα [18] και τέλος,  $\Delta C_p = 0.9$  λαμβάνοντας υπόψη τις τυπικές τιμές των  $C_p = 0.7$  και  $-0.2$  για τις προσήνεμες και υπήνεμες επιφάνειες, αντίστοιχα [18]. Συνεπώς, η τιμή του αναμενόμενου ρυθμού αερισμού ισούται με  $Q_{CR} = 6.53 \times 10^{-3} m^3 \cdot s$  για Α οριακό στρώμα και  $Q_{CR} = 5.91 \times 10^{-3} m^3 \cdot s$  για Β οριακό στρώμα. Στον Πίνακα 1 γίνεται σύγκριση του ρυθμού αερισμού που υπολογίστηκε από τις υπολογιστικές προσομοιώσεις για τα δύο ανάντι οριακά στρώματα με τις αναμενόμενες τιμές από το ημιεμπειρικό μοντέλο της (9).

Πίνακας 1 : Εμπειρικές και υπολογιστικές τιμές ρυθμού αερισμού ( $m^3 \cdot s$ )

	Ρυθμός Αερισμού	
	A οριακό στρώμα	B οριακό στρώμα
Υπολογιστική Προσομοίωση	$9.68 \times 10^{-4}$	$7.15 \times 10^{-4}$
Ημιεμπειρική Μέθοδος	$6.53 \times 10^{-3}$	$5.91 \times 10^{-3}$

Με βάση τα αποτελέσματα του Πίνακα 1 παρατηρείται ότι για τα δύο ανάντι οριακά στρώματα, τόσο τα αποτελέσματα της υπολογιστικής προσομοίωσης όσο και το ημιεμπειρικό μοντέλο δείχνουν ότι ο ρυθμός αερισμού είναι μεγαλύτερος στην περίπτωση του οριακού στρώματος μικρής διάτμησης (A) σε σχέση με το οριακό στρώμα μεγάλης διάτμησης (B). Εντούτοις για τη περίπτωση της υπολογιστικής προσομοίωσης, η διαφορά φτάνει το 35% ενώ με την ημιεμπειρική μέθοδο η διαφορά είναι στο 15%. Οι διαφορές των ποσοστών του ρυθμού αερισμού με βάση τις εμπειρικές μεθόδους αποδίδονται στις υποθέσεις που εφαρμόζονται για τις τιμές του συντελεστή αντίστασης ή/και για τις τιμές των συντελεστών πίεσης που λαμβάνονται για ένα κλειστό «σώμα» - εδώ για ένα κλειστό κτήριο. Τόσο οι μετρήσεις όσο και τα υπολογιστικά αποτελέσματα έδειξαν ότι η κατανομή της πίεσης ενδεχομένως να μην έχει σημαντική ευαισθησία στη παρουσία των ανοιγμάτων, εν αντιθέσει με το πεδίο ροής γύρω και διά του κτηρίου, το οποίο και διαμορφώνει τον ρυθμό αερισμού του.

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα μελέτη, για την προσέγγιση του εγκάρσιου φυσικού αερισμού ενός πρότυπου κτηρίου εκτεθειμένου σε δύο, διαφορετικής διάτμησης, ανάντι οριακά στρώματα, προτιμήθηκε ο συνδυασμός πειραματικής και υπολογιστικής προσομοίωσης της υπό εξέταση περίπτωσης. Κατά την πειραματική προσέγγιση εφαρμόστηκε η μέθοδος PIV για τον προσδιορισμό της κατανομής του πεδίου ταχυτήτων και των πιέσεων ενώ κατά την υπολογιστική προσομοίωση, επιλέχθηκε η εφαρμογή και η επίλυση των RANS εξισώσεων χρησιμοποιώντας το SST k- $\omega$  μοντέλο. Από τις υπολογιστικές προσομοιώσεις προέκυψε το πεδίο κατανομής της ταχύτητας και της πίεσης εντός και πέριξ του κτηρίου από τα οποία υπολογίστηκαν ο ρυθμός αερισμού του κτηρίου και οι συντελεστές κατανομής πίεσης σε όλες τις επιφάνειές του. Εν συνεχεία, τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα ενώ αναφορικά με τον ρυθμό αερισμού συγκρίθηκε με την τιμή του ρυθμού αερισμού όπως υπολογίστηκε από εμπειρικές εκφράσεις.

Το πιο ενδιαφέρον συμπέρασμα της συγκεκριμένης μελέτης αφορά τον ρυθμό αερισμού. Ο υπολογιστικά μετρούμενος ρυθμός αερισμού με βάση το πεδίο ταχυτήτων δίνει σημαντικές διαφορές μεταξύ του οριακού στρώματος χαμηλής διάτμησης (A) και του αντίστοιχου υψηλής διάτμησης (B) το οποίο παρέχει τις εξής πληροφορίες : αφενός τα χαρακτηριστικά του ανάντι οριακού στρώματος επηρεάζουν την τιμή του ρυθμού αερισμού δίνοντας διαφορές ίσες με 35%, αφετέρου είναι εμφανές ότι το πεδίο κατανομής της πίεσης δεν απεικονίζει επαρκώς την τιμή του ρυθμού αερισμού όσο το πεδίο κατανομής ταχυτήτων. Επιπλέον η σύγκριση των τιμών του ρυθμού αερισμού που υπολογίζονται με ημι-εμπειρική μέθοδο εμφανίζει μικρότερη διαφορά μεταξύ των δύο ανάντι οριακών στρωμάτων, παρατηρούνται διαφορές ίσες με 15%. Πιθανή εξήγηση μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι στηρίζονται σε μεταβλητές οι οποίες προκύπτουν εμπειρικά, για «κλειστό» κτήριο και λαμβάνουν υπόψη κυρίως τη κατανομή της πίεσης στην εξωτερική επιφάνεια τους κτηρίου.

#### ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η <sup>1</sup> συγγραφέας Παππά Βασιλική επιθυμεί να εκφράσει τις ευχαριστίες της προς το Ευγενίδειο Ίδρυμα για την υποστήριξη εκπόνησης της διδακτορικής της διατριβής, μέρος της οποίας αποτελεί και η παρούσα εργασία.

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] M. Orme, Estimates of the energy impact of ventilation and associated financial expenditures, *Energy and Buildings* 33 (2001) 199–205
- [2] C. Allocca, Q. Chen, L.R. Glicksman, Design analysis of single-sided natural ventilation, *Energy and Buildings* 35 (2003) 785–795
- [3] T. van Hooff, B. Blocken, Y. Tominaga, On the accuracy of CFD simulations of cross-ventilation flows for a generic isolated building: Comparison of RANS, LES and experiments, *Building and Environment* 114 (2017) 148-165.
- [4] Menter, F. R. (1993), Zonal Two Equation  $k-\omega$  Turbulence Models for Aerodynamic Flows, AIAA Paper 93-2906.
- [5] Irwin, H. (1981) The design of spires for wind simulation. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 7(3), 361-366
- [6] Πάνος Μ., Μανωλέσος Μ., Μπούρης Δ., Πειραματική Προσομοίωση προτύπου κτηρίου εκτεθειμένου σε ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα, 10<sup>η</sup> Επιστημονική Συνάντηση, Πανελλήνιο Συνέδριο για τα Φαινόμενα Μηχανικής Ρευστών, Πάτρα, 2-3 Δεκεμβρίου, (2016)
- [7] Manolesos M., Gao Z., Xing Z., Bouris D., Experimental study of the flow past a cube with openings embedded in a turbulent boundary layer, 10th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena (TSFP10), Chicago, USA, July, (2017)
- [8] Foucaut J. M., Miliat B., Perenne N., and Stanislas M., “Characterization of different PIV algorithms using the EUROPIV synthetic image generator and real images from a turbulent boundary layer,” in *Particle Image Velocimetry: Recent Improvements*, Springer, 2004, pp. 163–185.
- [9] Cook N J. 1978, “Determination of the model scale factor in wind-tunnel simulations of the adiabatic atmospheric boundary layer”. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol 2(4), pp 311-321
- [10] J. Franke, A. Hellsten, H. Schlünzen, B. Carissimo (Eds.), *Best Practice Guideline for the CFD Simulation of Flows in the Urban Environment*, COST Office Brussels, 2007. ISBN 3-00018312-4.
- [11] Y. Tominaga, A. Mochida, R. Yoshie, H. Kataoka, T. Nozu, M. Yoshikawa, T. Shirasawa, AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 96 (2008) 1749-1761.
- [12] M. Petridou, Y. Perivolaris, D. Bouris (2010) “Numerical Simulation of Wind Flow in the Urban Environment”, *Proc. ROH-2010 7th National Conference for Research Activities in Fluid Flow Phenomena in Greece*, Thessaloniki, 12-13 November, 2010
- [13] M. Petridou, Y. Perivolaris, K. Rados, D. Bouris (2012) “Numerical simulation of the diurnal variation of wind and temperature field in an urban environment”, ‘ROH 2012’, 8th National Conference on Fluid Flow Phenomena, Volos, Greece, 16-17 November, 2012
- [14] M. Petridou, Y. Perivolaris, K. Rados, D. Bouris (2013) “Meso and micro scale numerical modelling for the assessment of urban wind and thermal environment”, 3rd International Energy, Life Cycle Assessment, and Sustainability Workshop & Symposium (ELCAS3), Nisyros, Greece, 07 -09 July, 2013.
- [15] S.V. Patankar, D.B. Spalding, A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 15 (1972) 1787–1806.
- [16] C.M. Rhie, W.L. Chow, Numerical study of the turbulent flow past an airfoil with trailing edge separation, *AIAA Journal* 21 (1983) 213–233.
- [17] Castro I. and Robins A., 1977, The flow around a surface mounted cube in uniform a turbulent streams. *J. Fluid Mech.*, Vol. 79, No. 2, pp. 307-335.
- [18] D. Etheridge, M. Sandberg, *Building Ventilation: Theory and Measurements*, Wiley, Chichester, UK, 1996.



**Φωτοβολταϊκά**

---



## ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ, ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΚΑΙ ΚΟΙΝΩΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ (Φ/Β) ΣΤΑΘΜΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΙΣΧΥΟΣ 97 kWp ΤΗΝ ΤΕΛΕΥΤΑΙΑ ΤΕΤΡΑΕΤΙΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

**Κωνσταντίνος Γκαράκης**

Τμήμα Μηχανικών Ενεργειακής Τεχνολογίας, ΤΕΙ Αθήνας  
e-mail: ape@teiath.gr

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία αφορά την αξιολόγηση μιας μικρής μονάδας ηλεκτροπαραγωγής με τη χρήση ηλιακής ενέργειας η οποία εκκίνησε την λειτουργία της τον Νοέμβριο του 2012. Πρόκειται για ένα φωτοβολταϊκό (φ/β) σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας εγκατεστημένο επί εδάφους, ονομαστικής ισχύος 97 kWp στη Ροδόπη.

Η εργασία είναι μια περιπτωσιολογική μελέτη η οποία είναι αντιπροσωπευτική για μικρού και μεσαίου μεγέθους επιχειρήσεις που επένδυσαν σε φ/β σταθμούς ισχύος ως 100 kWp (36,4 % της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος στην Ελλάδα, περί τα 950 MW). Αποτυπώνεται το ενεργειακό, περιβαλλοντικό, οικονομικό και κοινωνικό αποτύπωμα αυτής της δραστηριότητας μέσα από το σχεδιασμό, την υλοποίηση αλλά και την λειτουργία & συντήρηση για διάρκεια τεσσάρων ετών.

Οι στόχοι της εργασίας είναι να παρουσιαστούν οι πρακτικές που εφαρμόστηκαν και εφαρμόζονται για το προαναφερθέν έργο αλλά και η εμπειρία που αποκτήθηκε από το συνολικό εγχείρημα με όρους οικονομικούς και περιβαλλοντικούς. Στην εργασία αυτή δίνονται ποσοτικά και ποιοτικά στοιχεία για την λειτουργία αυτής της μονάδας ηλεκτροπαραγωγής (από την αρχή υλοποίησης του έργου ως το χρονικό διάστημα λειτουργίας του, των τεσσάρων ετών) σε ένα δυσμενές οικονομικό περιβάλλον με συχνές νομοθετικές και ρυθμιστικές αλλαγές.

Η πράσινη διεσπαρμένη ηλεκτροπαραγωγή συμβάλλει θετικά στην αειφόρο ανάπτυξη και στην αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής αλλά παράλληλα καταφέρνει να είναι οικονομικά βιώσιμη και αποδοτική αλλά και με θετική περιβαλλοντική διάσταση στη κοινωνία.

**Λέξεις Κλειδιά:** Πράσινη ενέργεια, φωτοβολταϊκός σταθμός, ηλεκτροπαραγωγή, περιφερειακή ανάπτυξη.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα φωτοβολταϊκά (φ/β) είναι μία από τις πολλά υποσχόμενες τεχνολογίες της νέας εποχής που έχει ανατέλλει στο χώρο της ενέργειας. Μιας νέας εποχής που θα χαρακτηρίζεται ολοένα και περισσότερο από τις μικρές αποκεντρωμένες εφαρμογές σε ένα περιβάλλον απελευθερωμένης αγοράς [1]. Τα μικρά, ευέλικτα συστήματα που μπορούν να εφαρμοστούν σε επίπεδο κατοικίας, εμπορικού κτιρίου ή μικρού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής (όπως π.χ. τα φωτοβολταϊκά, τα μικρά συστήματα συμπαραγωγής, οι μικρές ανεμογεννήτριες και οι κυψέλες καυσίμου) αναμένεται να κατακτήσουν ένα σημαντικό μερίδιο της ενεργειακής αγοράς στα επόμενα χρόνια. Κοινό χαρακτηριστικό αυτών των νέων τεχνολογιών είναι η φιλικότητά τους προς το περιβάλλον.

Στην Ελλάδα, την εξαετία 2008-2013 υπήρξε ταχεία εγκατάσταση διασυνδεδεμένων φ/β σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, λόγω των υψηλών τιμών πώλησης της παραγόμενης ενέργειας και της απλουστευμένη αδειοδότησης τους. Η εγκατεστημένη ισχύς διασυνδεδεμένων φ/β έφτασε από τα 11MW το 2008, στα 2579MW στα τέλη του 2013 ενώ οι επενδύσεις της εξαετίας έφτασαν τα 5 δις ευρώ. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φ/β ως ποσοστό της συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας έφτασε το 6,7% το 2013, κατατάσσοντας την Ελλάδα στη δεύτερη θέση διεθνώς [2].

Το 36,4% της εγκατεστημένης ισχύος φ/β σταθμών στην Ελλάδα (περίπου 950 MW) αφορούν εγκαταστάσεις ονομαστικής ισχύος από 10-100 kWp [3]. Αιτία της ιδιαίτερης αυτής ανάπτυξης έργων με ισχύ μικρότερη των 100 kWp ήταν η αυξημένη τιμή πώλησης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας που παρέχει το νομοθετικό πλαίσιο.

## 2. ΣΚΟΠΟΣ

Σκοπός της εργασίας είναι η περιβαλλοντική, οικονομική και κοινωνική ανάλυση της λειτουργίας φ/β σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ισχύος 97kWp την τελευταία τετραετία στην Ελλάδα.

Παρουσιάζονται οι πρακτικές που εφαρμόστηκαν και εφαρμόζονται για το προαναφερθέν έργο αλλά και η εμπειρία που αποκτήθηκε από το συνολικό εγχείρημα με όρους οικονομικούς και περιβαλλοντικούς. Στην εργασία αυτή δίνονται ποσοτικά και ποιοτικά στοιχεία για την λειτουργία αυτής της μονάδας ηλεκτροπαραγωγής (από την αρχή υλοποίησης του έργου ως το χρονικό διάστημα λειτουργίας του, των τριών ετών) σε ένα δυσμενές οικονομικό περιβάλλον με συχνές νομοθετικές και ρυθμιστικές αλλαγές.

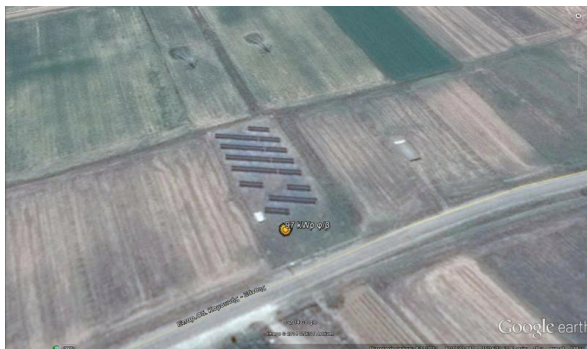
## 3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ

Ο φ/β σταθμός βρίσκεται στην πεδιάδα της Ροδόπης στη θέση «Καψάλες - αγροτεμάχιο 215», στο Δήμο Κομοτηνής, Π.Ε Ροδόπης, σε μικρή απόσταση από τον οικισμό της Αιγείρου. Το γήπεδο εγκατάστασης έχει εμβαδόν 3.515 m<sup>2</sup> και οι συντεταγμένες του είναι 41°05' 14,07'' Β, 25°16' 34,28'' Α με υψόμετρο 20m asl, ενώ δεν υπάρχει κάποιο εμπόδιο που να δημιουργεί σκίαση στην εγκατάσταση.

Στην εικόνα 1, παρουσιάζεται φωτογραφία του υπό μελέτη φ/β σταθμού ενώ στην εικόνα 2 φωτογραφία του με χρήση υποβάθρου Google Earth.



Εικόνα 1 : Φωτογραφία του φ/β σταθμού ονομαστικής ισχύος 97 kWp.



Εικόνα 2: Ο υπό μελέτη φ/β σταθμός με χρήση υποβάθρου Google Earth.

Ο φ/β σταθμός έχει ονομαστική ηλεκτρική ισχύ ίση με 96,775 kWp και περιλαμβάνει 395 φ/β γεννήτριες τεχνολογίας πολυκρυσταλλικού πυριτίου της εταιρίας Solarworld, τύπος SW 245 Poly, ονομαστικής ισχύος 245 Wp η καθεμία. Οι φ/β γεννήτριες είναι τοποθετημένες σε σύστημα σταθερών βάσεων της εταιρίας Exalco Synergy Land 3L με τη μέθοδο της πασαλόμπηξης. Η συνολική επιφάνεια των φ/β γεννητριών είναι 662 m<sup>2</sup> και η κλίση τους είναι 30°, με νότιο προσανατολισμό.

Στον πίνακα 1 παρουσιάζονται τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά της φ/β γεννήτριας.

Πίνακας 1 : Τεχνικά χαρακτηριστικά της φ/β γεννήτριας του σταθμού.

Κατασκευαστής	SolarWorld
Τύπος	SW 245 Poly, 245 Wp
Ονομαστική ισχύς (P <sub>mpp</sub> ) – Ανοχή ισχύος	245,0 0/+5Wp
Μέση ισχύς (W <sub>p</sub> /m <sup>2</sup> )	146,12
Τάση στην αιχμή ισχύος (V <sub>mpp</sub> )	30,8 V
Ρεύμα στην αιχμή ισχύος (I <sub>mpp</sub> )	7,96 A
Τάση ανοικτού κυκλώματος (V <sub>oc</sub> )	37,5 V
Ρεύμα βραχυκύκλωσης (I <sub>sc</sub> )	8,49 A
Συντελεστής απόδοσης	14,61%
Θερμοκρασιακός συντελεστής Tk U <sub>oc</sub>	-0,37 %/K
Θερμοκρασιακός συντελεστής Tk I <sub>sc</sub>	+0,081 %/K
Θερμοκρασιακός συντελεστής Tk P <sub>mpp</sub>	-0,45 %/K
Διαστάσεις	1.675x1001x31 mm
Βάρος	21,2 kg

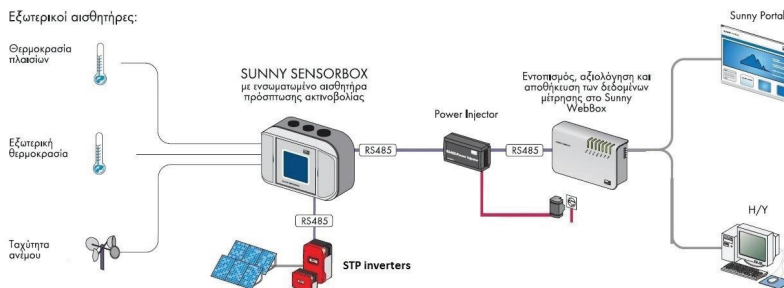
Η σύνδεση των φ/β με το δίκτυο χαμηλής τάσης της ΔΕΗ γίνεται μέσω έξι (6) τριφασικών μετατροπέων DC/AC δικτύου της εταιρείας SMA Solar Technology AG, τύπος STP 17000 TL (5) και STP 15000 TL (1) με μέγιστο βαθμό απόδοσης 98,2%. Στον κάθε μετατροπέα DC/AC δικτύου STP 17000TL συνδέονται τρεις στοιχειοσειρές, αποτελούμενη η καθεμία από 22 φ/β γεννήτριες, ενώ στον STP15000TL συνδέονται δύο στοιχειοσειρές αποτελούμενες από 22 φ/β γεννήτριες και μια στοιχειοσειρά με 21 φ/β γεννήτριες. Παρατηρείται κατά 4% υπερδιαστασιολόγηση των χρησιμοποιούμενων μετατροπέων. Ο σταθμός διαθέτει μετεωρολογικό σταθμό Sunny Sensorbox και μετρητικά όργανα μέτρησης θερμοκρασίας περιβάλλοντος, πλάτης φ/β, ηλιακής ακτινοβολίας και ταχύτητας ανέμου (εικόνες 3,4,5).



Εικόνες 3,4,5 : Ο μετεωρολογικός σταθμός Sunny Sensorbox και οι αισθητήρες του.

Τα μετρούμενα μεγέθη που καταγράφει ο μετεωρολογικός σταθμός είναι : ολική ηλιακή ακτινοβολία στο επίπεδο των  $\phi/\beta$  ( $30^\circ$ ), θερμοκρασία περιβάλλοντος, θερμοκρασία πλάτης  $\phi/\beta$  και ταχύτητας ανέμου. Το Sunny Webbox λαμβάνει όλες τα δεδομένα λειτουργίας από τους μετατροπείς.

Στον πίνακα 2 δίνονται περισσότερα στοιχεία για τα μετρητικά όργανα του μετεωρολογικού σταθμού, καθώς και η ακρίβεια μέτρησης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τους μετατροπείς του δικτύου.



Εικόνα 6 : Σχηματική παράσταση Sunny WebBox στον  $\phi/\beta$  σταθμό.

Πίνακας 2 : Ο εξοπλισμός του μετεωρολογικού σταθμού, η ακρίβεια και η περιοχή μετρήσεων τους καθώς και η ακρίβεια μέτρησης της ηλεκτρικής ενέργειας

Παράμετρος μέτρησης	Εξοπλισμός	Ακρίβεια μέτρησης – Περιοχή μετρήσεων
Ηλιακή ακτινοβολία	Δομοστοιχείο ASI	$\pm 8,0\%$ - 0 ... 1500 W/m <sup>2</sup>
Θερμοκρασία $\phi/\beta$ γεννήτριας	Επικολλούμενος αισθητήρας από λευκόχρυσο PT100	$\pm 0,5\%$ - -40C – 125 C
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	Αισθητήρας από λευκόχρυσο PT100	$\pm 0,5\%$ - -25C – 85C
Μέτρηση ταχύτητας ανέμου	Ανεμόμετρο Thies clima compact	$\pm 0,5\text{m/s}$ - 0,8m/s – 40m/s
Μέτρηση ηλ. ενέργειας	Μετατροπέας δικτύου	$\pm 3,0\%$

Η παρακολούθηση της παραγωγής και της λειτουργίας των μετατροπέων δικτύου και του μετεωρολογικού σταθμού, πραγματοποιείται μέσω του συστήματος τηλεπαρακολούθησης και καταγραφής Sunny WebBox (εικόνα 6), για έλεγχο του συστήματος και παρακολούθηση των δεδομένων μέσω Internet, σε τοπικό Η/Υ και σε απομακρυσμένο κεντρικό σημείο μέσω Internet (SunnyPortal website), το οποίο καταγράφει σε πραγματικό χρόνο την ισχύ και τις επιμέρους παραμέτρους της εγκατάστασης και υπολογίζει το βαθμό απόδοσής της. Η διάγνωση και επικοινωνία πραγματοποιείται ασύρματα μέσω GSM modem. Τα δεδομένα λειτουργίας και από τον μετεωρολογικό σταθμό συλλέγονται ανά 15min και αποθηκεύονται σε κάρτα μνήμης (SD card) ενώ είναι διαθέσιμα και μέσω της ιστοσελίδας SunnyPortal. Ο  $\phi/\beta$  σταθμός έχει τεθεί σε εμπορική λειτουργία στις 9/11/2012.

#### 4. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η έρευνα είναι κατά βάση περιγραφική, λόγω της επιθυμίας μας να εκτιμήσουμε τα χαρακτηριστικά μιας δεδομένης κατάστασης. Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στην αμεροληψία όσο αναφορά την οργάνωση της έρευνας, τις προδιαγραφές της και το σχεδιασμό της. Πρόκειται για περιπτώσιολογική μελέτη η οποία είναι αντιπροσωπευτική για μικρού και μεσαίου μεγέθους επιχειρήσεις που επένδυσαν σε  $\phi/\beta$  σταθμούς ισχύος ως 100 kWp (36,4% της εγκατεστημένης ισχύος, περί τα 950 MW) [4].

Η συλλογή των στοιχείων στη διαδικασία της έρευνας γίνεται μέσω χρήσης πρωτογενών πηγών από τη φάση της σχεδίασης, υλοποίησης αλλά και λειτουργίας των έργων. Πραγματοποιείται ανασκόπηση και έλεγχος των διαθέσιμων πληροφοριών για την εκπλήρωση των στόχων της έρευνας. Δευτερογενή

στοιχεία αντλούνται από τα τεχνικά φυλλάδια και την τεχνική βιβλιογραφία περί φ/β έργων και περιβαλλοντικών στοιχείων τους.

Η έρευνα είναι μεικτή, ποσοτική και ποιοτική. Η ποιοτική έρευνα στοχεύει στη συλλογή στοιχεία που δεν μπορούν να μετρηθούν άμεσα και είναι βοηθητική της ποσοτικής. Το μεγαλύτερο μέρος της έρευνας σε αυτή την εργασία είναι ποσοτική. Η στρατηγική που θα ακολουθηθεί κυρίως είναι η συλλογή πρωτογενών δεδομένων μέσα από το αρχείο της επιχείρησης.

Η περίοδος μελέτης του φ/β σταθμού είναι η τετραετία 9/11/2012-8/11/2016.

Ο σταθμός έχει αναπτυχθεί από τον συγγραφέα οποίος είναι και ο υπεύθυνος λειτουργίας του.

## 5. ΚΑΛΕΣ ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ

### 5.1. Μελέτη και κατασκευή

Στην μελέτη και την κατασκευή του φ/β σταθμού εφαρμόστηκαν μέθοδοι βέλτιστων πρακτικών για την μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης του έργου στην διάρκεια λειτουργίας του. Ο σταθμός έχει λάβει πιστοποίηση σύμφωνα με το πρότυπο EN 62446:2009 από την TÜV Austria Hellas (αρ. πιστ. 3065/2015).

#### 5.1.1. Κατάλληλη επιλογή φ/β γεννήτριας και μετατροπέων δικτύου

Η φ/β γεννήτρια έχει βαθμό απόδοσης ίσο με 14,61%, ο οποίος είναι αρκετά υψηλός ενώ ο θερμοκρασιακός συντελεστής ισχύος ( $T_k$  σε Pmp) ισούται με  $-0,45\%/K$  ο οποίος είναι χαμηλός. Επίσης έχουν θετική ανοχή ισχύος  $0/+5Wp$  η οποία εγγυάται την υψηλή απόδοση της εγκατάστασης. Με τη γραμμική εγγύηση απόδοσης για 25 χρόνια η SolarWorld εγγυάται μια μέγιστη προοδευτική μείωση της απόδοσης κατά 0,7% ετησίως – δηλαδή ένα σημαντικό πλεονέκτημα έναντι των συνηθισμένων εγγυήσεων δύο επιπέδων του κλάδου. Οι μετατροπείς DC/AC δικτύου της SMA έχουν μέγιστο βαθμό απόδοσης στην ονομαστική τους ισχύ ίσο με 98,2%.

#### 5.1.2. Διαστασιολόγηση του έργου

Η διαστασιολόγηση του έργου πραγματοποιήθηκε με την χρήση του λογισμικού διαστασιολόγησης και ελέγχου καταλληλότητας της SMA, Sunny Design ενώ η εκτίμηση της ενεργειακής παραγωγής πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό PVSYST. Στον πίνακα 3 παρουσιάζονται οι συντελεστές απόδοσης του φ/β σταθμού.

Πίνακας 3 : Οι συντελεστές απόδοσης της σχεδίασης του έργου

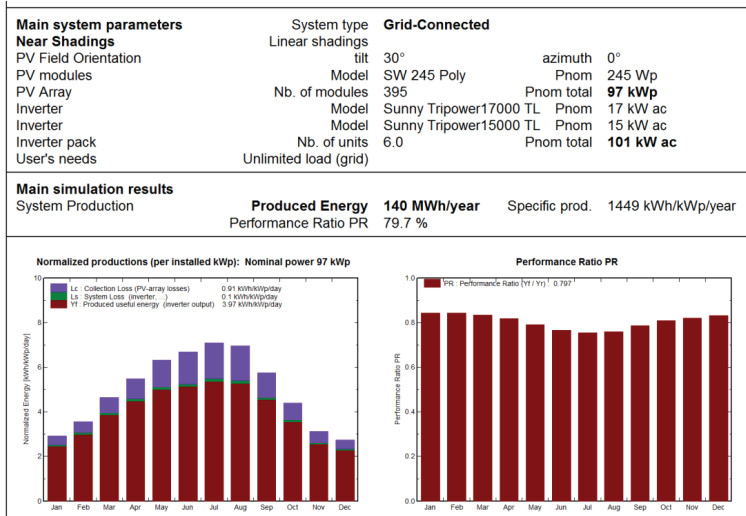
Συντελεστής	Τιμή	Επεξήγηση
Λόγος ονομαστικής ισχύος	96,0%	Ονομαστική ισχύς DC μετατροπέων / ονομαστική ισχύς φ/β
Απόδοση μετατροπέων	97,5%	Ενέργεια παραγόμενη AC / Ενέργεια λαμβανόμενη DC
Συντελεστής ενεργειακής χρήσης	100%	Ενέργεια μετατροπόμενη DC / Ενέργεια που μπορεί να παραχθεί από τα φ/β

Ο λόγος ονομαστικής ισχύος βρίσκεται στο συνιστώμενο εύρος τιμών 84-120%. Στην τιμή της απόδοσης των μετατροπέων συνυπολογίζεται ο βαθμός απόδοσης των μετατροπέων, ο βαθμός απόδοσης του ανιχνευτή σημείου μέγιστης ισχύος (MPP tracking) και η εξάρτηση του βαθμού απόδοσης του μετατροπέα από την τάση εισόδου DC.

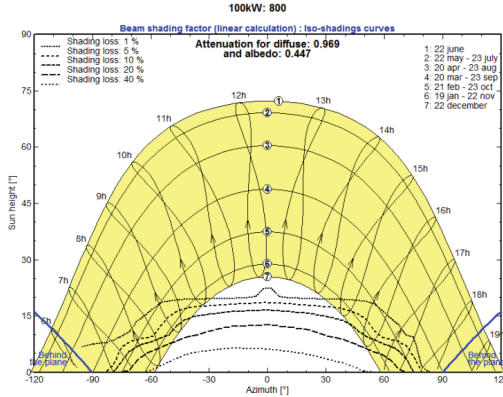
Η επιλογή των καλωδίων πραγματοποιήθηκε μετά από μελέτη απωλειών, σύμφωνα με την απόσταση και την τάση λειτουργίας, έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες, με μέγιστες πτώσεις τάσης να είναι χαμηλότερες από 1% τόσο στα DC, όσο και στα AC καλώδια.

Η εκτίμηση της ενεργειακής παραγωγής πραγματοποιήθηκε τον Οκτώβριο του 2012 με τη τελική χωροθέτηση και τον οριστικό χρησιμοποιούμενο εξοπλισμό μέσω του λογισμικού PVSyst (έκδοση 5.31). Η εκτιμώμενη ετήσια ενεργειακή παραγωγή είναι 1.446 kWh/kWp και λόγος επίδοσης (Performance Ratio – PR%) [4] είναι ίσος με 79,7%.

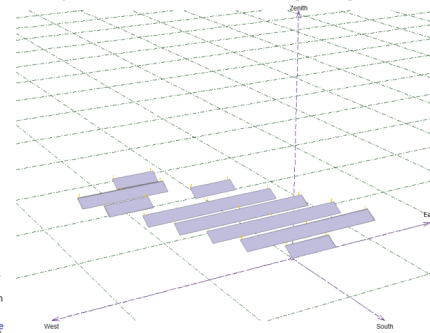
Πίνακας 4 : Περιληπτικά αποτελέσματα ενεργειακής εκτίμησης του έργου.



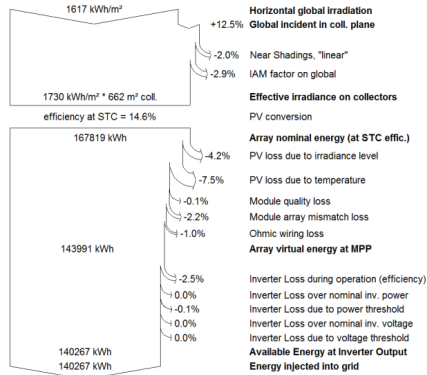
**Iso-shadings diagram**



**Perspective of the PV-field and surrounding shading scene**



**Loss diagram over the whole year**



### 5.1.3. Ελαχιστοποίηση της ηλιακής σκίασης - χωροθέτησης

Οι φ/β γεννήτριες εγκαταστάθηκαν σε νότιο προσανατολισμό ενώ η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των βάσεων δυο παράλληλων σειρών είναι 2,7 φορές το ύψος των βάσεων από έδαφος (με όριο το 2).

### 5.1.4. Κατάταξη φ/β γεννητριών (sorting)

Σε κάθε στοιχειοσειρά εγκαταστάθηκαν φ/β γεννήτριες ίδιας κατηγορίας ρεύματος (current class) ώστε να περιορίζονται οι απώλειες λόγω ηλεκτρικής ανομοιομορφίας (mismatch). Η κατάταξη (sorting) πραγματοποιήθηκε σε τρεις κατηγορίες ρεύματος σύμφωνα με το αρχείο μετρήσεων των φ/β γεννητριών από τον κατασκευαστή (flash report).

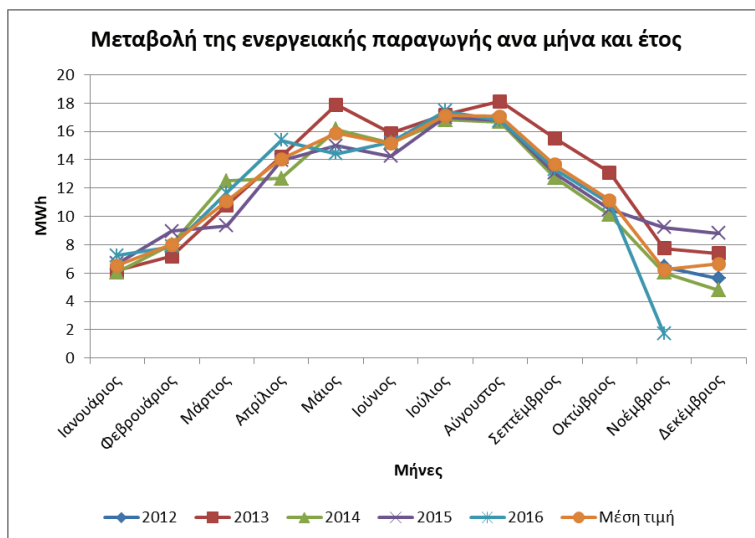
## 5.2. Λειτουργία και συντήρηση

### 5.2.1. Ενεργειακή παραγωγή

Η μέση ετήσια ενεργειακή απόδοση του φ/β σταθμού για την τετραετία 9/11//2012-8/11/2016 είναι 1.486 kWh/kWp και ο λόγος επίδοσης ίσος με 86,6%. Παρατηρείται αυξημένη ενεργειακή παραγωγή κατά 2,7% ενώ ο πραγματικός λόγος επίδοσης είναι αυξημένος κατά 8%. Στο πίνακα 5 και στην εικόνα 6 παρουσιάζεται η ενεργειακή παραγωγή του φ/β σταθμού ανά μήνα για τη τετραετή περίοδο μελέτης.

Πίνακας 5 : Η ενεργειακή παραγωγή ανά μήνα του φ/β σταθμού Αιγείρου.

Συνολική ενεργειακή παραγωγή [MWh]	Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Μάρτιος	Απρίλιος	Μάιος	Ιούνιος	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβριος	Οκτώβριος	Νοέμβριος	Δεκέμβριος	Σύνολο
2012													6.45
2013	6.17	7.17	10.79	14.21	17.89	15.88	17.18	18.11	15.53	13.11	7.74	7.38	151.15
2014	6.05	8.02	12.5	12.68	16.15	15.2	16.82	16.66	12.73	10.11	6.02	4.8	137.75
2015	6.69	8.96	9.35	13.96	14.99	14.24	17	16.76	13.07	10.49	9.21	8.82	143.55
2016	7.24	7.86	11.68	15.36	14.42	15.23	17.43	16.75	13.34	10.92	1.70		131.93
Σύνολο 9/11/2012-8/11/2016	26.15	32.01	44.32	56.21	63.45	60.55	68.43	68.28	54.67	44.63	31.12	26.62	576.45
Ποσοστό εν. παρ. ως προς συνολικό	4.5%	5.6%	7.7%	9.8%	11.0%	10.5%	11.9%	11.8%	9.5%	7.7%	5.4%	4.6%	100.0%
Μέση τιμή (MWh)	6.54	8.00	11.08	14.05	15.86	15.14	17.11	17.07	13.67	11.16	6.22	6.66	115.29



Εικόνα 6 : Η ενεργειακή παραγωγή ανά μήνα του φ/β σταθμού Αιγείρου.

### 5.2.2. Συντήρηση και λειτουργία

Η συντήρηση του έργου καλύπτεται από ετήσιο συμβόλαιο προληπτικής συντήρησης και τεχνικής υποστήριξης για την αποκατάσταση βλαβών, από την εταιρεία που το κατασκεύασε. Οι έλεγχοι

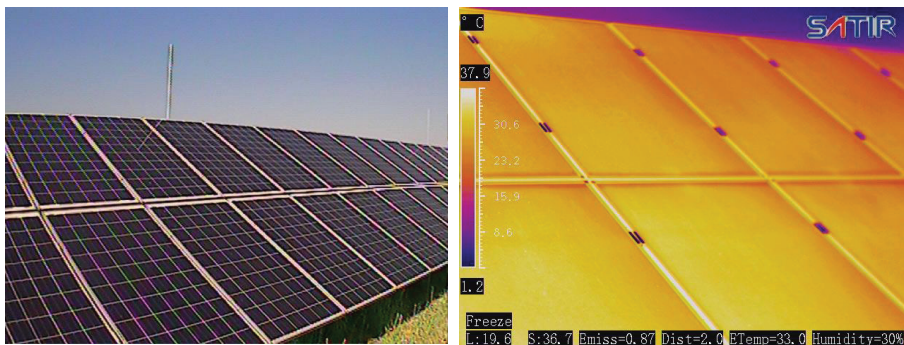
αφορούν τις σταθερές βάσεις, τις φ/β γεννήτριες, τους μετατροπείς ισχύος, τη μέτρηση αντίστασης γείωσης αλλά και της συνολικής ηλεκτρικής εγκατάστασης.

Η κοπή των χόρτων, ο καθαρισμός της θέσης εγκατάστασης και το πλύσιμο των φ/β γεννητριών με τη χρήση συστήματος απιονισμένου νερού, πραγματοποιείται από τοπική εταιρεία ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν.

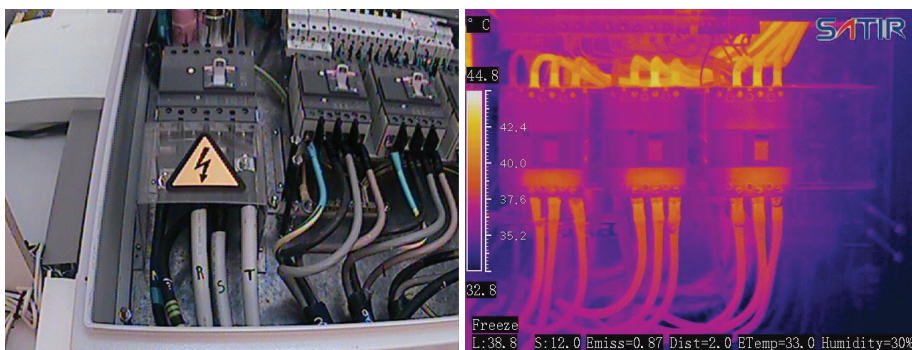
Τον Αύγουστο του 2015 πραγματοποιήθηκαν στο έργο από εξωτερική ανεξάρτητη εταιρεία συντήρησης φ/β σταθμών, οι παρακάτω εργασίες:

- α. Μέτρηση της απόδοσης των φ/β γεννητριών (I-V)
- β. Μέτρηση της αντίστασης μόνωσης (Riso) των καλωδίων DC και της γείωσης
- γ. Θερμογράφιση φ/β γεννητριών και ηλεκτρικών πινάκων

Από τις καμπύλες μέτρησης I-V και την θερμογράφιση, η απόδοση των φ/β γεννητριών είναι ικανοποιητική χωρίς σημαντικές αποκλίσεις από τις ονομαστικές τιμές που ορίζει ο κατασκευαστής. Δεν παρουσιάστηκε κάποιο πρόβλημα στις μετρήσεις αντίστασης μόνωσης των καλωδίων, ούτε και στις καμπύλες I-V των στοιχειοσειρών. Από τη θερμογράφιση των ηλεκτρολογικών πινάκων δεν παρουσιάστηκε κάποιο πρόβλημα στο εσωτερικό τους και στα επιμέρους ασφαλιστικά μέσα.



Εικόνες 7 & 8 : Αποτελέσματα θερμογράφισης στις φωτοβολταϊκές γεννήτριες



Εικόνες 9 & 10 : Αποτελέσματα θερμογράφισης στο κεντρικό πίνακα

Η σοβαρότερη βλάβη που παρατηρήθηκε ήταν η παύση λειτουργίας λόγω πτώσης κεραυνού στον μετασχηματιστή του δικτύου που συνδέεται ο σταθμός κατά το πρώτο έτος λειτουργίας του, ο οποίος αντικαταστάθηκε σε λίγες ημέρες με ένα νέο από τον ΔΕΔΔΗΕ. Επίσης έχουν αντικατασταθεί κάμερες και μετρητικά όργανα των μετεωρολογικών σταθμών που παρουσίασαν δυσλειτουργία.

Επιπλέον το έργο είναι πιστοποιημένο από την TUV Austria Hellas ότι τηρεί τις απαιτήσεις του προτύπου EN 62446:2009.

### 5.3. Οικονομικό αποτύπωμα

Το κόστος των έργων είναι ίσο με 210.000 ευρώ εκ των οποίων 53% ήταν ίδια κεφάλαια και το υπόλοιπο δεκαετές δάνειο με επιτόκιο 7,6%. Η ελληνική προστιθέμενη αξία των έργων είναι ίση με 30% (βάσεις στήριξης Alupil, φ/β πλαίσια καλώδια Cablel, αντικεραυνικά συστήματα Raycar) ενώ η σχεδίαση, κατασκευή και συντήρηση πραγματοποιήθηκε/είται από Ελληνικές εταιρείες (Ecoenergia, Μεσσαρίτης Ανανεώσεις, Καπόλλας κα).

Μετά από συνεχείς αλλαγές της νομοθεσίας και του συστήματος στήριξης τα έργα αυτά σήμερα προσφέρουν εσωτερικό βαθμό ιδίων κεφαλαίων εικοσαετίας (IRR) ίσο με 22,96% και απόσβεση των ιδίων κεφαλαίων σε 4 έτη. Τα βασικά οικονομικά στοιχεία του φ/β σταθμού παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.

Πίνακας 6: Συγκεντρωτικά οικονομικά στοιχεία για τον φ/β σταθμό.

Α. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ			
ΤΕΧΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ			
1	Εγκατεστημένη ισχύς	KWp	97.00
2	Εκτίμηση ενεργειακής απόδοσης	KWh/KWp	0
3	Ενεργειακή απόδοση πρώτου έτους λειτουργίας	KWh	151.150
4	Κόστος υλοποίησης	□	210.000
ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ - ΧΡΗΜΑΤΟΔΟΤΗΣΗ ΕΡΓΟΥ			
1	Ποσοστό Επιχορήγησης	%	0%
2	Ίδια Κεφάλαια	%	111.017
3	Δανεισμός	%	98.983
4	Επιτόκιο μακροπρόθεσμου δανείου	%	7.60%
5	Περίοδος αποπληρωμής μακρ. δανείου	έτη	10
ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΈΞΟΔΑ			
1	Κόστος ασφάλισης- Security	%	0.25%
2	Κόστος συντήρησης & λειτουργίας - ενοίκιο	%	0.75%
525			2.875
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΑΓΟΡΑΠΩΛΗΣΙΑΣ			
1	Ποσοστό προσαύξησης εξόδων ετησίως	%	3.00%
2	Τιμή πώλησης KWh τον πρώτο χρόνο	□	(0,34 πλέον) 0.3400 €
3	Ποσοστό προσαύξησης εσόδων ετησίως	%	0.00%
4	Ποσοστό μείωσης της απόδοσης του συστήματος	%	1%
ΧΡΗΜΑΤΟΡΕΣ			
	Ίδια κεφάλαια επενδυτή	€	111,017 €
	Εκταμίευση μακρ. Δανείου	□	98,983 €
	Εκταμίευση επιχορήγησης	□	- €
	Κόστος μακροπρόθεσμου δανείου	□	144,863 €
	<u>Φορολογητέο εισόδημα</u>		
	Ασφάλιση	-	17,331 €
	Συντήρηση και λειτουργία	-	77,252 €
	Φόροι	-	198,356 €
	Έσοδα από πώληση ενέργειας	-	955,208 €
	Τόκοι Μακροπρόθεσμου δανείου	-	45,880 €
	<b>Επιτόκιο προεξόφλησης</b>		<b>5.50%</b>
	<b>Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης ιδίων κεφαλαίων</b>		<b>22.96%</b>
	<b>ΚΠΑ</b>		<b>197,696 €</b>

### 5.4. Περιβαλλοντικό αποτύπωμα

Η λειτουργία του φ/β σταθμού έχει θετικό ενεργειακό και περιβαλλοντικό αποτύπωμα στο περιβάλλον. Συμβάλλει στη προστασία του περιβάλλοντος και την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής παράγοντας πράσινη ηλεκτρική ενέργεια αξιοποιώντας το εγχώριο ηλιακό δυναμικό.

Τηρεί την εθνική νομοθεσία για τη προστασία του περιβάλλοντος αφού ο σταθμός διαθέτει απαλλαγή από έγκριση περιβαλλοντικών επιπτώσεων, ενώ όλος ο χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός συμμορφώνεται με τα διεθνή πρότυπα.

Τα περιβαλλοντικά ετήσια οφέλη λόγω της λειτουργίας του λαμβάνοντας ως βάση την προαναφερθείσα μέση ετήσια ενεργειακή παραγωγή τετραετίας είναι τα ακόλουθα [5], [6] :

- i. Αποφυγή έκλυσης 122,5 τόνων CO<sub>2</sub>, 2,2 τόνου SO<sub>2</sub> και άλλων αερίων του θερμοκηπίου
- ii. Υποκατάσταση καύσης 103 τόνων λιγνίτη ή 244 βαρελιών πετρελαίου
- iii. Η λειτουργία των έργων ισοδυναμεί με 188 στρέμματα δάσους ή 9.425 δέντρων όσο αναφορά την απορρόφηση CO<sub>2</sub>
- iv. Από περιβαλλοντική άποψη, με την αποφυγή έκλυσης 122,5 τόνων CO<sub>2</sub> είναι σαν να αποφεύγεται η εκπομπή καυσαερίων από 44 αυτοκίνητα (μεσαίας κατηγορίας) τα οποία διανύουν 15.000 km/έτος.

Οικονομικά, το άμεσο όφελος της Εθνικής οικονομίας ανά έτος είναι περί τα 1225 ευρώ με τιμή 10 ευρώ/τόνο CO<sub>2</sub>.

Πέρα από τη τήρηση της περιβαλλοντικής νομοθεσίας, την ηλεκτροπαραγωγή χωρίς ρύπους, απόβλητα, την αποσρόβηση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και της κατανάλωσης νερού η επιχείρηση υπολογίζει ανά έτος το ανθρακικό αποτύπωμα της από τις μετακινήσεις για την επίβλεψη λειτουργίας και τη συντήρηση του αλλά και την διαχείριση της εταιρείας (διαχειριστής, λογιστής κτ). Ο ετήσιος μηδενισμός του ανθρακικού αποτυπώματος πραγματοποιείται μέσω της αγοράς δικαιωμάτων άνθρακα που παράγονται από έργα μείωσης των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής, από έργα προστασίας του κλίματος και του περιβάλλοντος και ισοδυναμεί – συνιστά μία συμμετοχή στη χρηματοδότηση τέτοιων περιβαλλοντικά επωφελών έργων. Η συνολική εκπομπή CO<sub>2</sub> για το τελευταίο έτος ήταν ίση με 2,5 τόνοι και αγοράστηκαν δικαιώματα άνθρακα (VCS) από ένα μικρό υδροηλεκτρικό έργο στην Ινδονησία μέσω της εταιρείας South Pole Carbon.

Η επιχείρηση είναι 100% φιλική προς το περιβάλλον και ανθρακικά ουδέτερη (carbon neutral), ενώ παράλληλα έχει ενταχθεί στο Σύστημα Εγγυήσεων Προέλευσης (GOs) για την ενέργεια που παράγει. Μέσω της επικείμενης πλήρους ενεργοποίησης της αγοράς εγγυήσεων προέλευσης και στην Ελλάδα και της αποκάλυψης του ενεργειακού μείγματος των προμηθευτών, η εταιρεία ευελπιστεί να έχει ένα μικρό έσοδο από τη πώληση αυτών στην αγορά.

Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας των σταθμών είναι αμελητέα, ενώ η πλύση των φ/β πραγματοποιείται μόνο όταν υπάρχει αυξημένη επικάλυψη σκόνης και βρωμιάς μετά από επίσκεψη στο σταθμό και δεν υπάρχει πρόβλεψη για βροχοπτώση ή επόμενο διάστημα. Ως συνήθως πραγματοποιούνται δύο πλύσεις ανά έτος πριν και μετά το καλοκαίρι αλλά υπήρξαν και έτη που δεν έγινε κάποια πλύση λόγω των αυξημένων βροχοπτώσεων. Με αυτούς τους τρόπους ελαχιστοποιείται η χρήση νερού για καθαρισμό. Βιβλιογραφικά, για τον καθαρισμό των φ/β γεννητριών απαιτούνται κατά μέσο όρο 0,114m<sup>3</sup> νερού ανά MWh [7] άρα με ετήσια ενεργειακή παραγωγή 143,075 MWh, η εκτιμώμενη ποσότητα νερού είναι ίση με 16,3 m<sup>3</sup>.

Σύμφωνα με πρόσφατη έκθεση της International Energy Agency [6], η ενέργεια που απαιτείται για την κατασκευή ενός φωτοβολταϊκού συστήματος (πλαίσια συν παρελκόμενος εξοπλισμός) είναι κατά μέσο όρο 2.525 kWh/kWp για πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά, οπότε η ενέργεια που καταναλώθηκε για την κατασκευή όλου του εξοπλισμού είναι ίση με 244.925 kWh, ενέργεια η οποία έχει παραχθεί στη διάρκεια 1,7 ετών λειτουργίας.

Έχουν τοποθετηθεί ενημερωτικές πινακίδες στις περιφράξεις για τα περιβαλλοντικά οφέλη από τη λειτουργία του σταθμού συμβάλλοντας και αυτές στην ενημέρωση των κατοίκων (εικόνα 11).



Εικόνα 11 : Πινακίδα με περιβαλλοντική πληροφορία στη περιφράξη.

Η εταιρεία διαχώρισε τα υλικά κατασκευής και τα απέρριψε σε κάδους ανακύκλωσης ενώ για τη λειτουργία της χρησιμοποίησε ανακυκλωμένο χαρτί και εφαρμόζει ανακύκλωση στα έγγραφα που απορρίπτει.

Πραγματοποιείται καθαρισμός της έκτασης του φ/β σταθμού και της γύρω περιοχής ανά εξάμηνο από σκουπίδια, ενώ τα κομμένα χόρτα δίνονται ως τροφή σε κτηνοτρόφους του οικισμού Αιγείρου. Οι επισκέψεις συντήρησης και οι εργασίες στο σταθμό πραγματοποιούνται σε κατάλληλες ώρες για περιορισμό της ενόχλησης των κατοίκων.

### 5.5. Κοινωνικό αποτύπωμα

Η αδειοδότηση του σταθμού διήρκεσε δεκαοκτώ μήνες (18) μήνες και περίπου άλλους έξι (6) μήνες η έγκριση της δανειοδότησης του. Η κατασκευή σταθμού διήρκεσε περί τις εικοσιπέντε (25) ημέρες και πραγματοποιήθηκε από τοπική τεχνική εταιρεία.

Για την αποδοτική λειτουργία του και τη μεγιστοποίηση της ενεργειακής τους παραγωγής απασχολούνται μερικώς δύο άτομα το έτος με περίπου 50-70 ανθρωποώρες εργασίας. Οι εργασίες που πραγματοποιούνται είναι η κοπή χόρτων, το πλύσιμο των φ/β γεννητριών, η σύσφιξη των βάσεων αλλά και των συνδέσεων στους ηλεκτρικούς πίνακες, ο σπτικός αλλά και μέσω φορητού Η/Υ έλεγχος της λειτουργίας όλης της εγκατάστασης καθώς και η επανεκκίνηση του τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού εξαιτίας προβλημάτων του δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Ανά έτος πραγματοποιείται αξιολόγηση λειτουργίας των σταθμών και εντοπισμός τμημάτων του εξοπλισμού που χρήζουν συντήρησης ή αντικατάστασης, ενώ πραγματοποιείται και ενημέρωση του λογισμικού των μετατροπών για την βέλτιστη λειτουργία τους.

Φυσικά η εταιρεία χρησιμοποιεί λογιστικές υπηρεσίες και τα έργα καλύπτονται από ασφαλιστήριο συμβόλαιο. Είναι φανερό παρόλο το μέγεθος των έργων, η κατασκευή αλλά και η αποδοτική λειτουργία τους συμβάλλει στην απασχόληση σε τοπικό επίπεδο. Επιπλέον, υπάρχει σύστημα κλειστού κυκλώματος τηλεόρασης και μετάδοσης σήματος σε τοπική ιδιωτική εταιρεία φύλαξης.

Οι κάτοικοι του πλησιέστερου οικισμού της Αιγείρου ενημερώθηκαν κατ' ιδίαν στη περίοδο της κατασκευής αλλά και στις επισκέψεις ελέγχου και συντήρησης, ενώ πλέον έχουν εξοικειωθεί με την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας για ηλεκτροπαραγωγή αλλά και για τα οφέλη που αυτή έχει.

Συνάμα η λειτουργία του φ/β σταθμού συμβάλλει στην εκπαιδευτική διαδικασία και την εφαρμοσμένη έρευνα αναφορικά με την αξιολόγηση λειτουργίας τέτοιων σταθμών, τη πώση της απόδοσης τους στη διάρκεια των ετών, τη σύγκριση με εκτιμήσεις λογισμικών πακέτων κα. Μέσω της διάχυσης της πληροφορίας σχεδίασης, ανάπτυξης και λειτουργίας του φ/β σταθμού στο Εργαστήριο ΑΠΕ του Τμήματος Μηχανικών Ενεργειακής Τεχνολογίας του ΤΕΙ Αθήνας έχουν πραγματοποιηθεί εργασίες και δημοσιεύσεις σε επιστημονικά συνέδρια (πχ. 10<sup>ο</sup> Εθνικό Συνέδριο για τις Ήπιες Μορφές Ενέργειας – ΙΗΤ, Θεσ/νικη 26-28/11/2014) και άρθρα σε τεχνικά περιοδικά (Τεχνική Επιθεώρηση 11-12/2015).

## 6. ΝΟΜΟΘΕΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΡΥΘΜΙΣΤΙΚΕΣ ΑΛΛΑΓΕΣ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΕΝΑΡΞΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Συνοπτικά οι αλλαγές που πραγματοποιήθηκαν μετά την λειτουργία του φ/β σταθμού είναι:

- i. Επιβολή έκτακτης ειδικής εισφοράς αλληλεγγύης 30% επί των ακαθάριστων εσόδων με περίοδο εφαρμογής 7/2012-3/2014 με συνολικό κόστος ίσο με 20.624 ευρώ.
- ii. Έκδοση εκπτωτικού (πιστωτικού) τιμολογίου επί της αξίας της πωληθείσας ενέργειας για το 2013 (N.4254/2014) ύψους 10.038 ευρώ.
- iii. Κατάργηση της έκτακτης εισφοράς και αυτοδίκαιη επέκταση συμβάσεων πώλησης κατά 7 έτη με μειωμένη τιμή 90 ευρώ/MWh. Κατάργηση της ετήσιας αναπροσαρμογής της τιμής αποζημίωσης (N.4254/2014). Διαδικασία με/χωρίς ενίσχυση διαφοροποίησης των παραγωγών.
- iv. 29% φορολογικός συντελεστής και 33% πάνω από 50.000 ευρώ.
- v. 100% προκαταβολή φόρου.
- vi. Επιβολή από τον 1/2016 του τέλους ασφάλειας ενεργειακού εφοδιασμού (γνωστότερο και ως τέλος διακοψιμότητας) ίσο με 3,6% επί των ακαθάριστων εσόδων.

Η καθυστέρηση πληρωμών από τον Λειτουργό της Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΛΑΓΗΕ ΑΕ) βρίσκεται σήμερα στους 3 μήνες, ενώ είχε ξεπεράσει τους εννιά μέσα στο 2012-3, στοιχείο που δυσχεραίνει την ομαλή και εύρυθμη λειτουργία της εταιρείας. Σήμερα το ανεξόφλητο ποσό τιμολογίων ισούται με 17.971,25 ευρώ και συνεχίζονται οι πληρωμές του μήνα Ιουνίου 2017. Απουσιάζει προγραμματισμός πληρωμών στους παραγωγούς ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ, ενώ ο Ειδικός Λογαριασμός των ΑΠΕ στο ΛΑΓΗΕ εκτιμάται ότι θα είναι πλεονασματικός από τον Δεκέμβριο του

2017. Συμπληρωματικά, με τα προαναφερθέντα η αύξηση της φορολογίας και των ασφαλιστικών εισφορών, επηρέασαν αρνητικά την κερδοφορία της επιχείρησης.

## 7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Παρουσιάστηκε η περιβαλλοντική, οικονομική και κοινωνική πλευρά της λειτουργίας ενός φ/β σταθμού μεσαίας κλίμακας για διάρκεια τριών ετών στην Ελλάδα αλλά και οι πρακτικές που εφαρμόστηκαν και εφαρμόζονται μέσα από ποσοτικά και ποιοτικά στοιχεία.

Ο φ/β σταθμός που μελετήθηκε προσφέρει όλα τα πλεονεκτήματα των φ/β συστημάτων όπως η διεσπαρμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς κινητά μέρη και περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η λειτουργία του φ/β σταθμού είναι ομαλή, με μία ικανοποιητική ετήσια απόδοση και υψηλή ενεργειακή αποδοτικότητα που φθάνει τις 1.486 kWh/kWp (μέσο όρο τετραετίας), υψηλότερα από τις αρχικές εκτιμήσεις πριν την κατασκευή, επιβεβαιώνοντας τις βέλτιστες πρακτικές που ακολουθήθηκαν κατά τη σχεδίαση και κατασκευή του αλλά και τον έλεγχο λειτουργίας του. Η πιστοποίηση του κατά το πρότυπο EN 62446:2009 αλλά και τα αποτελέσματα της επιθεώρησης από εξωτερική εταιρεία επιβεβαιώνουν την άρτια λειτουργία του.

Η εταιρεία σχεδιάζει τη διενέργεια εκπαιδευτικών εκδρομών από σχολεία της περιοχής στο φ/β σταθμό σε συνεργασία με το Κέντρο Περιβαλλοντικής Εκπαίδευσης του Δ. Μαρωνείας – Σαπών, με τη παροχή ενημερωτικού υλικού για την ηλιακή ενέργεια, ώστε να εξοικειωθούν οι μαθητές με αυτή τη μορφή αιφορικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Επόμενα βήματα είναι η υλοποίηση ιστοσελίδας για την εταιρεία που θα παρουσιάζεται η δραστηριότητα της και οι επιδόσεις του φ/β σταθμού, η οποία θα είναι ανθρακικά ουδέτερη μέσω της χρήσης δικαιωμάτων άνθρακα αλλά και η συνέχιση της αρθρογραφίας στον τοπικό τύπο και ΜΜΕ για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και τα οφέλη που μπορεί να αποκομίσει η ελληνική κοινωνία βαδίζοντας στο δρόμο της βιώσιμης ανάπτυξης.

Η πράσινη διεσπαρμένη ηλεκτροπαραγωγή συμβάλλει θετικά στην αιφόρο ανάπτυξη και στην αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής αλλά παράλληλα καταφέρνει να είναι οικονομικά βιώσιμη και αποδοτική αλλά και με θετική περιβαλλοντική διάσταση στη κοινωνία. Βασικός παράγοντας είναι όμως η ύπαρξη σταθερότητας στο νομοθετικό, ρυθμιστικό και χρηματο-οικονομικό πλαίσιο.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Σύνδεσμος Εταιρειών φ/β - ΣΕΦ, «Ένας πρακτικός τεχνικός οδηγός», Αύγουστος 2013. Διαθέσιμο: [http://helapco.gr/pdf/PV\\_Guide\\_Aug\\_2013.pdf](http://helapco.gr/pdf/PV_Guide_Aug_2013.pdf) (πρόσβαση 01.11.2017)
- [2] Σύνδεσμος Εταιρειών φ/β - ΣΕΦ, «Στατιστικά στοιχεία αγοράς φωτοβολταϊκών για το 2013», Ιούνιος 2014. Διαθέσιμο : [http://helapco.gr/wp-content/uploads/pv-stats\\_greece\\_2013\\_June14.pdf](http://helapco.gr/wp-content/uploads/pv-stats_greece_2013_June14.pdf)
- [3] Σύνδεσμος Εταιρειών φ/β - ΣΕΦ, «Στατιστικά στοιχεία αγοράς φωτοβολταϊκών για το 2016», Απρίλιος 2017. Διαθέσιμο : [http://helapco.gr/wp-content/uploads/pv-stats\\_greece\\_2016\\_25Apr2017-2.pdf](http://helapco.gr/wp-content/uploads/pv-stats_greece_2016_25Apr2017-2.pdf)
- [4] Marion B., Adelstein J., Boyle K. "Performance parameter for Grid-Connected PV Systems", 31st IEEE Photovoltaics Specialists, Florida 2005.
- [5] Οδηγός επενδύσεων του Υπ. Ανάπτυξης για τη 2η προκήρυξη των μέτρων 2.2 και 3.2 του ΕΠΕ/Β' ΚΠΣ. Ποσότητες αερίων ρύπων που δεν εκλύονται στην ατμόσφαιρα λόγω λειτουργίας μονάδων ΑΠΕ.
- [6] Σύνδεσμος Εταιρειών φ/β - ΣΕΦ, «Φωτοβολταϊκά και περιβάλλον». Διαθέσιμο: [http://helapco.gr/pdf/PV\\_Environment.pdf](http://helapco.gr/pdf/PV_Environment.pdf) (πρόσβαση 01.11.2017).
- [7] IPCC (2102), Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation - Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

## ΕΜΠΕΙΡΙΕΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΞΑΕΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΕ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟΥΣ ΣΤΑΘΜΟΥΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Κωνσταντίνος Γκαράκης<sup>1\*</sup>, Ελένη Γκαράκη<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>Τμήμα Μηχανικών Ενεργειακής Τεχνολογίας, ΤΕΙ Αθήνας

<sup>2</sup>EG-Energy

e-mail: ape@teiath.gr

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η πορεία της Ελληνικής βιομηχανίας παραγωγής φωτοβολταϊκών (φ/β) ως σήμερα και δίνονται αναλυτικά στοιχεία για αυτόν τον τομέα. Πραγματοποιείται διερεύνηση των αιτιών που οδήγησαν στη παύση λειτουργίας των παραγωγικών μονάδων.

Επίσης, παρατίθενται οι εμπειρίες από την εξαετή λειτουργία (3/2011-2/2017) δύο φ/β σταθμών (στο έδαφος – σταθερές βάσεις) ονομαστικής ισχύος 19,8 kWp στη Ροδόπη οι οποίοι διαθέτουν ελληνικής παραγωγής πολυκρυσταλλικά φ/β Silcio (κατασκευασμένα στη Πάτρα) ισχύος 220 Wp.

Πραγματοποιείται αποτίμηση της ενεργειακής τους παραγωγής, περιγράφονται σφάλματα που προέκυψαν και δίνονται τα αποτελέσματα της μέτρησης της απόδοσης των πλαισίων (I-V) των φ/β σταθμών αλλά και της θερμογράφησης τους που πραγματοποιήθηκε από ανεξάρτητη εταιρεία.

Η μέση ετήσια ενεργειακή αποδοτικότητα των φ/β σταθμών για την υπό μελέτη εξαετία είναι 1579 και 1597 kWh/kWp, ενώ από τις καμπύλες μέτρησης I-V και τη θερμογράφηση, η απόδοση των φ/β πλαισίων είναι ικανοποιητική χωρίς σημαντικές αποκλίσεις από τις ονομαστικές τιμές που ορίζει ο κατασκευαστής.

Η εργασία αυτή θίγει το σοβαρό θέμα το οποίο απασχολεί πληθώρα παραγωγών ηλεκτρικής ενέργειας από φ/β, οι οποίοι διαθέτουν ελληνικά φ/β και πλέον δεν έχουν τη παροχή εγγυήσεων και υποστήριξης λόγω της παύσης λειτουργίας των εργοστασίων παραγωγής τους, αλλά και είναι πρωτότυπο αφού για πρώτη φορά παρουσιάζονται πειραματικές επιδόσεις ελληνικών φ/β μετά από δεδομένα λειτουργίας και πειραματικές μετρήσεις και ελέγχους για ένα ικανοποιητικό διάστημα λειτουργίας.

**Λέξεις Κλειδιά:** ελληνικά φ/β, ενεργειακή παραγωγή, μέτρηση I-V, θερμογράφηση, Silcio.

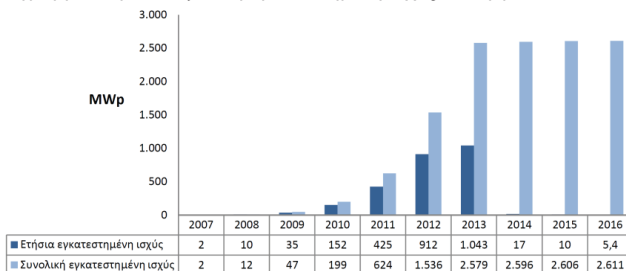
## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) στην Ελλάδα στηρίζεται σε Ευρωπαϊκές Οδηγίες, οι οποίες ενσωματώθηκαν από το 1994 στην Εθνική Νομοθεσία. Στο πλαίσιο των δράσεων της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τη προώθηση της χρήσης ΑΠΕ στην οικονομία της αλλά και της αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής, έχουν τεθεί ποσοτικοί στόχοι διείσδυσης στο Ελληνικό ενεργειακό μείγμα για το 2020 και έχουν εκπονηθεί σχέδια δράσης. Από το 2000 παρατηρείται σημαντική αύξηση των εγκαταστάσεων ΑΠΕ διαδραματίζοντας πρωταγωνιστικό ρόλο ο κλάδος των φωτοβολταϊκών (φ/β) σταθμών. Στην Ελλάδα, την εξαετία 2008-2013 υπήρξε ταχεία εγκατάσταση διασυνδεδεμένων φ/β σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, λόγω των υψηλών τιμών πώλησης της παραγόμενης ενέργειας και της απλουστευμένη αδειοδότησης τους. Η εγκατεστημένη ισχύς διασυνδεδεμένων φ/β έφτασε από τα 11MW το 2008, στα 2579MW στα τέλη του 2013 ενώ οι επενδύσεις της εξαετίας έφτασαν τα 5 δις ευρώ. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φ/β ως ποσοστό της συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας έφτασε το 6,7% το 2013, κατατάσσοντας την Ελλάδα στη δεύτερη θέση διεθνώς [1].

Η διετία όμως 2014 – 2015 αποτέλεσε ένα καταστροφικό διάστημα για την φ/β αγορά στην Ελλάδα. Το πάγωμα αδειοδότησης νέων έργων που ίσχυσε για 20 μήνες (από τον Αύγουστο 2012 έως και τον Μάρτιο 2014) και ο καθορισμός εξαιρετικά χαμηλών αποζημιώσεων για την παραγόμενη από νέα φωτοβολταϊκά ενέργεια από το 2015 και μετά που δεν οδηγούσαν σε βιώσιμες επενδύσεις ήταν οι βασικότερες αιτίες για την απότομη αυτή πτώση της αγοράς. Παράλληλα, το άσχημο κλίμα που δημιουργήθηκε για τον κλάδο τα προηγούμενα χρόνια με τις απανωτές αναδρομικές μειώσεις, το έλλειμμα του ειδικού λογαριασμού ΑΠΕ και οι περιορισμοί στη κίνηση κεφαλαίων, μείωσε ακόμα περισσότερο το επενδυτικό ενδιαφέρον από μεριάς επενδυτών αλλά και καταναλωτών.

Σύμφωνα με στοιχεία του Συνδέσμου Εταιρειών Φωτοβολταϊκών (ΣΕΦ) [2] το 2016 η αγορά φ/β έχει επιστρέψει στα επίπεδα του 2007, πριν αρχίσει δηλαδή η ουσιαστική ανάπτυξη της. Η καθυστέρηση στην υιοθέτηση νέου θεσμικού πλαισίου (κάτι που έγινε μόλις τον Αύγουστο του 2016 και δεν διευκόλυνε την έγκαιρη ανάπτυξη μεσαίων και μεγάλων έργων) και η επιβολή ελέγχου κίνησης κεφαλαίων (που επηρέασε την εγκατάσταση μικρών συστημάτων αυτοπαραγωγής, net-metering), υπήρξαν οι βασικές αιτίες για τα απογοητευτικά αποτελέσματα. Όμως ακόμη και σήμερα λόγω της πρότερης εντυπωσιακής ανάπτυξης, τα φ/β κάλυψαν το 7,05% των αναγκών της χώρας σε ηλεκτρική ενέργεια (2016), φέρνοντας την Ελλάδα στην τρίτη θέση διεθνώς σε ότι αφορά στη συμβολή των φωτοβολταϊκών στη συνολική ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η εγκατεστημένη ισχύς των φ/β από το 2007 ως το 2016.



Εικόνα 1 : Μεταβολή της εγκατεστημένης ισχύος φ/β στην Ελλάδα.

Στα πλαίσια της ανάπτυξης του κλάδου των φ/β στην Ελλάδα, αναπτύχθηκαν παραγωγικές μονάδες φωτοβολταϊκών (wafers, cells, πλαίσια) οι οποίες λειτουργήσαν για μερικά χρόνια ενώ σήμερα καμία δεν είναι σε λειτουργία για μια σειρά από λόγους που θα αναλυθούν παρακάτω.

## 2. ΣΚΟΠΟΣ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η πορεία της Ελληνικής βιομηχανίας παραγωγής φωτοβολταϊκών (φ/β) ως σήμερα και δίνονται αναλυτικά στοιχεία για αυτόν τον τομέα. Πραγματοποιείται διερεύνηση των αιτιών που οδήγησαν στη παύση λειτουργίας των παραγωγικών μονάδων.

Παρατίθενται οι εμπειρίες από την εξαετή λειτουργία (3/2011-2/2017) δύο φ/β σταθμών (στο έδαφος – σταθερές βάσεις) ονομαστικής ισχύος 19,8 kWp στη Ροδόπη οι οποίοι διαθέτουν ελληνικής παραγωγής πολυκρυσταλλικά φ/β Silcio (κατασκευασμένα στη Πάτρα) ισχύος 220 Wp. Επιπλέον πραγματοποιείται αποτίμηση της ενεργειακής τους παραγωγής, περιγράφονται σφάλματα που προέκυψαν και δίνονται τα αποτελέσματα της μέτρησης της απόδοσης των πλαισίων (I-V) των φ/β σταθμών αλλά και της θερμογράφησης τους που πραγματοποιήθηκε από ανεξάρτητη εταιρεία.

### 3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η έρευνα είναι κατά βάση περιγραφική, λόγω της επιθυμίας μας να εκτιμήσουμε τα χαρακτηριστικά μιας δεδομένης κατάστασης. Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στην αμεροληψία όσο αναφορά την οργάνωση της έρευνας, τις προδιαγραφές της και το σχεδιασμό της. Πρόκειται για περιπτωσιολογική μελέτη η οποία είναι αντιπροσωπευτική για έργα τα οποία χρησιμοποιούν Ελληνικά φωτοβολταϊκά πλαίσια.

Η συλλογή των στοιχείων στη διαδικασία της έρευνας γίνεται μέσω χρήσης πρωτογενών πηγών από τη φάση της σχεδίασης, υλοποίησης αλλά και λειτουργίας των δύο φ/β σταθμών ονομαστικής ισχύος έκαστος 19,8 kWp. Πραγματοποιείται ανασκόπηση και έλεγχος των διαθέσιμων πληροφοριών από διαθέσιμες πηγές αλλά και το προσωπικό αρχείο των συγγραφέων σχετικά με την Ελληνική βιομηχανία παραγωγής φ/β για την εκπλήρωση των στόχων της έρευνας. Δευτερογενή στοιχεία αντλούνται από τα τεχνικά φυλλάδια και την τεχνική βιβλιογραφία περί των φ/β πλαισίων και των κατασκευαστών τους. Η έρευνα είναι μεικτή, ποσοτική και ποιοτική. Η ποιοτική έρευνα στοχεύει στη συλλογή στοιχεία που δεν μπορούν να μετρηθούν άμεσα και είναι βοηθητική της ποσοτικής. Το μεγαλύτερο μέρος της έρευνας σε αυτή την εργασία είναι ποσοτική. Η στρατηγική που θα ακολουθηθεί κυρίρχα είναι η συλλογή πρωτογενών δεδομένων μέσα από το αρχείο της επιχείρησης.

Η περίοδος μελέτης του φ/β σταθμού είναι η εξαετία 1/3/2011-28/2/2017.

### 4. Η ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ Φ/Β

#### 4.1. Βασικά στοιχεία των βιομηχανιών

Στην Ελλάδα αναπτύχθηκαν και λειτούργησαν πέντε μονάδες παραγωγής φ/β (wafers, cells, πλαίσια) και μία στη Βουλγαρία ενώ μία ακόμη δεν υλοποιήθηκε ποτέ. Οι μονάδες αυτές ήταν οι ακόλουθες [3], [4]:

- i. Η εταιρεία Solar Cells Hellas AE διαθέτει δύο μονάδες παραγωγής wafers, cells και φ/β πλαισίων στις ΒΙΠΕ Πάτρας και Θήβας. Οι δύο μονάδες είχαν μέγιστη συνολική ετήσια δυναμικότητα παραγωγής 80 MW wafers, 80 MW cells και 60 MW φ/β πλαίσια πολυκρυσταλλικού πυριτίου. Η έναρξη παραγωγής wafers (δισκίων) και cells (στοιχείων) ξεκίνησε στα τέλη 2008, ενώ η έναρξη παραγωγής Φ/Β πλαισίων άρχισε στα τέλη του 2009. Τα φ/β πλαίσια είχαν πιστοποίηση κατά IEC 61215 και IEC 61730. Ο μέγιστος αριθμός εργαζομένων τους ήταν 320 άτομα.
- ii. Οι εταιρίες Piritium AE και Silcio AE., ανήκουν στον όμιλο Κοπελούζου και έχουν έδρα στη ΒΙΠΕ Πάτρας. Υλοποίησαν επενδύσεις για παραγωγική μονάδα φωτοβολταϊκών δισκίων, στοιχείων και φ/β πλαισίων πολυκρυσταλλικού πυριτίου, συνολικού προϋπολογισμού 60 εκατ. Ευρώ, με έναρξη λειτουργίας τα μέσα του 2009. Ετήσια δυναμικότητα παραγωγής 30MW cells και 20MW φ/β πλαίσια. Τα φ/β πλαίσια είχαν πιστοποίηση κατά IEC 61215 και IEC 61730. Ο μέγιστος αριθμός εργαζομένων τους ήταν 122 άτομα.
- iii. Η εταιρεία Stibethern (Stel Solar) διαθέτει στη ΒΙΠΕ Σταυροχωρίου στο Κιλκίς μονάδα συναρμολόγησης Φ/Β πλαισίων πολυ-κρυσταλλικού πυριτίου με ετήσια δυναμικότητα παραγωγής 10 MWp. Ο μ μέγιστος αριθμός εργαζομένων τους ήταν 25 άτομα.
- iv. Η HelioSphera διαθέτει μονάδα παραγωγής στη ΒΙΠΕ Τρίπολης. Η επένδυση αφορούσε στη παραγωγική μονάδα φωτοβολταϊκών πλαισίων a-Si/μcSi (micromorph) – λεπτού υμενίου (thin film) δυνατότητας ετήσιας παραγωγής 500.000 πλαισίων, ή 60MWp ετησίως, προϋπολογισμού 200 εκατ. Ευρώ. Η έναρξη λειτουργίας της παραγωγής φ/β πλαισίων πραγματοποιήθηκε στα μέσα 2009. Τα φ/β πλαίσια είχαν πιστοποίηση κατά IEC 61215 και IEC 61730. Ο μέγιστος αριθμός εργαζομένων τους ήταν 197 άτομα.

- v. Η εταιρία Exel Solar εντός του 2009 είχε ξεκινήσει συναρμολόγηση φ/β πλαισίων κρυσταλλικού πυριτίου με μέγιστη ετήσια δυναμικότητα παραγωγής 50 MWp. Η έδρα της βρίσκεται επίσης στην ΒΙΠΕ Σταυροχωρίου, Κιλκίς. Τα φ/β πλαίσια είχαν πιστοποίηση κατά IEC 61215 και IEC 61730. Ο μέγιστος αριθμός εργαζομένων τους ήταν 120 άτομα.
- vi. Η εταιρεία Eenergy Solutions SA, (Όμιλος Βιοχάλκο) είναι εγκατεστημένη στη Βουλγαρία στην πόλη Πέρνικ. Η εταιρεία ξεκίνησε την συναρμολόγηση φωτοβολταϊκών πλαισίων κρυσταλλικού πυριτίου με δυναμικότητα 1 MWp ετησίως το 2005, κατόπιν το 2007 αύξησε την δυναμικότητα παραγωγής στα 15 MWp ετησίως. Τα φ/β πλαίσια είχαν πιστοποίηση κατά IEC 61215 και IEC 61730.
- vii. Η εταιρεία Ηλιοδομή Α.Ε. είχε σχεδιάσει την κατασκευή μονάδας στη ΒΙΠΕ Σταυροχωρίου, Κιλκίς, η οποία αν και εντάχθηκε στον αναπτυξιακό νόμο το 2001, αλλά λόγω οικονομικής δυσχέρειας της μητρικής τεχνικής εταιρίας ΘΕΜΕΛΙΟΔΟΜΗ η επένδυση δεν ολοκληρώθηκε αν και είχε κατασκευαστεί το 70% της υποδομής [5]. Η σχεδιαζόμενη δυναμικότητα θα ήταν ίση με 5 MW ετησίως και προϋπολογισμού 25 εκατ. ευρώ. Η μονάδα θα παράγανε επίσης ολοκληρωμένα κτιριακά φωτοβολταϊκά με δυναμικότητα 1,25 MW ετησίως [6].



Εικόνες 1,2,3 : Άποψη εγκατάστασης και γραμμής παραγωγής της εταιρείας Solar Cells Hellas ΑΕ.



Εικόνες 4,5 : Άποψη εγκαταστάσεων της Silcio και της Exel Group.



Εικόνες 6,7 : Άποψη των ημιτελών εγκαταστάσεων της Ηλιοδομής και της Heliosphera.

Το 2011 οι μονάδες αυτές είχαν την μέγιστη παραγωγή τους (περί τα 75 MW) ενώ από το 2012 η λειτουργία τους μειώθηκε και τελικά έκλεισαν τους τελευταίους μήνες του 2012 και στις αρχές του 2013. Περίπου το 15-20% της παραγωγής τους εξήχθη στο εξωτερικό. Το εκτιμώμενο κόστος επενδύσεων σε αυτές τις μονάδες είναι 500 εκ. ευρώ. Οι μονάδες αυτές παραμένουν κλειστές ως σήμερα και παρόλο τις διαβεβαιώσεις υπουργών για προσπάθεια επαναλειτουργίας τους.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η Solar Cells Hellas διαχειρίζεται χαρτοφυλάκιο φ/β σταθμών συνολικής ισχύος 400 MW στην Ελλάδα εκ των οποίων 300 MW είναι ιδιόκτητοι οι οποίοι έχουν υπαχθεί στις Διαδικασίες Στρατηγικών Επενδύσεων του Ν. 3894/2012 (Fast Track).

#### 4.2. Οι αιτίες της χαμένης ευκαιρίας της βιομηχανίας φ/β στην Ελλάδα

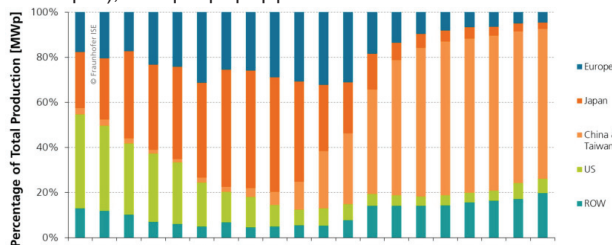
Η ψήφιση του Ν.3468/2006 που όριζε έναν γενναίο μηχανισμό στήριξης εγγυημένων τιμών για διάρκεια 20 ετών (FiT), ο οποίος είχε εφαρμοστεί σε πολλές Ευρωπαϊκές χώρες τη τελευταία δεκαετία, οδήγησε στην ανάπτυξη μιας αγοράς για τα φ/β, που ως τότε ήταν σε εμβρυακό στάδιο στηριζόμενη εξ' ολοκλήρου σε αυτόνομα συστήματα. Ο μηχανισμός εγγυημένων τιμών είχε ως σκοπό τη σταδιακή επίτευξη των Ευρωπαϊκών στόχων για τη συμμετοχή των ΑΠΕ στο ενεργειακό μείγμα και την ανάπτυξη της σχετικής βιομηχανίας, η οποία, με οικονομίες κλίμακας και τη τεχνολογική εξέλιξη, θα μείωνε το κόστος των τεχνολογιών ΑΠΕ (εδώ ειδικά τα φ/β) ώστε τελικά να γίνουν ανταγωνιστικά της συμβατικής παραγωγής ηλεκτρισμού.

Θα πρέπει να επισημανθεί ότι ο Ν.3468/2006 είχε δύο ουσιώδεις παραλείψεις. Έδινε κίνητρα για την παραγωγή, αλλά δεν είχε πρόβλεψη για την εξαίρεση επιδότησης των παγίων από τον αναπτυξιακό νόμο, με αποτέλεσμα για ένα χρονικό διάστημα να λαμβάνεται επιδότηση για την επένδυση πέρα από την αυξημένη τιμή πώλησης της παραγόμενης ενέργειας. Δεύτερη παράλειψη ήταν η μη προσαρμογή των εγγυημένων τιμών πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας (ταρίφας) στις σημαντικές πτωτικές τάσεις του κόστους του φ/β εξοπλισμού και ιδιαίτερα των φ/β πλαισίων. Τα παραπάνω μαζί με μετέπειτα άστοχες νομοθετικές ρυθμίσεις (όπως κλειδώμα тариφών για χρονικό διάστημα 18-36 μηνών) οδήγησαν σε έργα με υπερ-αποδόσεις (IRR 20ετίας ιδίων κεφαλαίων 50-60%) και σε υπέρμετρη διόγκωση της αγοράς και επίτευξη των στόχων της διεύθυνσης του 2020 εντός του 2013.

Μέσα σε αυτό το κλίμα ευφορίας και γνώσης ότι προσεχώς η αγορά των φ/β θα ανοίξει και στην Ελλάδα και μάλιστα με τρόπο εντυπωσιακό, επιχειρηματίες είδαν τον τομέα της παραγωγής φ/β πλαισίων ως μια καλή επενδυτική ευκαιρία. Οι ελληνικές μονάδες παραγωγής φ/β άρχισαν να κατασκευάζονται ήδη από το 2007-2008 με πρωτοπόρο την Energy Solutions (λειτουργία από το 2005), όταν σε όλο τον κόσμο υπήρχε αναβρασμός για την κάλυψη της συνεχούς αυξανόμενης ζήτησης φ/β πλαισίων. Η μέχρι τότε παραγωγή δεν επαρκούσε για να καλύψει τη διαρκώς αυξανόμενη ζήτηση και η δημιουργία νέων μονάδων έμοιαζε ως η πλέον λογική λύση. Ακόμη και μια χώρα χωρίς ιδιαίτερη βιομηχανική παράδοση και κουλτούρα, όπως η Ελλάδα, μπορούσε να εγκαταστήσει μέσα σε μικρό χρονικό διάστημα, υπερσύγχρονες παραγωγικές μονάδες, όπως και έκανε [3].

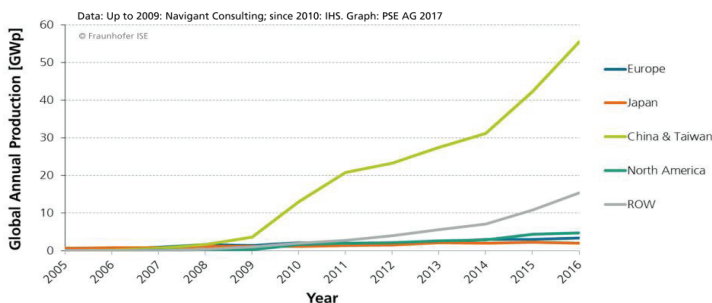
Η ροή των πραγμάτων όμως ήταν διαφορετική. Οι κύριες αιτίες που οδήγησαν την ελληνική βιομηχανία παραγωγής φ/β είναι οι ακόλουθες:

- Στην Κίνα την ίδια περίοδο κατασκευάστηκαν εκατοντάδες μονάδες παραγωγής φ/β, κατακτώντας το μεγαλύτερο μερίδιο παγκόσμια. Σύντομα η προσφορά ξεπέρασε τη ζήτηση (η οποία παρέμεινε εν τούτοις υψηλή) και ο ανταγωνισμός μείωσε τις τιμές. Η μείωση ήταν τόσο έντονη που Ευρωπαϊκές και Αμερικανικές παραγωγικές μονάδες δεν ήταν ανταγωνιστικές με τα κινεζικά φ/β τα οποία πλέον είχαν πολύ καλή ποιότητα κατασκευής και είχαν κερδίσει την εμπιστοσύνη των επενδυτών. Από τα μέσα του 2011, με τη μείωση του κόστους των φ/β, τόσο μειωνόταν και ο αριθμός των παραγωγικών μονάδων σε όλο τον κόσμο, ενώ η αγορά προχωρούσε σε συγχωνεύσεις και εξαγορές, κάτι απολύτως φυσιολογικό και αναμενόμενο σε μια αγορά που αρχίζει να εισέρχεται στη φάση της ωρίμανσης. Ακόμη και ισχυρές εταιρείες μπήκαν σε τροχιά κρίσης ή έπαυσαν ή πώλησαν τη δραστηριότητα της παραγωγής φ/β. Στις παρακάτω εικόνες είναι ξεκάθαρο ότι η βιομηχανία φ/β από το 2008-9 έχει μεταφερθεί στην Ασία (Κίνα και Ταϊβάν), ενώ η παραγωγή εκεί είναι πολλαπλάσια πλέον από ότι στην Ευρώπη.



Εικόνα 9 : Η παραγωγή φ/β πλαισίων ανά περιοχή από το 1997 ως το 2016 [7].

11<sup>ο</sup> Εθνικό Συνέδριο για τις ήπιες μορφές ενέργειας • Ι.Η.Τ. • Θεσσαλονίκη, 14-16.03.2018



Εικόνα 10 : Η παραγωγή φ/β πλασίων από το 2005 ως το 2016 [7].

Ακόμη και όταν επιβλήθηκαν δασμοί στην εισαγωγή κινέζικων φ/β για να υπάρξει ανταγωνισμός με τις εναπομείνουσες ευρωπαϊκές και αμερικάνικες εταιρείες, δεν βοήθησαν σημαντικά αλλά ήταν ένα ακόμη εμπόδιο στις επενδύσεις φ/β αφού συνέβαλαν στην αύξηση του κόστους κατά 10% μειώνοντας τις αποδόσεις των έργων. Η Κινεζική βιομηχανία φ/β κέρδισε το στοίχημα της ανταγωνιστικότητας, όχι λόγω του φθηνού εργατικού δυναμικού και πρόσβασης σε φθηνό χρέμα, αλλά βασικά λόγω οικονομίας κλίμακας και καθετοποίηση της παραγωγής [8]. Το 2011, η ετήσια δυναμικότητα των Ελληνικών φ/β βιομηχανιών ήταν 50-60 MW όταν στην Κίνα υπήρχαν βιομηχανίες με ετήσια δυναμικότητα 1-2 GW (20-30 φορές περισσότερη), αυτό είχε ως αποτέλεσμα η Κινεζική βιομηχανία να είναι οικονομικά βιώσιμη και να μπορεί να πουλήσει ως και 25% φθηνότερα. Όσο πιο μικρή είναι η δυναμικότητα της εταιρείας, τόσο μειώνεται το ανταγωνιστικό της πλεονέκτημα λόγω οικονομίας κλίμακας και καθετοποίησης της παραγωγής. Επιπλέον σύμφωνα με μελέτη της IHS [9] οι λόγοι που τα κινέζικα φ/β είναι φθηνότερα των υπολοίπων είναι η οικονομία κλίμακας, η εγγύτητα σε προμηθευτές χαμηλού κόστους (υλικών και ενέργειας) αλλά και ο μεγαλύτερος βαθμός τυποποίησης των παραγόμενων προϊόντων (πολυκρυσταλλικά φ/β πλαίσια με 60 cells).

Αν και έγιναν προσπάθειες από ελληνικές βιομηχανίες [10] να δοθούν κίνητρα στους επενδυτές όταν επιλέγουν εξοπλισμό από τις εγχώριες βιομηχανίες μέσω νομικής μελέτης τον Φεβρουάριο του 2012, υιοθετώντας το υπάρχον παράδειγμα της Ιταλίας δεν προχώρησε κάποια τέτοια ρύθμιση. Αν και με τον Ν.4062/2012 (ΦΕΚ 70Α – 03.03.2012) προβλεπόταν ότι εφόσον τουλάχιστον το 70% του κόστους εξοπλισμού προέρχεται από χώρα της Ευρωπαϊκής Ένωσης ή του Ευρωπαϊκού Οικονομικού Χώρου (επιπρόσθετα οι Ισλανδία, Λιχτενστάιν και Νορβηγία), είναι δυνατή η προσαύξηση κατά 10% της εγγυημένης τιμής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας από τον παραγωγό (ταρίφας) δεν προχώρησαν οι υπουργικές αποφάσεις που ορίζονταν για την ενεργοποίηση του (προσδιορισμός ορίων ισχύος, διαδικασία, μηχανισμού εξακρίβωσης της προέλευσης κ).

- b. Ο βραδύς ρυθμός υλοποίησης φ/β έργων μεγάλης κλίμακας την περίοδο εκείνη λόγω της απροθυμίας των Τραπεζών να χορηγήσουν δάνεια συνέβαλαν στην αύξηση των προβλημάτων που αντιμετώπιζαν οι Ελληνικές βιομηχανίες φ/β [11]. Επιπρόσθετα οι δύο διαγωνισμοί της ΔΕΗ για δύο μεγάλους φ/β σταθμούς ισχύος 50 MW στη Μεγαλόπολη και 200 MW στη Κοζάνη δεν είχαν καμία πρόβλεψη για την Ελληνική φ/β βιομηχανία, αντίθετα με τους όρους που έθεταν την απέκλειαν. Αναφέρουμε ότι στις διακηρύξεις προβλεπόταν όλα τα φ/β πλαίσια να είναι ενός τύπου (χωρίς να είναι απαραίτητο από τεχνικής πλευράς) και οι χρόνοι παραδόσεως ήταν ασφικτικοί. Η εταιρεία HelioSphere είχε αποκλειστεί εξ αρχής, διότι η ΔΕΗ ζητούσε πολυκρυσταλλικά φ/β και όχι λεπτού μενιού. Στην Silcio, η παραγωγική δυνατότητα σε πλαίσια δεν ξεπερνούσε τα 25 MW τον χρόνο. Η Solar Cells Hellas είχε λίγο υψηλότερη δυναμικότητα. Καμία από τις δύο δεν μπορούσε μόνη της να ανταποκριθεί στις χρονικές προδιαγραφές του διαγωνισμού. Οπότε στους δύο διαγωνισμούς, μόνον η τεράστια Κινεζική βιομηχανία μπορούσε να ανταποκριθεί [12].
- c. Το φορολογικό και νομοθετικό πλαίσιο και η λειτουργία του ήταν εχθρική στη λειτουργία της Ελληνικής βιομηχανίας φ/β. Αναφέρεται σαν παράδειγμα η Exel Solar στο Κιλκίς ήθελε να αγοράσει cells από την Silcio ή την Solar Cells Hellas, λόγω ποιότητας και κόστους. Η απαλλαγή όμως του ΦΠΑ για τους επενδυτές σε συνδυασμό με τις τρομερές καθυστερήσεις επιστροφής ΦΠΑ προς την βιομηχανία σήμαινε ότι, αν αγόραζε Ελληνικά cells, θα έπρεπε να χρηματοδοτεί η Exel Solar το 23% (τότε το ΦΠΑ). Οπότε αναγκάζονταν να εισάγει φ/β cells και

όχι να τα αγοράζει από τις Ελληνικές βιομηχανίες. Επίσης, οι πολλές αλλαγές του νομοθετικού και ρυθμιστικού πλαισίου αποτέλεσαν τροχοπέδη στην διατήρηση της βιωσιμότητας των Ελληνικών μονάδων παραγωγής φ/β. Μερικές από αυτές για τη περίοδο Ιανουαρίου 2012 – Μαΐου 2013 είναι η αναστολή διαδικασίας αδειοδότησης και χορήγησης προσφορών όρων σύνδεσης για φ/β σταθμούς – αναπροσαρμογή εγγυημένων τιμών πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας από φ/β (8/2012-ΥΑ 16932/ΦΕΚ Β 2317-10.08.2012) μέχρι τον Απρίλιο του 2014 (Ν. 4254/2014-ΦΕΚ 85<sup>Α</sup>), η επιβολή έκτακτης ειδικής εισφοράς αλληλεγγύης σε όλους τους σταθμούς ΑΠΕ και η κατάργηση της πρόβλεψης για διατήρηση της τιμής αποζημίωσης για 18-36 μήνες τον Νοέμβριο του 2012 (Ν.4093/2012-ΦΕΚ Α 222/12.11.2012), αναδρομική μείωση εγγυημένων τιμών (19-25%) και αναπροσαρμογή τους για μελλοντικές εγκαταστάσεις ("New deal" – ΥΑ. 1288/9011/ΦΕΚ Β 1103/02.05.2013). Αποτέλεσμα όλων αυτών ήταν να χαθεί η εμπιστοσύνη των επενδυτών στα συμβόλαια πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας, να επηρεαστούν αρνητικά οι οικονομικές αποδόσεις υφιστάμενων επενδύσεων και εντέλει να σταματήσει η ανάπτυξη της αγοράς των φ/β στην Ελλάδα, οδηγώντας στο κλείσιμο και των Ελληνικών μονάδων παραγωγής φ/β.

## 5. ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΔΥΟ Φ/Β ΣΤΑΘΜΩΝ ΜΕ ΕΛΛΗΝΙΚΑ Φ/Β ΓΙΑ ΠΕΡΙΟΔΟ ΕΞΑΕΤΙΑΣ

### 5.1. Τεχνική περιγραφή των φ/β σταθμών

Η εταιρεία EG-Energy υλοποίησε το 2011 δύο φωτοβολταϊκούς (φ/β) σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στο έδαφος, συνολικής ισχύος 39,6 kWp (19,8kWp έκαστος – «δίδυμοι» σταθμοί) σε δύο οικισμούς στη Ροδόπη (Διώνη και Ίμερος). Το εμβαδόν των γηπέδων εγκατάστασης των δύο σταθμών είναι 1,9 στρέμματα (Διώνη) και 1,5 στρέμματα (Ίμερος) με ποσοστά κάλυψης από τα φ/β, 8,4% και 10,6% αντίστοιχα.

Ο κάθε σταθμός αποτελείται από τα φ/β πλαίσια, τις βάσεις στήριξης των φωτοβολταϊκών πλαισίων, τους μετατροπείς DC/AC δικτύου, την ηλεκτρολογική εγκατάσταση για την σύνδεση του σταθμού με το δίκτυο και την περιφράξη του γηπέδου εγκατάστασης. Ειδικότερα σε κάθε φ/β σταθμό έχουν χρησιμοποιηθεί ενενήντα (90) φ/β πλαίσια τεχνολογίας πολυκρυσταλλικού πυριτίου Silcio SE 220, ονομαστικής ισχύος 220W (ελληνικής κατασκευής) τα οποία έχουν συνολική εγκατεστημένη ισχύ 19,8 kWp.

Τα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου φ/β πλαισίου παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα [13]:

Πίνακας 1 : Τεχνικά χαρακτηριστικά της φ/β γεννήτριας των σταθμών.

τος πλαίσιο	SE 220	Θερμοκρασιακοί συντελεστές	
μαστική ισχύς (W)	220	Tk (Voc) – τάση ανοικτούκυκλώματος	-0,35%/K
χική ισχύς	0 ως +5%	Tk (Isc) – ρεύμα βραχυκύκλωσης	0,04%/K
μαστική τάση Umpp (V)	28,8	Tk (Pmp) – ισχύς	-0,40%/K
μαστική ένταση Impp (A)	7,65	Απόδοση σε NOCT	
η ανοικτού κυκλώματος Voc (V)	36,4	Ισχύς Pmp (W)	165,3
μα βραχυκύκλωσης Isc (A)	8,30	Τάση Vmp (V)	20,41
μός απόδοσης (%)	13,4%	Ρεύμα Impp (A)	6,08
νωτέρω τιμές δίδονται σε πρότυπες συνθήκες ελέγχου (STC - ηλιακή ινοβολία 1.000 W/m <sup>2</sup> , AM 1,5 και θερμοκρασία cells του πλαισίου 25°C).		Τάση ανοικτού κυκλώματος Voc (V)	26,38
		Ρεύμα βραχυκύκλωσης Isc (A)	6,48
		Θερμοκρασία NOCT (°C)	39,95
		Οι ανωτέρω τιμές δίδονται σε πρότυπες συνθήκες ελέγχου (SOC - ηλιακή ακτινοβολία 800 W/m <sup>2</sup> , AM 1,5, ταχύτητα ανέμου 1m/s, θερμοκρασία περιβάλλοντος 20°C, κλίση πλαισίου 45°).	

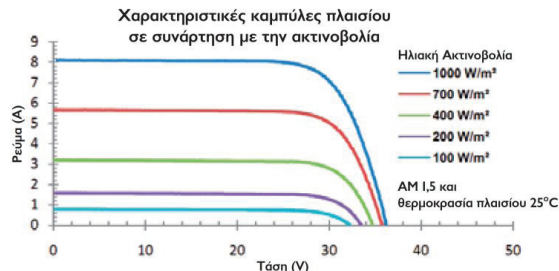
Τα βασικά πλεονεκτήματα του φ/β πλαισίου Silcio είναι : i) Υψηλή ποιότητα λόγω της αυτοματοποιημένης παραγωγής και των αυστηρών ποιοτικών ελέγχων, ii) Εθική ταξινόμηση ισχύος (-0W/+4,99W), iii) χαμηλό θερμοκρασιακό συντελεστής ισχύος και εξαιρετική συμπεριφορά σε χαμηλό φωτισμό, iv) πιστοποιημένο για συνολικό φορτίο ανέμου και χιονιού έως 5400 Pa, v) αεριζόμενο κουτί διασύνδεσης υψηλού βαθμού προστασίας (IP67) με εξαιρετική απαγωγή θερμότητας, ενσωματωμένες διόδους διαφυγής με σύστημα παθητικής ψύξης και ευκολία στη σύνδεση, vi) φ/β cells υψηλής απόδοσης με βελτιστοποιημένο σχεδιασμό και αυστηρή ταξινόμηση για ομοιομορφία και μεγιστοποίηση της παραγόμενης ενέργειας, vii) μεγάλη διάρκεια ζωής χάρη στην υψηλή ποιότητα υλικών και κατασκευής, viii) πιστοποίηση από το TÜV Intercert για αντοχή σε αλατονέφωση, σύμφωνα με το πρότυπο IEC61701:1995, ix) ειδικά επεξεργασμένο γυαλί για αυξημένη αντοχή στο χαλάζι και τις καταπονήσεις, καθώς και υψηλό συντελεστή απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας

Η Silcio έχει πιστοποιηθεί σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα ISO 9001:2008, EN ISO 14001:2004 και OHSAS 18001:2007, ενώ τα φ/β πλαίσια είναι πιστοποιημένα από το TÜV INTERCERT σύμφωνα με τα πρότυπα IEC 61215 & EN 61730-1/2. Η απόδοση των ΦΒ πλαισίων είναι εγγυημένη στο 90% της αρχικής απόδοσης στα 10 έτη από την παράδοση στον πελάτη και στο 80% της αρχικής στα 25 έτη. Αρχικά δίδονταν δεκαετής εγγύηση κατασκευαστή για αστοχία υλικών και κατασκευής ενώ μετέπειτα (7/2012) αυξήθηκε σε δωδεκαετία. Οι προδιαγραφές του φ/β πλαισίου δίνονται στον πίνακα 2.

Πίνακας 2 : Προδιαγραφές φ/β πλαισίου SE 220 [13].

Μήκος:	1.654 mm
Πλάτος:	993 mm
Πάχος:	40 mm
Βάρος:	περίπου 20kg
Κυτίο συνδέσεως:	Αεριζόμενο με 3 ενσωματωμένες διόδους παρακάμψεως βαθμού προστασίας IP67
Καλώδιο:	Φωτοβολταϊκό Καλώδιο 950 mm, 4 mm <sup>2</sup> , με ακροδέκτες τύπου Radox (CB-/C4, CL+/C4).
Εμπρός επιφάνεια:	Υψηλής αντοχής ΦΒ γυαλί πάχους 3,2 mm
Πίσω επιφάνεια:	Σύνθετο Φιλμ
ΦΒ κύτταρα:	60 Πολικρυσταλλικά κύτταρα Si 156 x 156 mm
Πλαστικοποίηση:	EVA
Πλαίσιο:	Προφίλ Ανοδιωμένου Αλουμινίου
Μεγ. τάση συστήματος:	1.000 V
Μεγ. ανάστροφο ρεύμα (Irev):	15A
Απόδοση σε χαμηλό φωτισμό:	Μεταβολή βαθμού απόδοσης πλαισίου για μείωση έντασης ακτινοβολίας από 1000W/m <sup>2</sup> σε 200W/m <sup>2</sup> και θερμοκρασία πλαισίου 25°C, σύμφωνα με το EN 60904-1: 0,51% (απόλυτη) / 3,6% (σχετική)

Οι χαρακτηριστικές καμπύλες του φ/β πλαισίου σε συνάρτηση με την ακτινοβολία δίνονται στην εικόνα 11 [13].



Εικόνα 11: Χαρακτηριστικές καμπύλες του φ/β πλαισίου σε συνάρτηση με την ακτινοβολία.

Τα φ/β πλαίσια έχουν τοποθετηθεί σε βάσεις στήριξης σταθερής κλίσης τριάντα μοιρών (30°) με νότιο προσανατολισμό και συνολικό ύψος 2,05 m για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης του σταθμού. Το συνολικό εμβαδόν επιφάνειας φ/β είναι ίσο με 150,3 m<sup>2</sup>. Σε κάθε στοιχειοσειρά εγκαταστάθηκαν φ/β γεννήτριες ίδιας κατηγορίας ρεύματος (current class) ώστε να περιορίζονται οι απώλειες λόγω ηλεκτρικής ανομοιομορφίας (mismatch). Η κατάταξη (sorting) πραγματοποιήθηκε σε τρεις κατηγορίες ρεύματος σύμφωνα με το αρχείο μετρήσεων των φ/β γεννητριών από τον κατασκευαστή (flash report).

Η απόσταση μεταξύ των βάσεων είναι μεγαλύτερη από 4 m ώστε να μην παρατηρούνται προβλήματα σκίασης μεταξύ των βάσεων. Οι βάσεις που χρησιμοποιηθούν είναι της Ελληνικής εταιρείας Alumil Solar και είναι αρθρωτές. Η εγκατάσταση των Φ/Β πλαισίων έχει πραγματοποιηθεί σε σταθερά μεταλλικά ικρίωματα υπό κλίση, κατάλληλα πακτωμένα στο έδαφος. Η πάκτωση των βάσεων έχει γίνει χωρίς τη χρήση σκυροδέματος (με πασαλόμπηξη).

Έχουν εγκατασταθεί 3 μονοφασικοί μετατροπείς (αντιστροφείς δικτύου – grid inverters). Οι μετατροπείς αυτοί είναι τύπου Sunny Mini Central SMC 7000TL (με μέγιστη εξερχόμενη ισχύ 7 kWε έκαστος), κατασκευής SMA Γερμανίας. Οι αντιστροφείς αυτοί είναι εξωτερικού τύπου και ο καθένας τους συνδέεται στην είσοδο υποπίνακα συνεχούς ρεύματος. Η ηλεκτρολογική εγκατάσταση αποτελείται από πίνακες στους οποίους οδηγούμε την έξοδο DC (συνεχούς τάσης) των πλαισίων και από εκεί στους αντιστροφείς, παρεμβάλλοντας ασφάλειες για την προστασία από υπερεντάσεις και βραχυκυκλώματα. Χρησιμοποιήθηκε ένας πίνακας για την AC καλωδίωση εξωτερικού τύπου στον οποίο οδηγούμε τις εξόδους των αντιστροφέων και παίρνουμε σαν έξοδο τις τρεις φάσεις τις οποίες με την σειρά τους τις οδηγούμε στον μετρητή της ΔΕΔΔΗΕ ο οποίος είναι συνδεδεμένος στην χαμηλή τάση. Ο πίνακας AC εμπεριέχει προστατευτικές διατάξεις από υπερεντάσεις, αντικεραυνικές προστασίες έναντι των κρουστικών τάσεων καθώς και ηλεκτρονόμους αντί-ηλεκτροπληξίας. Ο αντικεραυνικός και αντί-υπερτασικός εξοπλισμός που έχει εγκατασταθεί είναι της Ελληνικής εταιρείας Raycar. Η καλωδίωση της ηλεκτρικής εγκατάστασης έχει πραγματοποιηθεί υπόγεια ενώ ο

ενταφιασμός των αγωγών έχει γίνει σε βάθος 0,80m και πλάτος 0,40m. Για την γείωση της εγκατάστασης πραγματοποιήθηκε τρίγωνο γείωσης με την χρήση ηλεκτρόδιων γείωσης χαλκού, οι πλευρές του οποίου έχουν μήκος 4m ενώ τα ηλεκτρόδια γείωσης τοποθετούνται σε βάθος 3m. Ο αγωγός γείωσης διατομής 16 mm<sup>2</sup> διασχίζει περιμετρικά την εγκατάσταση συνδέοντας όλες τις μεταλλικές βάσεις. Εξαιτίας του τρόπου εγκατάστασης των βάσεων (πακτωμένες στο έδαφος σε βάθος 1,30 m χωρίς την χρήση σκυροδέματος) αυξάνεται η ασφάλεια της εγκατάστασης από πλευράς προστασίας ενάντια στους κεραυνούς.

Η περιφράξη της εγκατάστασης είναι με πλέγμα εν θερμό γαλβανισμένο ύψους 2,2m και αποτελείται από συρματόπλεγμα ύψους 2,0 m στηριζόμενο σε γαλβανιζέ πασσάλους ίδιου ύψους ανά 3,5 m πακτωμένους σε συνεχές συμπαγές τοίχιο ελαφρώς σπλισμένου σκυροδέματος, ύψους 0,30 m από το έδαφος, πάχους 0,2 m, με θεμέλιο διατομής 50/20 cm. Για την είσοδο στην εγκατάσταση έχει κατασκευαστεί μεταλλική δίφυλλη πόρτα με συρματόπλεγμα, ολικού ανοίγματος 4,0 m και ύψους 2,2 m, στηριζόμενη σε γαλβανιζέ πασσάλους.

Ο κάθε σταθμός διαθέτει μετεωρολογικό σταθμό Sunny Sensorbox και μετρητικά όργανα μέτρησης θερμοκρασίας περιβάλλοντος, πλάτης φ/β, ηλιακής ακτινοβολίας και ταχύτητας ανέμου. Στον χώρο είναι εγκατεστημένο κλειστό κύκλωμα καμερών (CCTV) και υπάρχει τηλεμετάδοση εικόνας και ήχου. Η παρακολούθηση της παραγωγής και της λειτουργίας των μετατροπέων δικτύου και του μετεωρολογικού σταθμού, πραγματοποιείται μέσω του συστήματος τηλεπαρακολούθησης και καταγραφής Sunny WebBox, για έλεγχο του συστήματος και παρακολούθηση των δεδομένων μέσω Internet, σε τοπικό Η/Υ και σε απομακρυσμένο κεντρικό σημείο μέσω Internet (Sunny Portal website), το οποίο καταγράφει σε πραγματικό χρόνο την ισχύ και τις επιμέρους παραμέτρους της εγκατάστασης και υπολογίζει το βαθμό απόδοσής της. Η διάγνωση και επικοινωνία πραγματοποιείται ασύρματα μέσω GSM modem. Τα δεδομένα λειτουργίας και από τον μετεωρολογικό σταθμό συλλέγονται ανά 15min και αποθηκεύονται σε κάρτα μνήμης (SD card) ενώ είναι διαθέσιμα και μέσω της ιστοσελίδας Sunny Portal.



Εικόνες 14,15 : Ο φ/β σταθμός της Διώνης (αριστερά) και του Ιμέρου (δεξιά) στη Π.Ε. Ροδότης.

Οι σταθμοί τέθηκαν σε λειτουργία στις 8/2/2011 και λειτουργούν ως σήμερα χωρίς κάποιο ιδιαίτερο τεχνικό πρόβλημα.

## 5.2. Εμπειρίες από την εξαετή λειτουργία

Για την αποδοτική λειτουργία τους και τη μεγιστοποίηση της ενεργειακής τους παραγωγής απασχολούνται μερικούς δύο άτομα το έτος με περίπου 40-60 ανθρωποώρες εργασίας. Οι εργασίες που πραγματοποιούνται είναι η κοπή χόρτων, το πλύσιμο των φ/β γεννητριών, η σύσφιξη των βάσεων αλλά και των συνδέσεων στους ηλεκτρικούς πίνακες, ο οπτικός αλλά και μέσω φορητού Η/Υ έλεγχος της λειτουργίας όλης της εγκατάστασης καθώς και η επανεκκίνηση του τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού εξαιτίας προβλημάτων του δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Ανά έτος πραγματοποιείται αξιολόγηση λειτουργίας των σταθμών και εντοπισμός τμημάτων του εξοπλισμού που χρήζουν συντήρησης ή αντικατάστασης, ενώ πραγματοποιείται και ενημέρωση του λογισμικού των μετατροπέων για την βέλτιστη λειτουργία τους. Τα σφάλματα των σταθμών περιορίζονται σε παύσεις λειτουργίας μετρητικών οργάνων του μετεωρολογικού σταθμού και μια φορά στην αρχή λειτουργίας του ενός έργου σταμάτησε τη λειτουργία του ένας μετατροπέας δικτύου, ο οποίος αντικαταστάθηκε με νέο σε λίγες ημέρες. Δύο φ/β πλαίσια στάλθηκαν τον Μάιο του 2013 για ανακύκλωση μέσω του Πανερωπαϊκού φορέα PV Cycle, εξαιτίας θραύσης του γυαλιού τους (χτύπημα από πέτρες που εκσφενδονίστηκαν κατά τη κοπή των χόρτων). Η αποστολή τους έγινε στην εταιρεία Engaia A.E στη Θεσσαλονίκη που είναι μέλος του φορέα PV Cycle, χωρίς κάποια χρέωση για την ανακύκλωση τους.

Τα δύο φ/β πλαίσια αλλάχθηκαν με νέα από την εταιρεία Silcio τον Ιούνιο του 2012. Επίσης έχουν αντικατασταθεί κάποιες κάμερες που παρουσίασαν δυσλειτουργία.

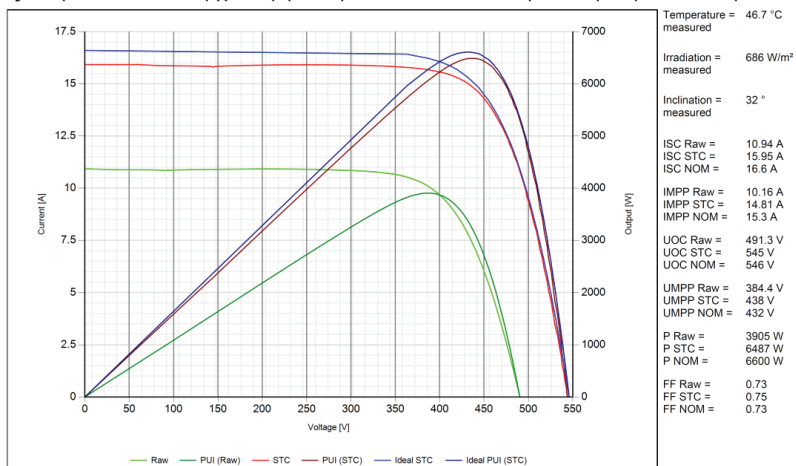
Για τα φ/β πλαίσια δεν είχαμε κάποιο πρόβλημα λειτουργίας, υπο-απόδοσης ή εμφάνισης του φαινομένου PID.

### 5.3. Αποτελέσματα μέτρησης απόδοσης (I-V καμπύλες) – θερμογράφησης

Τον Αύγουστο του 2015 πραγματοποιήθηκαν στο έργο από εξωτερική ανεξάρτητη εταιρεία συντήρησης φ/β σταθμών, οι παρακάτω εργασίες: α. Μέτρηση της απόδοσης των φ/β πλαισίων (I-V), β. Μέτρηση της αντίστασης μόνωσης (Riso) των καλωδίων DC και γείωσης και γ. Θερμογράφηση φ/β πλαισίων και ηλεκτρικών πινάκων.

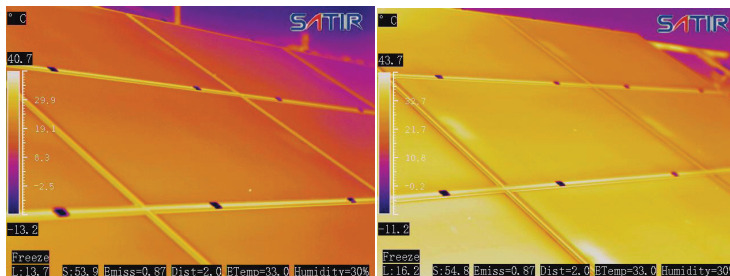
Για τη μέτρηση των φ/β πλαισίων χρησιμοποιήθηκε το διακριβωμένο όργανο TRI-KA/TRI-SEN, για τη μέτρηση της αντίστασης μόνωσης των καλωδίων DC και αντίστασης γείωσης, Metrel Eurotest 61557. Η θερμογράφηση πραγματοποιήθηκε με τη χρήση της θερμοκάμερας FLIR.

Από τις καμπύλες μέτρησης I-V και την θερμογράφηση, η απόδοση των φ/β γεννητριών είναι ικανοποιητική χωρίς σημαντικές αποκλίσεις από τις ονομαστικές τιμές που ορίζει ο κατασκευαστής. Δεν παρουσιάστηκε κάποιο πρόβλημα στις μετρήσεις αντίστασης μόνωσης των καλωδίων, ούτε και στις καμπύλες I-V των στοιχειοσειρών. Από τη θερμογράφηση των ηλεκτρολογικών πινάκων δεν παρουσιάστηκε κάποιο πρόβλημα στο εσωτερικό τους και στα επιμέρους ασφαλιστικά μέσα. Η απόκλιση των φ/β πλαισίων στο έργο του Ιμέρου, ανά επίπεδο μετατροπέα ήταν -3,4 % (-5,8%, -2,0%, -2,4%), ενώ στο έργο της Διώνης ήταν ίσο με -0,2% (-1,7%, +0,8%, +0,7%). Μετά από 4,5 έτη λειτουργίας αναμενόταν να υπάρχει σύμφωνα με τον κατασκευαστή πτώση στην απόδοση 4,5%.



Εικόνα 16 : Τα αποτελέσματα της μέτρησης καμπύλης I-V για τα 30 φ/β πλαίσια για τον μετατροπέα 1 του φ/β σταθμού της Διώνης.

Στις εικόνες 17,18 δίνονται οι θερμογραφικές απεικονίσεις για τμήματα των φ/β πλαισίων.



Εικόνες 17,18 : Θερμογραφικές απεικονίσεις φ/β πλαισίων από τους δύο σταθμούς.

#### 5.4. Ενεργειακή αποδοτικότητα

Η μέση ετήσια ενεργειακή αποδοτικότητα των φ/β σταθμών για την υπό μελέτη εξαετία (1/3/2011-28/2/2017) είναι ίση 1579 kWh/kWp (Διώνη) και 1597 kWh/kWp (Ίμερος – νοτιότερη θέση σε σχέση με τη Διώνη). Στους πίνακες 3 και 4 παρουσιάζεται η συνολική ενεργειακή παραγωγή για την προαναφερθείσα περίοδο.

Πίνακες 3, 4 : Ενεργειακή παραγωγή φ/β σταθμών Ίμερος και Διώνη για την υπό μελέτη εξαετία.

Φ/Β Σταθμός Ίμερος - Συνολική ενεργειακή παραγωγή [kWh]													Φ/Β Σταθμός Διώνη - Συνολική ενεργειακή παραγωγή [kWh]																
Μήνας/έτος	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Σύνολο	Μήνας/έτος	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Σύνολο		
2011				2508	2872	2807	3254	3738	3687	3237	2393	2187	1357	28039	2011				2534	2810	3184	3212	3638	3643	3234	2327	2092	1316	27992
2012	1831	1627	2914	3146	3314	3692	3756	3603	3305	2417	1950	1258	32814	2012	1794	1642	2869	3104	3223	3709	3759	3523	3310	2464	1882	1277	32555		
2013	1423	1621	2352	2941	3734	3293	3668	3735	3295	2810	1716	1648	32237	2013	1385	1520	2406	2846	3745	3272	3574	3738	3276	2836	1653	1633	31885		
2014	1244	1749	2609	2777	3426	3207	3588	3507	2722	2159	1388	1096	29471	2014	1289	1481	2553	2719	3403	3103	3447	3545	2683	2081	1333	1068	28705		
2015	1711	1929	2104	3093	3398	3035	3690	3573	2940	2337	2173	2158	32142	2015	1669	1962	1995	2957	3423	2940	3624	3563	2934	2192	2193	2174	31626		
2016	1647	1755	2552	3258	3260	3317	3706	3429	2966	2367	1762	1828	31848	2016	1581	1839	2502	3278	3173	3315	3644	3508	2866	2357	1612	1950	31627		
2017	1274	1838											3111	2017	1380	1861											3242		
Σύνολο	9129	10519	15040	18086	19940	19797	22146	21535	18464	14484	11176	9346	189662	Σύνολο	9097	10305	14860	17715	20151	19552	21687	21520	18304	14257	10765	9418	187631		
Ενεργειακή απόδοση θετικής (kWh/kWp)	77	89	127	152	168	167	186	181	155	122	94	79	1597	Ενεργειακή απόδοση θετικής (kWh/kWp)	77	87	125	149	170	165	183	181	154	120	91	79	1579		
Ποσοστό επί της ετήσιας παραγωγής	4.8%	5.5%	7.9%	9.5%	10.5%	10.4%	11.7%	11.4%	9.7%	7.6%	5.9%	4.9%	100.0%	Ποσοστό επί της ετήσιας παραγωγής	4.8%	5.5%	7.9%	9.4%	10.7%	10.4%	11.6%	11.5%	9.8%	7.6%	5.7%	5.0%	100.0%		

Στον πίνακα 5 παρουσιάζεται η σύγκριση της μέσης ενεργειακής απόδοσης φ/β σταθμών στην ηπειρωτική Ελλάδα [2] με τους δύο υπό μελέτη σταθμούς για την Ζετία 2014-2016. Το αποτέλεσμα είναι ότι αν και οι δύο σταθμοί βρίσκονται σε θέσεις από τις πιο βόρειες της χώρας η απόδοσή τους είναι 2,8% - 4,5% πιο υψηλή από το μέσο όρο των φ/β έργων στην ηπειρωτική Ελλάδα.

Πίνακας 5 : Σύγκριση της μέσης ενεργειακής απόδοσης των δύο φ/β σταθμών σε σχέση με το μέσο όρο των φ/β σταθμών της ηπειρωτικής Ελλάδας.

Σύγκριση μέσης ενεργειακής απόδοσης (kWh/kWp)					
Έτος	Ηπειρωτική χώρα (Σύστημα)	Διώνη	Ίμερος	Απόκλιση Διώνη	Απόκλιση Ίμερος
2014	1485	1450	1488	-2.4%	0.2%
2015	1515	1597	1623	5.4%	7.2%
2016	1517	1597	1608	5.3%	6.0%
M.O.	1506	1548	1573	2.8%	4.5%

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Παρουσιάστηκε η πορεία της Ελληνικής βιομηχανίας παραγωγής φ/β ως σήμερα και δόθηκαν αναλυτικά στοιχεία για αυτόν τον τομέα ενώ επίσης πραγματοποιήθηκε διερεύνηση των αιτιών που οδήγησαν στη παύση λειτουργίας των παραγωγικών μονάδων. Η πορεία αυτού του κλάδου που αποτέλεσε μοχλό ανάπτυξης των τοπικών οικονομιών, εξαγωγικό τομέα της οικονομίας αλλά και απασχόλησε περί τους 800 εργαζομένους (άμεσες θέσεις εργασίας) φανερώνει την έλλειψη ορθολογικής ενεργειακής πολιτικής, της ανεπάρκειας γνώσεων του τομέα και διορατικότητας των πολιτικών ηγεσιών στην Ελλάδα αλλά και στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Η Πολιτεία δεν πήρε κανένα μέτρο ενίσχυσης ή προστασίας της Ελληνικής Βιομηχανίας φ/β αλλά και των θέσεων εργασίας που δημιουργήθηκαν. Οι μονάδες παραγωγής φ/β παραμένουν εδώ και τέσσερα χρόνια κλειστές χωρίς κανένα ορατό σημάδι ότι θα μπορέσουν να επαναλειτουργήσουν. Δε θα πρέπει να λησμονηθεί ότι αρκετές βιομηχανίες φ/β έλαβαν επιδότηση από τον Αναπτυξιακό Νόμο.

Το κλείσιμο αυτών των εργοστασίων πέρα από τα προαναφερθέντα προβλήματα που δημιούργησε στην οικονομία και την απασχόληση, έχει δημιουργήσει σοβαρό πρόβλημα στους παραγωγούς ηλεκτρικής ενέργειας από φ/β, οι οποίοι διαθέτουν ελληνικά φ/β και πλέον δεν έχουν τη παροχή εγγυήσεων και υποστήριξης. Η μοναδική λύση σε αυτές τις περιπτώσεις είναι η αντικατάσταση των φ/β πλαισίων (αν υπάρξει ανάγκη) με ίδια ισχύος και παρόμοιων ηλεκτρικών χαρακτηριστικών.

Επίσης παρατέθηκαν οι εμπειρίες από την εξαετή λειτουργία (3/2011-2/2017) δύο φ/β σταθμών (στο έδαφος – σταθερές βάσεις) ονομαστικής ισχύος 19,8 kWp στη Ροδόπη οι οποίοι διαθέτουν ελληνικής

παραγωγής πολυκρυσταλλικά φ/β Silcio (κατασκευασμένα στη Πάτρα) ισχύος 220 Wp. Η αποτίμηση της λειτουργίας τους δόθηκε μέσα από τα σφάλματα που προέκυψαν, την ενεργειακή τους παραγωγή, τα αποτελέσματα της μέτρησης της απόδοσης των πλαισίων (I-V) των φ/β σταθμών αλλά και της θερμογράφησής τους που πραγματοποιήθηκε από ανεξάρτητη εταιρεία.

Η μέση ετήσια ενεργειακή αποδοτικότητα των φ/β σταθμών για την υπό μελέτη εξαιτία είναι πολύ υψηλή και ξεπερνά και το μέσο όρο απόδοσης των φ/β σταθμών στην ηπειρωτική Ελλάδα (τελευταία τριετία ως περίοδος σύγκρισης). Από τις καμπύλες μέτρησης I-V και τη θερμογράφιση, η απόδοση των φ/β πλαισίων είναι ικανοποιητική χωρίς σημαντικές αποκλίσεις από τις ονομαστικές τιμές που ορίζει ο κατασκευαστής (μικρότερη από την αναμενόμενη). Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν αποδεικνύουν ότι τα ελληνικά φ/β είναι υψηλής απόδοσης και αξιοπιστίας και μετά από έξι χρόνια λειτουργίας τους, λειτουργούν χωρίς κανένα είδους πρόβλημα και με υψηλή απόδοση.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Σύνδεσμος Εταιρειών φ/β - ΣΕΦ, «Στατιστικά στοιχεία αγοράς φωτοβολταϊκών για το 2013», Ιούνιος 2014. Διαθέσιμο : [http://helarco.gr/wp-content/uploads/pv-stats\\_greece\\_2013\\_June14.pdf](http://helarco.gr/wp-content/uploads/pv-stats_greece_2013_June14.pdf), (πρόσβαση 30.10.2017)
- [2] Σύνδεσμος Εταιρειών φ/β - ΣΕΦ, «Στατιστικά στοιχεία αγοράς φωτοβολταϊκών για το 2016», Απρίλιος 2017. Διαθέσιμο : [http://helarco.gr/wp-content/uploads/pv-stats\\_greece\\_2016\\_25Apr2017-2.pdf](http://helarco.gr/wp-content/uploads/pv-stats_greece_2016_25Apr2017-2.pdf), (πρόσβαση 03.11.2017)
- [3] Ψωμάς Σ.,2016 «Η εγχώρια προστιθέμενη αξία των φωτοβολταϊκών» σελ. 2-4 Διαθέσιμο: <http://helarco.gr/wp-content/uploads> (πρόσβαση 01.11.2017)
- [4] Τσελέπης Σ.,2010 «Η συμμετοχή Φ/Β συστημάτων στην επίτευξη του εθνικού στόχου ηλεκτροπαραγωγής το 2020», ΚΑΠΕ, 4<sup>ο</sup> Εθνικό Συνέδριο, 10-12 Μαΐου 2010, Αθήνα
- [5] Κώτσης Β , 14.08.2010 «Αποκαθήλωση για την ιστορική Θεμελιοδομή», εφημερίδα «Το Βήμα». Διαθέσιμο: <http://www.tovima.gr/finance/finance-business/article/?aid=348631>, (πρόσβαση 04.11.2017)
- [6] Ανώνυμο , 02.04.2002 «Φωτοβολταϊκά στον Αθήνα 2004 από την Ηλιοδομή», εφημερίδα «Η Καθημερινή». Διαθέσιμο: <http://www.kathimerini.gr/114914/article/oikonomia/epixeirhseis/fwtovoltaika-ston-a8hna-2004-aro-thn-hliodomh>, (πρόσβαση 04.11.2017)
- [7] Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE, 12.07.2017 "Photovoltaic Report", pp.12-13. Διαθέσιμο: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf> (πρόσβαση 04.11.2017)
- [8] Alan C. Goodrich, Douglas M. Powell, Ted L. James, Michael Woodhouse and Tonio Buonassis, Assessing the drivers of regional trends in solar photovoltaic manufacturing, Energy Environ. Sci., 2013, 6, 2811-2821
- [9] IHS TECHNOLOGY, The Price of Solar – Benchmarking PV Module Manufacturing Cost. An IHS report on behalf of the Solar Alliance for Europe, April 2016.
- [10] Ιστοσελίδα energypress.gr, 28/2/2012 – «Κίνητρα για τον εγχώριο εξοπλισμό ζητούν οι βιομηχανίες φωτοβολταϊκών» Διαθέσιμο: <https://energypress.gr/news/kinitra-gia-ton-eghorio-exoplismo-zitoyg-oi-viomihanies-fotovoltaikon>, (πρόσβαση 04.11.2017)
- [11] Ιστοσελίδα energypress.gr, 20/6/2011 – «Κινδυνεύουν αν δεν στηριχθούν τα ελληνικά εργοστάσια φ/β» Διαθέσιμο: <https://energypress.gr/news/kindyneyoyg-den-stirithoyg-ta-ellinika-ergostasia-fotovoltaikon> (πρόσβαση 04.11.2017)
- [12] Παπαχρήστου Α, & Ζαχαρίου Α, «Φωτοβολταϊκά: Μια Ιστορία Χαμένων Ευκαιριών», ιστοσελίδα B2green.gr, 23/12/2015 Διαθέσιμο: <https://www.b2green.gr/el/post/30848/fotovoltaika-mia-istoria-chamenon-efkairion> (πρόσβαση 23.12.2015)
- [13] Τεχνικό Φυλλάδιο φ/β Silcio. Έκδοση Απρίλιος 2010. Αρχείο των έργων.

## ΕΤΗΣΙΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΙ ΕΞΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΝΑΝΟΡΕΥΣΤΟΥ

Ευάγγελος Μπέλλος<sup>1\*</sup>, Χρήστος Τζιβανίδης<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Τομέας Θερμότητας, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ζωγράφου - Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 15780, Αθήνα  
e-mail: bellose@central.ntua.gr

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι θερμοφωτοβολταϊκοί συλλέκτες είναι συσκευές οι οποίες αξιοποιούν την ηλιακή ενέργεια για παράγωγη ωφέλιμης θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας αλλά και ηλεκτρικού ρεύματος. Η θερμική απόδοση αυτών των συλλεκτών είναι εν γένει χαμηλή και γι αυτό πολλές τεχνικές έχουν μελετηθεί για την αύξηση της. Η χρήση νανούλικών εντός του εργαζόμενου μέσου είναι μια πολλά υποσχόμενη μέθοδος η οποία μπορεί να βελτιώσει αρκετά τη θερμική απόδοση των συλλεκτών αυτών και να τους κάνει πιο ανταγωνιστικούς. Στόχος αυτής της εργασίας είναι η ετήσια αξιολόγηση ενός θερμοφωτοβολταϊκού συλλέκτη ο οποίος εργάζεται με νανορευστό σαν εργαζόμενο μέσο. Το μείγμα νερού-χαλκού (νερό/Cu) είναι το επιλεγμένο εργαζόμενο μέσο το οποίο εξετάζεται για ογκομετρική σύσταση σε χαλκό ίση με 2%. Ο συλλέκτης έχει επιφάνεια 2 m<sup>2</sup> και είναι συνδεδεμένος με ένα μονωμένο δοχείο. Ο όγκος του δοχείου μελετήθηκε παραμετρικά από 50 L έως 300 L και τελικά τα 150 L αποδείχτηκαν η καταλληλότερη επιλογή με εξεργειακά κριτήρια. Το σύστημα αυτό εξετάζεται για 12 ημέρες, μία για κάθε μήνα του έτους. Κατά την ημερήσια λειτουργία, το πρότυπο ISO 9459-2 ακολουθείται σύμφωνα με το οποίο το δοχείο φορτίζεται έως τη δύση του ηλίου και μετά η αποθηκευμένη ενέργεια αξιολογείται.

Ο εξεταζόμενος συλλέκτης μελετάται με ένα θερμικό μοντέλο το οποίο αναπτύχθηκε στο λογισμικό EES (Engineering Equation Solver). Το μοντέλο αυτό επαληθεύτηκε με βιβλιογραφικά πειραματικά στοιχεία και η διαφορά τους βρέθηκε κάτω από 2%. Στη συνέχεια οι επιδόσεις του συλλέκτη (ενεργειακή και εξεργειακή) συγκρίνονται για λειτουργία με νερό και με νανορευστό. Επιπρόσθετα, η παραμετρική ανάλυση με βάση τον όγκο του δοχείου παρουσιάζεται και το δοχείο των 150 λίτρων επιλέγεται για περαιτέρω ανάλυση.

Κατά την ετήσια αξιολόγηση του συλλέκτη, υπολογίστηκε βελτίωση με τη χρήση του νανορευστού, σε σύγκριση με την επιλογή του νερού σαν εργαζόμενο μέσο. Πιο συγκεκριμένα, για το βέλτιστο δοχείο παρατηρείται βελτίωση στην παραγόμενη θερμική ενέργεια κατά 4.4%, για την παραγόμενη ηλεκτρική 1.5%, ενώ η εξεργειακή βελτίωση είναι 3.2%. Σε απόλυτα ενεργειακά ποσά η ετήσια παραγόμενη θερμική ενέργεια είναι 1615 kWh και η αντίστοιχη ηλεκτρική 466 kWh. Αντίστοιχα η ετήσια θερμική απόδοση είναι 43.8%, η ηλεκτρική 12.6%, η συνολική 56.4% και η εξεργειακή 17.7%.

Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης μπορούν να αξιοποιηθούν για την ετήσια αξιολόγηση του θερμοφωτοβολταϊκού συλλέκτη τόσο για λειτουργία με νερό τόσο και για λειτουργία με νανορευστό. Επίσης αποδεικνύεται πως η χρήση νανορευστού είναι μια υποσχόμενη τεχνική για την αύξηση των θερμικών αλλά και ηλεκτρικών επιδόσεων των ηλιακών συλλεκτών και η μελέτη της είναι αναγκαία.

**Λέξεις Κλειδιά:** Θερμοφωτοβολταϊκός συλλέκτης, Νανούλικά, Εξεργειακή ανάλυση, Ετήσια απόδοση, Ολοκληρωμένο σύστημα

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας είναι αναγκαία για την δημιουργία βιώσιμων ενεργειακών συστημάτων τα οποία θα μπορούν καλύψουν μέρος των ενεργειακών αναγκών της σύγχρονης κοινωνίας. Η ηλιακή ενέργεια μπορεί να αξιοποιηθεί από τους ηλιακούς συλλέκτες οι οποίοι αξιοποιούν την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και παράγουν θερμική ισχύ ή ηλεκτρισμό. Μια ξεχωριστή κατηγορία ηλιακών συλλεκτών είναι ο υβριδικός συλλέκτης ή θερμοφωτοβολταϊκός συλλέκτης ο οποίος μπορεί να παράγει ταυτόχρονα ηλεκτρική ισχύ αλλά και θερμική ισχύ χαμηλής θερμοκρασίας.

Η θερμική απόδοση αυτών των συλλεκτών είναι εν γένει χαμηλή και γι αυτό διάφορες μέθοδοι έχουν εφαρμοστεί για την βελτίωση της απόδοσης τους. Η χρήση νανορευστών ως εργαζόμενα μέσα είναι μια πολλά υποσχόμενη μέθοδος για βελτίωση της θερμικής τους απόδοσης. Ο όρος νανοϋλικό ή nanofluid προτάθηκε από τον Choito 1995 [1] αναφέρεται στο διασκορπισμό (dispersion) νανοσωματιδίων, συνήθως μεταλλικών, σε ένα υγρό βάσης (συνήθων νερό ή θερμικό έλαιο. Στόχος είναι η δημιουργία ενός ρευστού με βελτιωμένες θερμικές ιδιότητες, πρακτικά μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα, το οποίο θα είναι καταλληλότερο σαν εργαζόμενο μέσα σε συσκευές όπως οι ηλιακοί συλλέκτες. Τα συνήθη σωματίδια που χρησιμοποιούνται είναι τα εξής: Cu, CuO, Al, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, Fe, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, SiC και Ag [2]. Εν γένει, τα νανοσωματίδια χρησιμοποιούνται σε μικρές ογκομετρικές συστάσεις από 1% έως 4%.

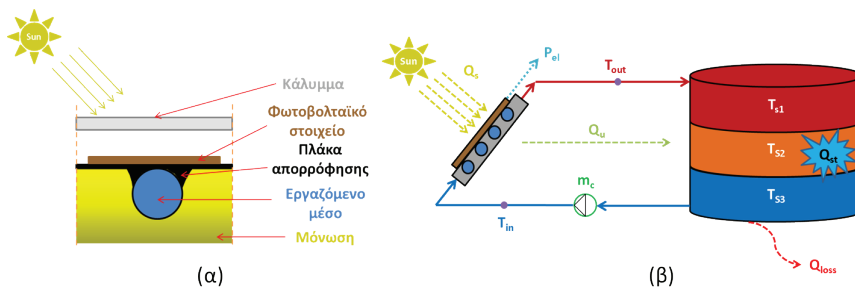
Στη βιβλιογραφία, υπάρχουν αρκετές μελέτες οι οποίες εξετάζουν τη χρήση νανορευστών στους θερμοφωτοβολταϊκούς συλλέκτες. Οι Al-Shamani et al. [3] εξέτασαν τρία διαφορετικά νανοσωματίδια και τελικά κατέληξαν πως η χρήση 1% SiC σε νερό οδηγεί σε βελτίωση 43% στην ηλεκτροπαραγωγή και 13% στην θερμική παραγωγή, ενώ οι βελτιώσεις με χρήση SiO<sub>2</sub> και TiO<sub>2</sub> ήταν μικρότερες. Οι Khanjar et al. [4] μελέτησαν τη χρήση του Ag σε μεγάλη σύσταση (10%) και βρήκαν 4% ηλεκτρική βελτίωση και 12.5% θερμική βελτίωση, ενώ η χρήση του Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> με ίδια ογκομετρική σύσταση οδήγησε σε λιγότερη βελτίωση. Οι Xu και Kleinstreuer [5] μελέτησαν τη χρήση του Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> σε νερό με σύσταση 5% και βρήκαν 10% ηλεκτρική βελτίωση ενώ δεν παρατήρησαν θερμική βελτίωση. Οι Ghadiri et al. [6] εξέτασαν τη χρήση του Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> σε νερό με 3% σύσταση. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα τους, η ηλεκτροπαραγωγή βελτιώθηκε 5% ενώ η παραγωγή θερμότητας 46%. Οι Rejeb et al. [7] εξέτασαν τη χρήση Cu και Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> σε νερό για ογκομετρική σύσταση ίση με 0.4%. Τελικά απέδειξαν πως η χρήση του Cu οδηγεί σε υψηλότερες επιδόσεις. Επίσης η χρήση του Cu αλλά και του Ag έχουν επισημανθεί σαν τις καταλληλότερες επιλογές στις πηγές [8-9].

Είναι φανερό πως έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές μελέτες για τη χρήση νανορευστών στους υβριδικούς ηλιακούς συλλέκτες. Όμως, υπάρχει έλλειψη μελετών οι οποίες να υπολογίζουν την ετήσια βελτίωση της απόδοσης με τη χρήση νανορευστών. Γι αυτό, η μελέτη αυτή εστιάζεται τόσο στην στιγμιαία βελτίωση της απόδοσης αλλά και στην ετήσια. Δοκιμάζεται η χρήση χαλκού (Cu) σε νερό, επειδή αυτό το νανοσωματίδιο είναι μία από τις καλύτερες λύσεις σύμφωνα με τη προηγούμενη βιβλιογραφική ανασκόπηση. Η μελέτη πραγματοποιείται με ένα θερμικό μοντέλο το οποίο αναπτύχθηκε στο EES (Engineering Equation Solver). Τα αποτελέσματα του μοντέλου αυτού συγκρίνονται με αντίστοιχα πειραματικά από τη βιβλιογραφία ώστε να ελεγχθεί η ακρίβεια του.

## 2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

### 2.1 Εξεταζόμενος συλλέκτης

Στην εικόνα 1 που ακολουθεί δίνεται ο εξεταζόμενος συλλέκτης (εικόνα 1α) και το εξεταζόμενο σύστημα (εικόνα 1β).



Εικόνα 1: α) Η εξεταζόμενη λωρίδα του συλλέκτη σε τομή β) Εξεταζόμενο σύστημα με δοχείο

Στην εικόνα 1α δίνεται η εγκάρσια τομή μιας λωρίδας του εξεταζόμενου συλλέκτη. Στην εικόνα 1β παρουσιάζεται το ολοκληρωμένο σύστημα με το δοχείο αποθήκευσης. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι το δοχείο χωρίζεται σε 3 ζώνες ανάμειξης. Στο πίνακα 1 δίνονται όλα τα χαρακτηριστικά του εξεταζόμενου ηλιακού συλλέκτη, τα οποία αντιστοιχούν στον εξεταζόμενο συλλέκτη της μελέτης των Chowetal. [10]. Επίσης δίνονται οι θερμικές ιδιότητες του εξεταζόμενου νανοσωματιδίου. Η κλίση του συλλέκτη είναι 45° έτσι ώστε να λειτουργεί αποδοτικά καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, με μικρή έμφαση κατά τη χειμερινή περίοδο όπου το ηλιακό δυναμικό είναι μειωμένο.

Πίνακας 1: Βασικά χαρακτηριστικά στοιχεία του συλλέκτη

Παράμετροι	Τιμές	Παράμετροι	Τιμές
Συλλεκτική επιφάνεια ( $A_c$ )	2 m <sup>2</sup>	Παράγων επιφάνειας PV (PF)	0.804
Μήκος (L)	1.916 m	Θερμοκρασία αναφοράς ( $T_{ref}$ )	298 K
Αριθμός σωλήνων (N)	10	Συντελεστής θερμοκρασίας PV (b)	0.0041 K <sup>-1</sup>
Εσωτερική διάμετρος ( $d_{in}$ )	7.72 mm	Πάχος μόνωσης ( $L_{ins}$ )	0.03 m
Εξωτερική διάμετρος ( $d_{out}$ )	9.52 mm	Απόσταση πλάκας-καλύμματος ( $\delta_{pc}$ )	0.03 m
Διαπερατότητα καύματος ( $\tau$ )	0.83	Κλίση του συλλέκτη ( $\beta_{col}$ )	45°
Απορροφητικότητα πλάκας ( $\alpha$ )	0.95	Θερμική αγωγιμότητα μόνωσης ( $k_{ins}$ )	0.034 W/mK
Συντελεστής εκπομπής καλύμματος ( $\epsilon_c$ )	0.88	Πυκνότητα Cu ( $\rho_{Cu}$ )	8933 kg/m <sup>3</sup>
Συντελεστής εκπομπής πλάκας ( $\epsilon_p$ )	0.93	Ειδική θερμοχωρητικότητα Cu ( $c_{p,Cu}$ )	396 J/kgK
Απόδοση αναφοράς για το PV ( $\eta_{ref}$ )	0.173	Θερμική αγωγιμότητα Cu ( $k_{Cu}$ )	332 W/mK

## 2.2 Μαθηματικό υπόβαθρο

Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιαστούν οι βασικές σχέσεις για τη μαθηματική μοντελοποίηση του συστήματος καθώς και των επιμέρους τμημάτων του. Έμφαση δίνεται στις εξισώσεις που περιγράφουν την αξιολόγηση του ηλιακού συλλέκτη καθώς και στη μοντελοποίηση του ναυορευοστού.

### 2.2.1 Ηλιακός συλλέκτης

Η θερμική απόδοση του ηλιακού συλλέκτη ( $\eta_{th}$ ) υπολογίζεται ως ο λόγος της ωφέλιμης θερμότητας ( $Q_u$ ) προς την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία ( $Q_s$ ).

$$\eta_{th} = \frac{Q_u}{Q_s} = \frac{m_c \cdot c_p \cdot (T_{out} - T_{in})}{A_c \cdot G_T} \quad (1)$$

Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης ( $\eta_{el}$ ) υπολογίζεται ως ο λόγος της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος ( $P_{el}$ ) προς την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία ( $Q_s$ ).

$$\eta_{el} = \frac{P_{el}}{Q_s} = \frac{A_c \cdot PF \cdot \eta_{PV}}{A_c \cdot G_T} \quad (2)$$

Η απόδοση του φωτοβολταϊκού στοιχείου ( $\eta_{PV}$ ) υπολογίζεται ως εξής:

$$\eta_{PV} = \eta_{ref} \cdot (1 - b \cdot (T_{cell} - T_{ref})) \quad (3)$$

Είναι σημαντικό να σημειωθεί πως η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού στοιχείου ( $T_{cell}$ ) θεωρήθηκε ίση με τη θερμοκρασία της πλάκας ( $T_p$ ) σε αυτή την ανάλυση. Για το υπολογισμό των επιμέρους παραμέτρων (π.χ.  $Q_u$ ,  $T_p$ , κτλ) χρησιμοποιήθηκαν κλασικές σχέσεις οι οποίες βρίσκονται στην πηγή [11] και σχετίζονται με στοιχειώδεις εξισώσεις μετάδοσης θερμότητας στον επίπεδο ηλιακό συλλέκτη. Ο συνολικός βαθμός απόδοσης του συλλέκτη ( $\eta_{tot}$ ) δίνεται ως:

$$\eta_{tot} = \frac{Q_u + P_{el}}{Q_s} \quad (4)$$

Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης του συλλέκτη ( $\eta_{ex}$ ) υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση 5. Ο αριθμητής είναι η συνολική θερμική και ηλεκτρική εξέργεια, ενώ ο παρονομαστής είναι η εξέργεια της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας βάση του μοντέλου του Petela [12]. Η θερμοκρασία του ήλιου ( $T_{sun}$ ) είναι ίση με 5770 K.

$$\eta_{ex} = \frac{Ex_u}{Ex_s} = \left[ Q_u - m_c \cdot c_p \cdot T_{am} \cdot \ln \left[ \frac{T_{out}}{T_{in}} \right] + P_{el} \right] \cdot \left[ Q_s \cdot \left( 1 - \frac{4}{3} \cdot \left[ \frac{T_{am}}{T_{sun}} \right] + \frac{1}{3} \cdot \left[ \frac{T_{am}}{T_{sun}} \right]^4 \right) \right]^{-1} \quad (5)$$

### 2.2.2 Δοχείο αποθήκευσης

Η μοντελοποίηση του δοχείου στηρίχθηκε στην εξίσωση του ισολογισμού ενέργειας. Η αποθηκευόμενη ισχύς ( $Q_{st}$ ) ισούται με τη παραγόμενη ωφέλιμη θερμική ισχύ ( $Q_u$ ) μείον τις θερμικές απώλειες του δοχείου προς το περιβάλλον. Περισσότερες λεπτομέρειες για την τρι-ζωνική μοντελοποίηση με ζώνες ομογενούς ανάμιξης βρίσκονται στη πηγή [13].

$$Q_{st} = Q_u - Q_{loss} \quad (6)$$

### 2.2.3 Μοντελοποίηση νανορευστού

Η προσομοίωση του νανορευστού πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας τις κατάλληλες θερμικές ιδιότητες [14]. Με σύμβολο (nf) συμβολίζεται το νανορευστό, με το (nb) το νερό και με το (np) ο χαλκός Cu.

Πυκνότητα:

$$\rho_{nf} = \rho_{bf} \cdot (1 - \phi) + \rho_{np} \cdot \phi \quad (7)$$

Ειδική θερμοχωρητικότητα

$$c_{p,nf} = \frac{\rho_{bf} \cdot (1 - \phi)}{\rho_{nf}} \cdot c_{p,bf} + \frac{\rho_{np} \cdot \phi}{\rho_{nf}} \cdot c_{p,np} \quad (8)$$

Θερμική αγωγιμότητα

$$k_{nf} = \frac{k_{np} + 2 \cdot k_{bf} - 2 \cdot \phi \cdot (k_{bf} - k_{np})}{\frac{k_{np}}{k_{bf}} + 2 + \phi \cdot \frac{k_{bf} - k_{np}}{k_{bf}}} \quad (9)$$

Δυναμική συνεκτικότητα

$$\mu_{nf} = \mu_{bf} \cdot (1 + 2.5 \cdot \phi + 6.5 \cdot \phi^2) \quad (10)$$

Ο αριθμός Nusselt υπολογίστηκε με βάση το μοντέλο των Li και Xuan [15] για στρωτή ροή (Αριθμός Reynolds < 2300).

$$Nu = 0.4328 \cdot (1 + 11.285 \cdot \phi^{0.754} \cdot (Pe)^{0.218}) \cdot Re^{0.333} \cdot Pr^{0.4} \quad (11)$$

Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι για τη λειτουργία με νερό, ο αριθμός Nusselt υπολογίστηκε από τη παρακάτω σχέση, η οποία πάλι έχει ισχύ για στρωτή ροή [16]:

$$Nu = 3.66 + \left[ 0.0668 \cdot \left( \frac{D_{in}}{L} \cdot Re \cdot Pr \right) \right] \cdot \left[ 1 + 0.04 \cdot \left( \frac{D_{in}}{L} \cdot Re \cdot Pr \right)^{\frac{2}{3}} \right]^{-1} \quad (12)$$

### 2.2.4 Ημερήσια αξιολόγηση συστήματος

Η ημερήσια αξιολόγηση του συστήματος πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις της υποενότητας 2.2.1 αλλά με τα ημερήσια μεγέθη και όχι με τα στιγμιαία. Ο πίνακας 2 συνοψίζει τις σημαντικότερες σχέσεις

Πίνακας 2. Υπολογισμός ημερήσιων μεγεθών

Ημερήσια μεγέθη	Εξίσωση	Ημερήσια απόδοση	Εξίσωση
Ηλεκτροπαραγωγή	$E_{el} = \int_{N_D} P_{el} \cdot 10^{-3} \cdot dt_h$	Ηλεκτρική	$\eta_{el,sys} = \frac{E_{el}}{E_s}$
Θερμότητα	$E_{st} = \frac{\rho_f \cdot V_T \cdot c_p \cdot (T_{s,end} - T_{s,start}) \cdot 10^{-3}}{3600}$	Θερμική	$\eta_{th,sys} = \frac{E_{st}}{E_s}$
Ηλιοφάνεια	$E_s = A_c \cdot \int_{N_D} G_T \cdot 10^{-3} \cdot dt_h$	Συνολική	$\eta_{tot,sys} = \frac{E_{st} + E_{el}}{E_s}$
Εξέργεια	$Z_u = E_{el} + E_{st} \cdot \left(1 - \frac{T_{am}}{T_{s,end}}\right)$ $Z_s = E_s \cdot \left(1 - \frac{4}{3} \cdot \left[\frac{T_{am}}{T_{sun}}\right] + \frac{1}{3} \cdot \left[\frac{T_{am}}{T_{sun}}\right]^4\right)$	Εξεργειακή	$\eta_{ex,sys} = \frac{Z_u}{Z_s}$

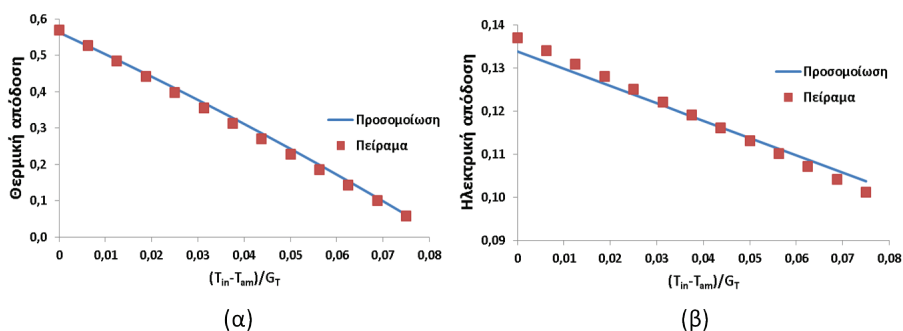
### 2.2.5 Λοιπά στοιχεία μεθοδολογίας

Στο πρώτο κομμάτι αυτής της εργασίας, το αναπτυχθέν θερμικό και ηλεκτρικό μοντέλο επαληθεύεται με βιβλιογραφικά στοιχεία από τη πηγή [10]. Στη συνέχεια εξετάζεται παραμετρικά σε μόνιμες συνθήκες. Σε αυτές τις μόνιμες συνθήκες, η ηλιοφάνεια επιλέχτηκαν ίση με  $800 \text{ W/m}^2$ , η θερμοκρασία περιβάλλοντος  $300 \text{ K}$  και η ογκομετρική παροχή  $3 \text{ L/min}$ . Κατά την ημερήσια λειτουργία του συλλέκτη, μετεωρολογικά δεδομένα για την Αθηνά χρησιμοποιήθηκαν από τις πηγές [17-18]. Πρακτικά οι προηγούμενες εξισώσεις λύνονται σε ένα ψευδο-δυναμικό μοντέλο το οποίο βασίζεται στην επίλυση των διαφορικών εξισώσεων στο δοχείο αποθήκευσης. Στην αρχή της μέρας, η θερμοκρασία στο δοχείο είναι ίση με εκείνης του περιβάλλοντος σε κάθε περίπτωση. Μετά το πέρας της ημέρας, η αποθηκευμένη θερμότητα στο δοχείο, καθώς και η ηλεκτρική ισχύς που έχει παραχθεί αξιολογούνται.

## 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 3.1 Επικύρωση μοντέλου

Στην εικόνα 2 δίνονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης του μοντέλου σε σχέση με τα πειραματικά αποτελέσματα της πηγής [10]. Είναι φανερό πως τα αποτελέσματα είναι πολύ κοντά και έτσι το αναπτυχθέν μοντέλο είναι αξιόπιστο. Πιο συγκριμένα, η διαφορά στη θερμική απόδοση είναι περίπου 4% και στην ηλεκτρική 1.3%. Πρέπει να σημειωθεί πως η σύγκριση αυτή πραγματοποιήθηκε για λειτουργία με νερό σαν εργαζόμενο μέσο.



Εικόνα 2: Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου και πειράματος από τη πηγή [10] α) για τη θερμική απόδοση και β) για την ηλεκτρική απόδοση

### 3.2 Απόδοση συλλέκτη με νανορευστό

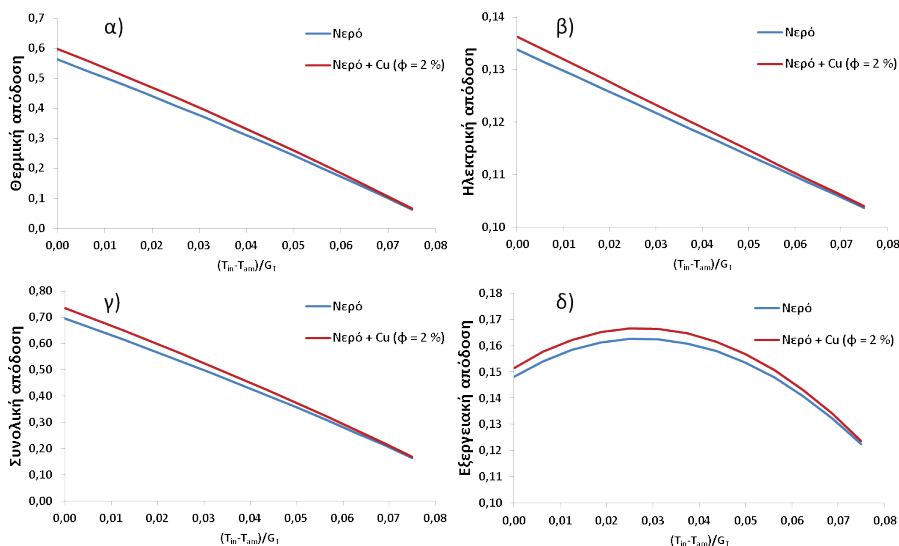
Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζεται η απόδοση του συλλέκτη για λειτουργία με νερό και με νανορευστό. Η εικόνα 3 παρουσιάζει τα αποτελέσματα για ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών εισόδου του ρέστου. Τα αποτελέσματα είναι εκφρασμένα μέσω της παραμέτρου  $[(T_{in}-T_{am})/G_T]$  η οποία είναι μια συνήθης παράμετρος. Είναι φανερό πως η χρήση νανορευστού οδηγεί σε μεγαλύτερες επιδόσεις, ιδιαίτερα στις χαμηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας. Παρακάτω δίνονται οι εξισώσεις προσέγγισης της θερμικής και ηλεκτρικής απόδοσης του συλλέκτη για λειτουργία με νερό αλλά και με νανορευστό. Τα αποτελέσματα αυτά αναφέρονται σε ογκομετρική σύσταση  $\phi=2\%$  του χαλκού στο νερό. Αυτή η σύσταση είναι μια τυπική σύσταση και γι αυτό επιλέχθηκε.

$$\eta_{th}[\text{νερό}] = 0.5626 - 5.8285 \cdot \left( \frac{T_{in} - T_{am}}{G_T} \right) - 0.01417 \cdot \left( \frac{T_{in} - T_{am}}{G_T} \right)^2 \quad (13)$$

$$\eta_{th}[\text{νανορευστώ}] = 0.5982 - 6.1289 \cdot \left( \frac{T_{in} - T_{am}}{G_T} \right) - 0.01610 \cdot \left( \frac{T_{in} - T_{am}}{G_T} \right)^2 \quad (14)$$

$$\eta_{el}[\text{νερό}] = 0.1339 - 0.4018 \cdot \left( \frac{T_{in} - T_{am}}{G_T} \right) \quad (15)$$

$$\eta_{el}[\text{νανορευστώ}] = 0.1363 - 0.4310 \cdot \left( \frac{T_{in} - T_{am}}{G_T} \right) \quad (16)$$



Εικόνα 3: Σύγκριση αποτελεσμάτων για λειτουργία με νερό και νανορευστό α) θερμική απόδοση β) ηλεκτρική απόδοση γ) συνολική απόδοση δ) εξεργειακή απόδοση

### 3.3 Ετήσιες επιδόσεις και διαστασιολόγηση δοχείου

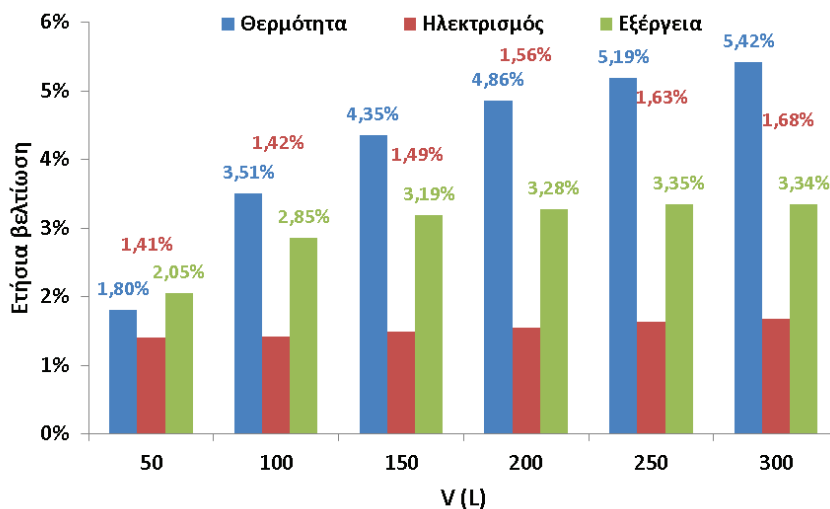
Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τις λειτουργίας του συλλέκτη για λειτουργία με νερό και με νανορευστό, καθώς και για διάφορα δοχεία όγκου από 50 L έως 300 L. Ο πίνακας 3 συνοψίζει αυτά τα αποτελέσματα. Πιο συγκριμένα, δίνονται οι ετήσιες παραγωγές θερμότητας, ηλεκτρισμού και εξέργειας για όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις. Είναι φανερό πως μεγαλύτερο δοχείο οδηγεί σε μεγαλύτερη παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού. Ωστόσο, η παραγωγή εξέργειας μεγιστοποιείται για το δοχείο των 150 L. Αυτό το αποτέλεσμα βασίζεται στη μείωση της μέσης θερμοκρασίας του δοχείου όταν χρησιμοποιείται μεγαλύτερος όγκος δοχείου. Οι παραπάνω παρατηρήσεις ισχύουν και για τα δύο εργαζόμενα μέσα.

Πίνακας 3: Ετήσια παραγωγή για διάφορα δοχεία

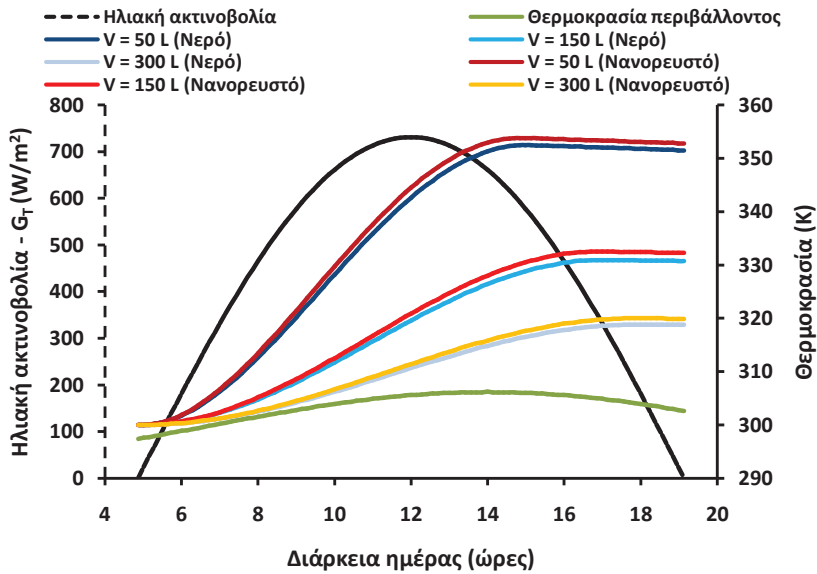
Ετήσια παραγωγή (kWh)	Ρευστό	Όγκος δοχείου – V (L)					
		50	100	150	200	250	300
Θερμότητα	Νερό	911	1325	1548	1687	1781	1849
	Νανορευστό	927	1372	1615	1768	1873	1950
Ηλεκτρισμός	Νερό	411	442	459	469	475	480
	Νανορευστό	417	449	466	476	483	488
Εξέργεια	Νερό	534	580	588	587	583	579
	Νανορευστό	544	596	607	606	603	598

Η χρήση νανορευστού οδηγεί σε αυξημένες επιδόσεις του συλλέκτη. Η εικόνα 4 παρουσιάζει την βελτίωση που παρατηρήθηκε για ετήσια λειτουργία μεταξύ των περιπτώσεων νανορευστού και νερού. Εν γένει, μεγαλύτερη βελτίωση παρατηρείται για μεγαλύτερα δοχεία διότι σε αυτά τα παραγόμενα ποσά θερμότητας/ηλεκτρισμού είναι μεγαλύτερα και έτσι το περιθώριο βελτίωσης είναι μεγαλύτερο. Η βελτίωση στη παραγωγή θερμότητας κυμαίνεται από 1.80% έως 5.42%, στην παραγωγή ηλεκτρισμού από 1.41% έως 1.68%, ενώ για την παραγωγή εξέργειας από 2.05% έως 3.35%.

Η εικόνα 5 παρουσιάζει τη συμπεριφορά της θερμοκρασίας του συστήματος για τρία διαφορετικά δοχεία (50 L, 150 L και 300 L) κατά το μήνα Ιούλιο. Επίσης δίνονται οι θερμοκρασία περιβάλλοντος και η ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Είναι φανερό πως μικρότερο δοχείο οδηγεί σε μεγαλύτερη θερμοκρασία εντός του δοχείου κατά το τέλος της ημέρας. Επίσης είναι φανερό ότι μετά από κάποια στιγμή, η θερμοκρασία γίνεται περίπου οριζόντια. Αυτό δικαιολογείται από την μικρή ηλιοφάνεια και τη μικρή θερμική απόδοση μετά από κάποιο σημείο. Σε όλα τα ζεύγη καμπυλών, η θερμοκρασία του νανορευστού είναι μεγαλύτερη για δύο λόγους. Ο ένα είναι η υψηλότερη θερμική απόδοση και ο δεύτερος η μικρότερη ειδική θερμοχωρητικότητα του ρευστού.

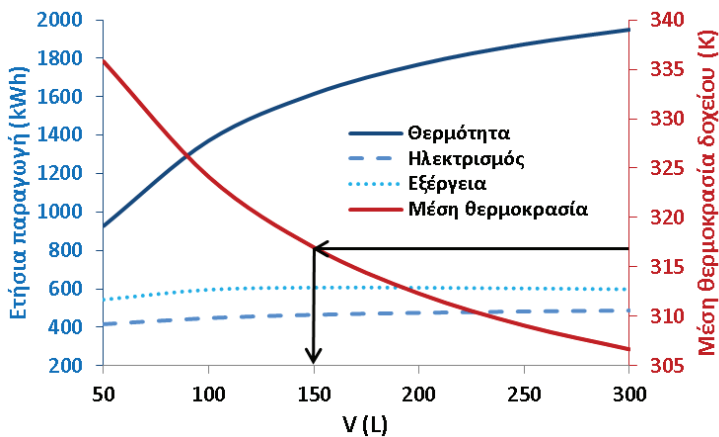


Εικόνα 4: Ετήσια βελτίωση με τη χρήση νανορευστού για διάφορα δοχεία



Εικόνα 5: Ημερήσια θερμική επίδοση για τρία δοχεία κατά τον Ιούλιο

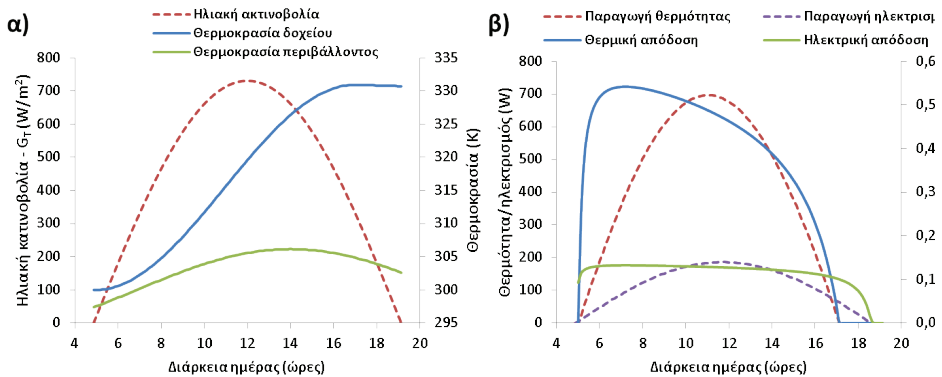
Η εικόνα 6 απεικονίζει την ετήσια παραγωγή θερμότητας, ηλεκτρισμού, εξέργειας, καθώς και τη μέση θερμοκρασία στο δοχείο κατά τη δύση του ηλίου για τη περίπτωση του νανορευυστού. Αυτό το διάγραμμα δείχνει πως μεγαλύτερο δοχείο οδηγεί σε μεγαλύτερο ποσό ωφέλιμης θερμότητας αλλά ταυτόχρονα και σε μικρότερη μέση παραγόμενη θερμοκρασία. Το τελικό αποτέλεσμα είναι η μεγιστοποίηση της εξέργειας για το δοχείο των 150 L, που είναι ένα ενδιάμεσο εξεταζόμενο δοχείο. Επίσης για αυτό το δοχείο, η μέση παραγόμενη θερμοκρασία είναι κοντά στους 45°C, μια θερμοκρασία ιδανική για κτιριακές εφαρμογές. Έτσι λοιπόν το δοχείο όγκου 150 L βρέθηκε σαν το βέλτιστο για ένα θερμοφωτοβολταϊκό συλλέκτη επιφάνειας 2 m<sup>2</sup>. Μια τελευταία παρατήρηση είναι πως η παραγόμενη εξέργεια είναι κοντά στη παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ διότι το εξεργειακό περιεχόμενο της ωφέλιμης θερμότητας είναι μικρό λόγω της σχετικά χαμηλής θερμοκρασίας της.



Εικόνα 6: Ετήσια αξιολόγηση συστήματος για διάφορα δοχεία με νανορευυστό

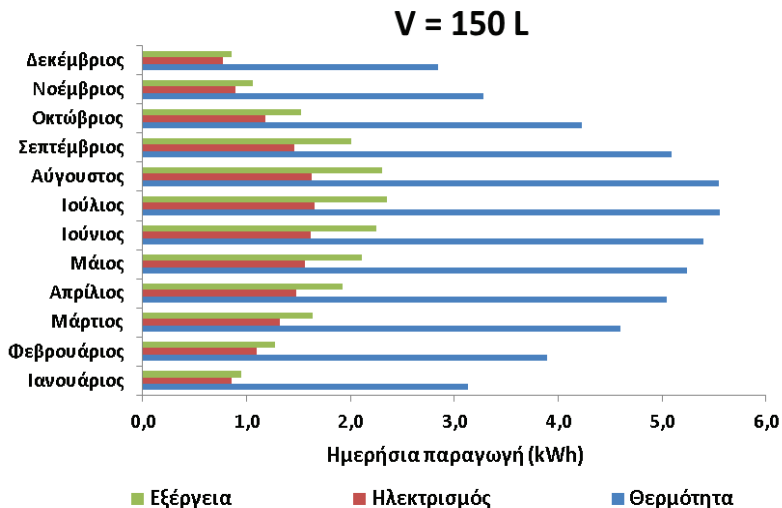
### 3.4 Αποτελέσματα σε μηνιαία βάση και ημερήσια για το δοχείο των 150 L

Στη προηγούμενη ενότητα αποδείχτηκε πως η χρήση του δοχείου των 150 L είναι η βέλτιστη επιλογή. Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται λεπτομερή αποτελέσματα για το σύστημα με αυτό το δοχείο. Πιο συγκεκριμένα, δίνονται αποτελέσματα για την ημερήσια και τη μηνιαία επίδοση του συστήματος. Η εικόνα 7 παρουσιάζει τη συμπεριφορά του συστήματος κατά το μήνα Ιούλιο. Στην εικόνα 7α δίνονται οι συνθήκες περιβάλλοντος, καθώς και η θερμοκρασία του νερού στο δοχείο. Στην εικόνα 7β παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της θερμικής και ηλεκτρικής απόδοσης του συστήματος. Οι καμπύλες ισχύος παρουσιάζουν προφίλ αντίστοιχο με αυτό της ηλιοφάνειας. Αντίθετα, οι καμπύλες απόδοσης έχουν μια ασύμμετρη συμπεριφορά. Κατά τις πρωινές ώρες, όπου τα θερμοκρασιακά πεδία είναι εν γένει χαμηλά, η απόδοσης είναι υψηλότερες. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η θερμική απόδοση η οποία μηδενίζεται κατά τις 17:00 λόγω της υψηλής θερμοκρασίας του νερού τότε.



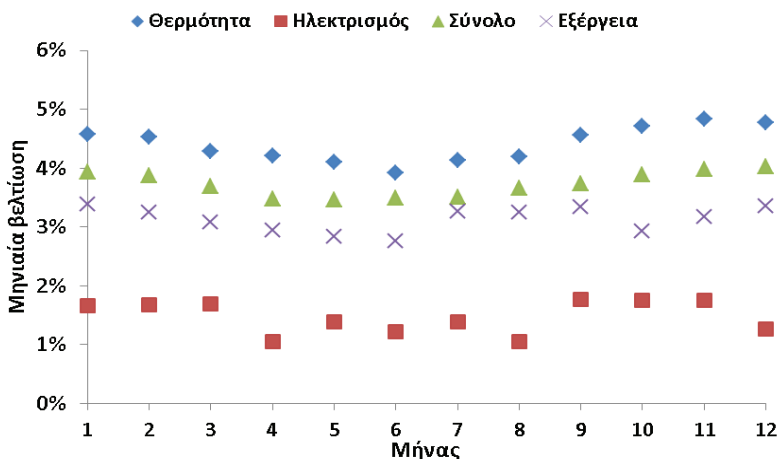
Εικόνα 7: Ημερήσια απόδοση του συστήματος για λειτουργία κατά το μήνα Ιούλιο

Η εικόνα 8 παρουσιάζει τα μηνιαία αποτελέσματα για τη παραγωγή θερμότητας, ηλεκτρισμού και εξέργειας. Είναι γεγονός πως η απόδοση του συστήματος είναι μεγαλύτερη κατά τους θερινούς μήνες όπου το ηλιακό δυναμικό είναι μεγαλύτερο. Επίσης είναι σημαντικό να σημειωθεί πως η παραγωγή θερμότητας είναι αρκετά μεγαλύτερη σε σχέση με τη παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ. Η εξεργειακή απόδοση είναι ανάμεσα στις 2 προηγούμενες ποσοότητες και πιο κοντά στην ηλεκτροπαραγωγή.



Εικόνα 8: Μηνιαία απόδοση για το δοχείο των 150 L

Η εικόνα 9 παρουσιάζει τη μηνιαία βελτίωση για τα παραγόμενα μεγέθη. Η παραγωγή θερμότητας παρουσιάζει βελτίωση γύρω στο 5% μεταξύ λειτουργίας με νανορευστό και νερό. Η βελτίωση στην ηλεκτροπαραγωγή είναι κοντά στο 2%. Η βελτίωση στη συνολική ισχύ είναι κοντά στο 4%, ενώ η βελτίωση στη παραγόμενη εξέργεια είναι κοντά στο 3%. Από αυτά τα αποτελέσματα γίνεται αντιληπτό ότι η εξέργεια επηρεάζεται κυρίως από την ηλεκτροπαραγωγή ενώ η συνολική ισχύς επηρεάζεται κυρίως από τη παραγόμενη θερμότητα. Τα αποτελέσματα αυτά ισχύουν εν γένει όλους τους μήνες. Σημαντική παρατήρηση είναι ότι η βελτίωση στις επιδόσεις από τη χρήση νανορευστού είναι λίγο πιο μεγάλη κατά τους χειμερινούς μήνες.



Εικόνα 9: Μηνιαία βελτίωση με τη χρήση νανορευστού

Στο τέλος αυτής της ενότητας, ο πίνακας 4 συνοψίζει τις μηνιαίες αλλά και ετήσιες επιδόσεις του συστήματος, τόσο για λειτουργία με νερό αλλά και με νανορευστό. Τα αποτελέσματα αυτά αφορούν τη περίπτωση του δοχείου των 150 L.

Πίνακας 4: Μηνιαίοι βαθμοί απόδοσης για το δοχείο των 150 L

Μήνας	Νερό				Νανορευστό			
	$\eta_{th,sys}$	$\eta_{el,sys}$	$\eta_{tot,sys}$	$\eta_{ex,sys}$	$\eta_{th,sys}$	$\eta_{el,sys}$	$\eta_{tot,sys}$	$\eta_{ex,sys}$
Ιανουάριος	0.448	0.126	0.574	0.148	0.469	0.128	0.600	0.153
Φεβρουάριος	0.433	0.125	0.558	0.154	0.453	0.127	0.580	0.159
Μάρτιος	0.420	0.124	0.544	0.162	0.438	0.126	0.564	0.167
Απρίλιος	0.409	0.124	0.533	0.170	0.426	0.125	0.552	0.175
Μάιος	0.402	0.123	0.525	0.176	0.419	0.125	0.543	0.181
Ιούνιος	0.400	0.123	0.522	0.181	0.416	0.124	0.540	0.186
Ιούλιος	0.402	0.122	0.525	0.184	0.419	0.125	0.543	0.190
Αύγουστος	0.410	0.123	0.533	0.185	0.427	0.125	0.553	0.191
Σεπτέμβριος	0.421	0.124	0.546	0.180	0.440	0.126	0.566	0.186
Οκτώβριος	0.435	0.125	0.561	0.171	0.456	0.127	0.583	0.176
Νοέμβριος	0.449	0.126	0.576	0.158	0.471	0.128	0.599	0.163
Δεκέμβριος	0.455	0.127	0.582	0.149	0.477	0.129	0.605	0.154
Ετήσια	0.420	0.124	0.544	0.171	0.438	0.126	0.564	0.177

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Σε αυτή τη μελέτη αναλύεται η ετήσια απόδοση ενός θερμοφωτοβολταικού συλλέκτη για λειτουργία με νερό και με νανορευστό. Ως νανορευστό χρησιμοποιείται το μείγμα νερού-χαλκού με 2% κατάγον σύσταση σε Cu.

Σύμφωνα με τα τελικά αποτελέσματα, η χρήση νανορευστού οδηγεί σε αυξημένες επιδόσεις τόσο θερμικές αλλά και τόσο ηλεκτρικές. Επίσης αποδείχτηκε ότι το βέλτιστο δοχείο εξεργειακά είναι αυτό

με όγκο ίσο 150 L. Ένα άλλο σημαντικό συμπέρασμα είναι πως για αυτό το δοχείο, η μέση θερμοκρασία παραγόμενης θερμότητας είναι κοντά στους 45°C, μια ιδανική θερμοκρασία για κτιριακές εφαρμογές.

Σε μηνιαία βάση αποδείχτηκε πως εν γένει σε όλους τους μήνες παρατηρούνται αντίστοιχες βελτιώσεις με τη χρήση νανορευστού. Όμως, κατά τη χειμερινή περίοδο οι βελτιώσεις αυτές είναι μεγαλύτερες. Επίσης υπολογίστηκε πως κατά τη διάρκεια της ημέρας, η παραγόμενη ισχύ ακολουθεί το προφίλ της ηλιοφάνειας, ενώ η απόδοση είναι μεγαλύτερη κατά τις πρωινές ώρες.

Τέλος, η ετήσια αξιολόγηση του συλλέκτη έδειξε πως η παραγόμενη θερμότητα αυξάνεται 4.4% με τη χρήση νανορευστού, η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια 1.5%, ενώ η παραγόμενη εξέργεια κατά 3.2%. Σε απόλυτα ενεργειακά ποσά για λειτουργία με νανορευστό, η ετήσια παραγόμενη θερμική ενέργεια είναι 1615 kWh και η αντίστοιχη ηλεκτρική 466 kWh. Επίσης, η ετήσια θερμική απόδοση είναι 43.8%, η ηλεκτρική 12.6%, η συνολική 56.4% και η εξεργειακή 17.7%.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Choi, SU, Eastman, J, 1995, "Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles", Argonne National Lab, IL (United States).
- [2] Bellos, E, Tzivanidis, C, 2017, "Parametric investigation of nanofluids utilization in parabolic trough collectors", *Therm. Sci. Eng. Prog.*, 2, pp. 71-79.
- [3] Al-Shamani, AN, Sopian, K, Mat, S, Hasan, HA, Abed, AM, Ruslan, MH, 2016, "Experimental studies of rectangular tube absorber photovoltaic thermal collector with various types of nanofluids under the tropical climate conditions", *Energy Conversion and Management*, 124, pp. 528-542
- [4] Khanjari, Y, Pourfayaz, F, Kasaeian, AB, 2016, "Numerical investigation on using of nanofluid in a water-cooled photovoltaic thermal system", *Energy Conversion and Management*, 122, pp. 263-278
- [5] Xu, Z, Kleinstreuer, C, 2014, "Concentration photovoltaic-thermal energy co-generation system using nanofluids for cooling and heating", *Energy Conversion and Management*, 87, pp. 504-512
- [6] Ghadiri, M, Sardarabadi, M, Pasandideh-fard, A.J, Moghadam, Experimental investigation of a PVT system performance using nanofluids, *Energy Conversion and Management* 2015;103: pp. 468-476
- [7] Rejeb, O, Sardarabadi, M, Ménézo, CE, Passandideh-Fard, M, Dhaou, MH, Jemni, A, 2016, "Numerical and model validation of uncovered nanofluid sheet and tube type photovoltaic thermal solar system", *Energy Conversion and Management*, 110, pp. 367-377
- [8] Saroha, S, Mittal, T, Modi, PJ, Bhalla, V, Khullar, V, Tyagi, H, et al., 2015, "Theoretical analysis and testing of nanofluids-based solar photovoltaic/thermal hybrid collector", *J Heat Transf*, 137, pp. 091015.
- [9] Mittal, T, Saroha, S, Bhalla, V, Khullar, V, Tyagi, H, Taylor, RA, et al., 2013, "Numerical study of solar photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid collector using nanofluids". ASME 2013 4th international conference on micro/nanoscale heat and mass transfer. American Society of Mechanical Engineers, pp. V001T02A7-VT02A7.
- [10] Chow, TT, Pei, G, Fong, KF, Lin, Z, Chan, ALS, Ji, J, 2009, "Energy and exergy analysis of photovoltaic thermal collector with and without glass cover", *Appl. Energy* 86, 3, pp. 310-316.
- [11] Duffie, JA, Beckman, WA, 1991, "Solar Engineering of Thermal Processes", Second Edition, Wiley J. & Sons, Inc, New York.
- [12] Petela, R, 2003, "Exergy of undiluted thermal radiation", *Solar Energy*, 74(6), pp. 469-488
- [13] Bellos, E, Tzivanidis, C, Antonopoulos, KA, 2016, "Exergetic, energetic and financial evaluation of a solar driven absorption cooling system with various collector types", *Applied Thermal Engineering*, 102, pp. 749-759



## ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ ΣΕ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΥΒΡΙΔΙΚΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ / ΘΕΡΜΙΚΩΝ (PV/T) ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

**Νεκτάριος Αρναουτάκης<sup>1</sup>, Μανώλης Σουλιώτης<sup>2,3</sup>,  
Ανδρέας Π. Βούρος<sup>4</sup>, Σπύρος Παπαευθυμίου<sup>1\*</sup>**

<sup>1</sup>Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης  
\*e-mail: spiros@dpem.tuc.gr

<sup>2</sup>Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος / <sup>3</sup>Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών  
Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας  
e-mail: msouliotis@uowm.gr

<sup>4</sup>Τμήμα Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών  
e-mail: andreasvourous73@gmail.com

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα υβριδικά Φωτοβολταϊκά/Θερμικά (PV/T) συστήματα μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική και θερμική μέσω ενιαίων μονάδων. Η παράμετρος που επηρεάζει καθοριστικά τη συνολική απόδοση (ηλεκτρική και θερμική) των PV/T είναι η θερμοκρασία λειτουργίας τους. Αυτή, μεταξύ άλλων, χαρακτηρίζει και την ποιότητα της παραγόμενης θερμότητας. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η εφαρμογή της μεθόδου της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ) σε τεχνολογίες PV/T. Εξετάζονται οι περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής ενεργειακών συστημάτων που βασίζονται σε αυτές τις τεχνολογίες (PV/T) και αξιολογούνται τόσο η παραγόμενη ενέργεια όσο και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα κατά την αναμενόμενη διάρκεια ζωής τους. Για το σκοπό αυτό γίνεται αρχικά η κατηγοριοποίηση των ερευνητικών εργασιών που έχουν γίνει μέχρι σήμερα και αφορούν τη μέθοδο ΑΚΖ σε συνδυασμό με την ενεργειακή ανάλυση ηλιακών συστημάτων σε τρεις θεματικές ενότητες. Κάθε θεματική ενότητα εξετάζει ένα διαφορετικό τμήμα της παραπάνω μεθοδολογίας αναλύοντας τρεις κατηγορίες συστημάτων: i) Φωτοβολταϊκά και ανεμογεννήτριες ή υβριδικές τεχνολογίες, ii) ηλιακά θερμικά συστήματα και iii) υβριδικά Φωτοβολταϊκά / Θερμικά συστήματα (PV/T). Στη συνέχεια παρουσιάζεται η πειραματική, ενεργειακή και περιβαλλοντική μελέτη συγκεκριμένων PV/T συστημάτων. Οι στόχοι αυτής της εργασίας είναι η δημιουργία καταρχήν ενός οδηγού εφαρμογής της ΑΚΖ και της ενεργειακής –πειραματικής ανάλυσης σε τεχνολογίες PV/T, ως ένα χρήσιμο εργαλείο για την έρευνα και μελέτη τέτοιων συστημάτων, καθώς επίσης και η παρουσίαση των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων που συνοδεύουν αυτά τα συστήματα. Ο κύριος όμως στόχος της εργασίας είναι η συστηματική αξιολόγηση – αποτίμηση των συστημάτων PV/T και ο καθορισμός των παραμέτρων που τα καθιστούν αποτελεσματικά.

**Λέξεις Κλειδιά:** Φωτοβολταϊκά / Θερμικά (PV/T) Συστήματα, Ανάλυση Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ), Ανάλυση Ισοζυγίου Ενέργειας

\*Corresponding Author

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι τεχνολογίες υβριδικών φωτοβολταϊκών – θερμικών συστημάτων (PV/T) συνδυάζουν φωτοβολταϊκά και θερμικά συστήματα σε μία ενιαία λειτουργική μονάδα παράγοντας ταυτόχρονα ηλεκτρική και θερμική ενέργεια, κυρίως για οικιακές εφαρμογές. Τα συστήματα αυτά παράγουν ηλεκτρική ενέργεια μέσω του φωτοβολταϊκού πλαισίου ενώ η θερμική ενέργεια αντλείται μέσω κατάλληλων εναλλακτικών θερμότητας, οι οποίοι τοποθετούνται στην πίσω όψη του φωτοβολταϊκού πλαισίου [1, 2]. Το μέσο της μεταφοράς της παραγόμενης θερμότητας είναι ρευστό, υγρό (συνήθως νερό) ή αέρας. Στην περίπτωση που το ρευστό απολαβής είναι το νερό, η παραγόμενη θερμότητα προορίζεται συνήθως για οικιακές εφαρμογές, όπως θέρμανση νερού χρήσης. Μία παραλλαγή των συστημάτων αυτών είναι τα συστήματα PV/T air στα οποία το θερμικό μέσο είναι ο αέρας (αντί του νερού) και τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αερόθερμα[3, 4], συνήθως για θέρμανση χώρου.

Η Ανάλυση κύκλου ζωής (ΑΚΖ) είναι ένα μεθοδολογικό εργαλείο υπολογισμού των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων ενός συστήματος ή ενός προϊόντος καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής του από την εξόρυξη των πρώτων υλών έως το στάδιο κατασκευής, λειτουργίας και απόρριψής του[5, 6, 7]. Η ΑΚΖ στα συστήματα με ενεργειακές εφαρμογές επιτρέπει τον υπολογισμό του περιβαλλοντικού φορτίου και του ενεργειακού ισοζυγίου σε όλο τον κύκλο ζωής των συστημάτων αυτών, συνεισφέροντας με αυτόν τον τρόπο στη διερεύνηση της βιωσιμότητάς τους. Η μέθοδος που εφαρμόζεται στη συγκεκριμένη εργασία ακολουθεί τα πρότυπα ISO 14040 και 14044 [8, 9] και εφαρμόζεται με χρήση του προγράμματος SimaPro 8.2 [10], το οποίο χρησιμοποιεί την βάση δεδομένων Ecoinvent 3.3 [10]. Η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για την ταξινόμηση των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων είναι η Eco-indicator 99[11, 12]. Σύμφωνα με την μεθοδολογία αυτή, οι κατηγορίες περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων που χρησιμοποιούνται είναι οι: καρκινογόνες ουσίες (carcinogen), ανόργανες (respiratory inorganics) και οργανικές (respiratory organics) ουσίες που επηρεάζουν το αναπνευστικό, κλιματική αλλαγή (climate change), ακτινοβολία (radiation), στρώμα του όζοντος (ozone layer), ευτροφισμός (acidification/eutrophication), οικοτοξικότητα (ecotoxicity), χρήση γης (land use) και χρήση ορυκτών πρώτων υλών (mineral use). Βασική καινοτομία της υπάρχουσας μελέτης είναι ο συνδυασμός πειραματικών δεδομένων κατά τη λειτουργία συγκεκριμένων PV/T συστημάτων με τη μέθοδο της ΑΚΖ, παρέχοντας με αυτό τον τρόπο μια ολιστική προσέγγιση για την εφαρμογή τέτοιων συστημάτων στην παραγωγή ζεστού νερού και ηλεκτρικής ενέργειας στις κατοικίες. Η βασική δομή της εργασίας είναι: Στην ενότητα 2 παρουσιάζεται η ταξινόμηση των υπαρχόντων μελετών σε ενεργειακά ηλιακά συστήματα σε συγκεκριμένες κατηγορίες στις οποίες αναφέρεται το είδος των συστημάτων που περιλαμβάνουν και το είδος της κάθε μελέτης. Στην ενότητα 3 παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά των υπό μελέτη PV/Τσυσκευών καθώς και τα αποτελέσματα από την πειραματική μελέτη της λειτουργίας κάτω από διαφορετικές κλιματολογικές συνθήκες. Στην ενότητα αυτή υπολογίζονται η μέγιστη ηλεκτρική απόδοση, η θερμική απόδοση και η μέση ημερήσια απόδοση των συσκευών αυτών. Στην ενότητα 4 παρουσιάζεται η ΑΚΖ των υπό μελέτη συστημάτων, αναλύοντας τα στάδια κατασκευής, εγκατάστασης και λειτουργίας για το σύνολο των υπό μελέτη συσκευών. Στις ενότητες 5 και 6 παρουσιάζονται οι περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις και αναλύεται το ενεργειακό ισοζύγιο για όλο τον κύκλο ζωής τους. Τέλος, παρουσιάζονται και αναλύονται τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας.

## 2. ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΚΖ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

### 2.1. Περιβαλλοντική και ενεργειακή ανάλυση PV και WT ή PV/WT συστημάτων.

Στην πρώτη ενότητα αναλύονται οι περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις και η παραγόμενη ενέργεια καθ' όλο τον κύκλο ζωής συστημάτων που χρησιμοποιούν την ηλιακή ακτινοβολία ή την αιολική ενέργεια για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Υπάρχει πληθώρα ερευνητικών εργασιών πάνω στον τομέα αυτό. Χαρακτηριστικά, οι Fthenakis και Kim[13] πραγματοποίησαν μελέτη της ΑΚΖ σε PV συστήματα υψηλής συγκέντρωσης. Οι Gallardo et al. [14] παρουσίασαν μια μελέτη βελτιστοποίησης για τη σχεδίαση PV συστημάτων μεγάλης κλίμακας, ενώ οι Marimuthu και Kirubakaran [15] υπολόγισαν το περιβαλλοντικό φορτίο για ένα υβριδικό PV-WT σύστημα στην Ινδία. Οι Zhong et al. [16] παρουσίασαν την περιβαλλοντική ανάλυση ενός υβριδικού πολυκρυσταλλικού PV-WT ενεργειακού. Στις εργασίες των Tremeak και Meunier [17] καθώς και των Guezuranga et al. [18] διερευνήθηκε η περιβαλλοντική συμπεριφορά συστημάτων WT.

## 2.2. Περιβαλλοντική και ενεργειακή ανάλυση ηλιακώνθερμικών συστημάτων

Η δεύτερη ενότητα περιλαμβάνει όλες τις μελέτες που εξετάζουν την περιβαλλοντική και ενεργειακή συμπεριφορά ηλιακών θερμικών συστημάτων. Σε αυτή την κατηγορία χαρακτηριστικές είναι οι μελέτες των Arfende et al. [6,18] οι οποίοι υπολόγισαν τις περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις για τα στάδια κατασκευής, εγκατάστασης, συντήρησης και απόρριψης ενός ηλιακού θερμοσίφωνα με επίπεδο συλλέκτη, καθώς και το ενεργειακό και περιβαλλοντικό ισοζύγιο στο στάδιο χρήσης. Οι Battisti και Corgando [19] μελέτησαν την περιβαλλοντική συμπεριφορά ηλιακών θερμοσιφωνικών συστημάτων με επίπεδους συλλέκτες. Ο Kalogirou S.A μελέτησε την περιβαλλοντική και ενεργειακή ανάλυση ηλιακών θερμικών συστημάτων [21, 22, 23]. Οι Labordeie et al. [24] εστίασαν το ενδιαφέρον τους στις περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις καθόλο τον κύκλο ζωής ηλιακών συστημάτων που χρησιμοποιούνται σε οικιακές εφαρμογές. Επιπλέον οι Arpaoutakis et al. [25] προχώρησαν στην περιβαλλοντική και πειραματική μελέτη δύο διαφορετικών τύπων ηλιακών θερμικών συστημάτων για παραγωγή ζεστού νερού χρήσης. Οι Crawford et al. [26] μελέτησαν τις αέριες εκπομπές ηλιακών θερμικών συστημάτων για οικιακές εφαρμογέςκαθόλη τη διάρκεια της ζωής τους. Οι Rey et al. [27 ασχολήθηκαν με την AKZ ενός ηλιακού θερμικού συστήματος σε μια αγροτική κατοικία στην Ισπανία. Οι Tsiligiridis et al. [28, 30] μελέτησαν την περιβαλλοντική συμπεριφορά ηλιακών θερμικών συστημάτων κάτω από διαφορετικές κλιματολογικές συνθήκες στην Ελλάδα. Στην εργασία των Tsoutsos et al. [31] πραγματοποιήθηκε μια περιβαλλοντική μελέτη ηλιακών θερμοσιφώνων. Οι Carnevale et al. [32] ασχολήθηκαν με την AKZ ηλιακών συστημάτων θέρμανσης νερού. Οι Hang et al. [33] μελέτησαν την περιβαλλοντική και οικονομολογική συμπεριφορά ηλιακών θερμικών συστημάτων στην Αμερική. Οι Koroneos και Nanaki [34] πραγματοποίησαν μελέτη πάνω στην AKZ ηλιακών θερμικών συστημάτων.Οι Masguroh et al. [35] μελέτησαν την AKZ ηλιακών θερμοσιφώνων με χρήση θερμοχημικής μεθόδου απόθήκευσης του νερού ενώ οι Greening και Azaragic [36] διερεύνησαν τις περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις δύο διαφορετικών τύπων ηλιακών θερμικών συστημάτων. Τέλος οι Menzies και Roderick [37] πραγματοποίησαν την ενεργειακή και περιβαλλοντική ανάλυση ηλιακών θερμικών συστημάτων για οικιακές εφαρμογές.

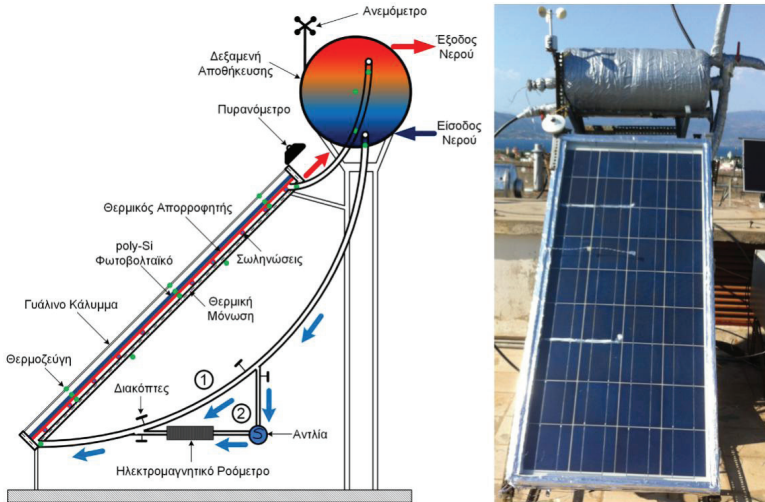
## 2.3. Περιβαλλοντική και ενεργειακή ανάλυση PV/T συστημάτων

Στην τρίτη ενότητα περιλαμβάνονται μελέτες που εξετάζουν συνδυαστικά την περιβαλλοντική και ενεργειακή συμπεριφορά υβριδικών PV/T ηλιακών συστημάτων. Δύο σημαντικές πρόσφατες εργασίες υπάρχουν στην κατηγορία αυτή. Η εργασία της Good [38], η οποία παρουσιάζει το σύνολο των μελετών πάνω στην περιβαλλοντική συμπεριφορά των PV/T συστημάτων καθώς και η μελέτη των Lamnatou και Chemisana [39], η οποία καθ' όμοιο τρόπο παρουσιάζει συνολικά τις μελέτες πάνω στην περιβαλλοντική συμπεριφορά PV/Τ συστημάτων. Εξίσου σημαντικές εργασίες στην κατηγορία αυτή είναι οι μελέτες των Tripanagnostopoulos et al. [40, 41] οι οποίοι παρουσίασαν αποτελέσματα AKZ για διαφορετικούς τύπους υβριδικώνPV/T συστημάτων. Οι Raman et al. [42] ασχολήθηκαν με την AKZ ενός PV/ΤΑσυλλέκτη κάτω από διαφορετικές κλιματολογικές συνθήκες στην Ινδία. Οι Kumar et al.[43] πραγματοποίησαν την AKZ ενός PV/T συστήματος ενώ οι Agrawal et al. [44, 45] ασχολήθηκαν με την περιβαλλοντική και οικονομική ανάλυση PV/T συστημάτων. Τέλος οι Chow et al.[46] μελέτησαν την ενεργειακή, οικονομική και περιβαλλοντική ανάλυση PV/T συστημάτων εγκατεστημένων στο Hong Kong.

## 3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ PV/T ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

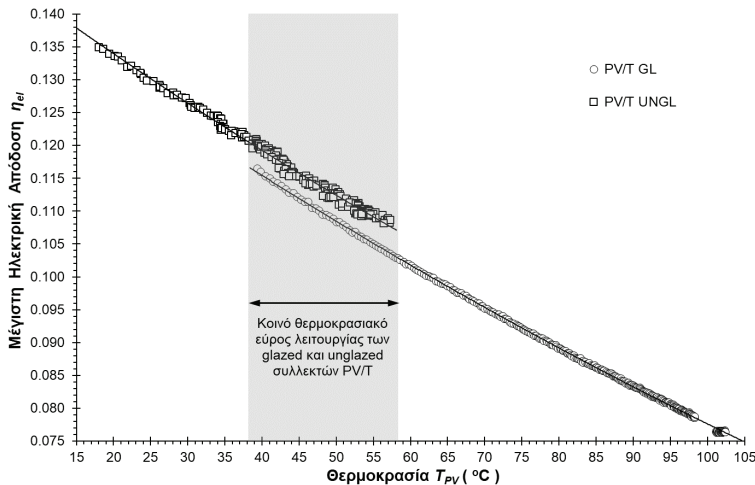
Τα συστήματα που μελετώνται στην παρούσα εργασία (εικόνα 1) περιλαμβάνουν ένα υβριδικό PV/T (Φωτοβολταϊκό – θερμικό) συλλέκτη συνδυασμένο με δεξαμενή αποθήκευσης νερού. Ο PV/T συλλέκτης αποτελείται από το PV πλαίσιο πολυκρυσταλλικού πυριτίου καθώς και το θερμικό εναλλάκτη νερού ο οποίος ενσωματώνεται στην πίσω πλευρά του, έχοντας συνολικές διαστάσεις 1490 x 670 x 46 mm. Το ρευστό απολαβής θερμότητας είναι νερό το οποίο κυκλοφορεί εντός των θερμικών σωλήνων για αποφυγή της επαφής του με την επιφάνεια του πλαισίου. Ο PV/Τσυλλέκτης είναι θερμικά μονωμένος παράπλευρα και στην πίσω πλευρά για μείωση των θερμικών απωλειών και συνδέεται στο πάνω μέρος με την δεξαμενή του νερού. Η όλη διάταξη λειτουργεί είτε με εξαναγκασμένη κυκλοφορία του νερού (χρήση αντλίας) είτε με φυσική κυκλοφορία του νερού (θερμοσιφωνική ροή).Λαμβάνοντας υπόψη την κυκλοφορία του νερού τα μοντέλα που μελετήθηκαν πειραματικά είναι: PVT 30Α(φυσική κυκλοφορία νερού, δεξαμενή 30.17 λίτρα), PVT 40Α (φυσική κυκλοφορία νερού, δεξαμενή 40.82 λίτρα), PVT 30Β(εξαναγκασμένη κυκλοφορία νερού, δεξαμενή 30.17 λίτρα) και PVT 40Β(εξαναγκασμένη κυκλοφορία νερού, δεξαμενή 30.17 λίτρα).Στην περίπτωση της φυσικής κυκλοφορίας νερού το θερμορευστό (νερό) μεταφέρεται θερμοσιφωνικά από το συλλέκτη στην δεξαμενή και αντίστροφα, ενώ στην περίπτωση της εξαναγκασμένης κυκλοφορίας το ρευστό

απολαβής μεταφέρεται με χρήση αντλίας. Αρχικά εξετάζεται η ηλεκτρική συμπεριφορά του PV/T συλλέκτη για διάφορες θερμοκρασίες του πλαισίου με στόχο την εξαγωγή των εξισώσεων που αποτυπώνουν τη μεταβολή της μέγιστης ηλεκτρικής απόδοσης του συστήματος συναρτήσει της θερμοκρασίας λειτουργίας του. Στη συνέχεια εξετάζεται η θερμική συμπεριφορά του συλλέκτη σε καταστάσεις θερμικής ισορροπίας (steady state) με στόχο τον καθορισμό την στιγμιαίας θερμικής απόδοσης του συστήματος και την αποτύπωση σε εξίσωση της μεταβολής της συναρτήσει των συνθηκών λειτουργίας. Ακολούθως μελετάται πειραματικά η συνδυασμένη διάταξη συλλέκτη και αποθήκη θερμότητας, για το σύνολο των τεσσάρων πειραματικών μοντέλων, όπου εξαγονται αντίστοιχα οι εξισώσεις που αποτυπώνουν τη μεταβολή της μέσης ημερησίας απόδοσής τους συναρτήσει των συνθηκών λειτουργίας.



Εικόνα 1: Σχέδιο του υπό μελέτη συστήματος (αριστερά) και η εγκατάσταση στο πεδίο δοκιμών (δεξιά).

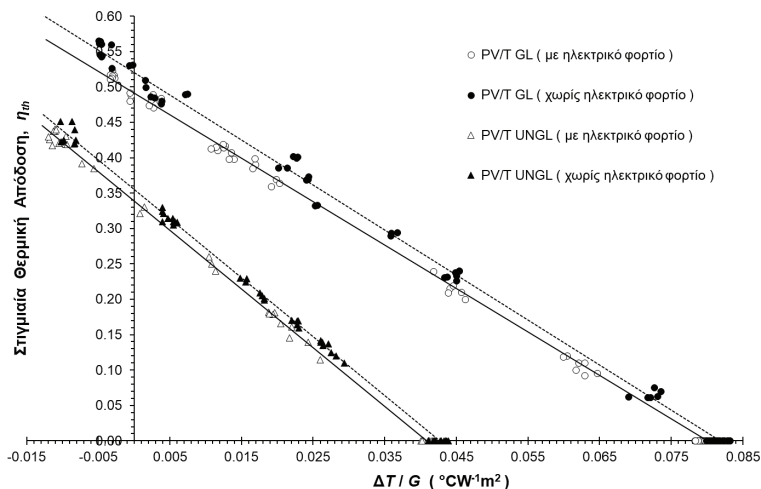
### 3.1. Πειραματική μελέτη και αποτελέσματα σε συνθήκες σταθερής κατάστασης



Εικόνα 2: Διαγράμματα μεταβολής της μέγιστης ηλεκτρικής απόδοσης,  $\eta_{el}$ , των συλλεκτών PV/T.

Τα πειράματα σε συνθήκες σταθερής κατάστασης (steady state) πραγματοποιήθηκαν σε εξωτερικό χώρο δοκιμών και τα αποτελέσματα καθόρισαν την ηλεκτρική και θερμική συμπεριφορά δύο τύπων

PV/T συλλέκτη. Ο πρώτος τύπος είναι συλλέκτης χωρίς επιπρόσθετο διαφανές κάλυμμα (PV/TUNGL) και ο δεύτερος συλλέκτης με επιπρόσθετο διαφανές κάλυμμα (PV/TGL). Το επιπρόσθετο διαφανές κάλυμμα είναι γυαλί πάχους 2 mm με χαμηλή περιεκτικότητα σε σίδηρο με συνολική διαπερατότητα  $\tau = 0.92$  (σε κάθετη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας). Αρχικά έγινε ο υπολογισμός της μέγιστης ηλεκτρικής απόδοσης  $\eta_{el}$ , της οποίας τα αποτελέσματα της διακύμανσής της παρουσιάζονται στην εικόνα 2. Σύμφωνα με το διάγραμμα αυτό η θερμοκρασία του PV πλαισίου επηρεάζει τις τιμές της μέγιστης ηλεκτρικής απόδοσης και των δύο μοντέλων. Παρατηρείται ένα κοινό θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας και για τα δύο μοντέλα στο οποίο το σύστημα χωρίς διαφανές κάλυμμα παρουσιάζει μεγαλύτερη ηλεκτρική απόδοση (εξαιτίας των υψηλότερων τιμών της συνολικής διαπερατότητας) σε σχέση με το σύστημα με το πρόσθετο διαφανές γυάλινο κάλυμμα.



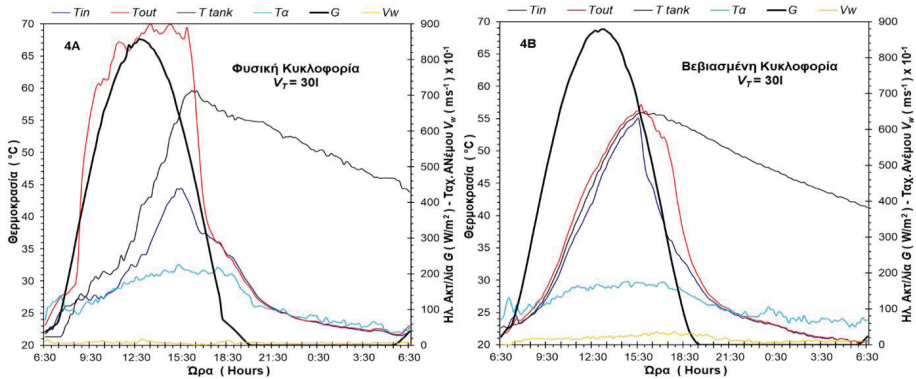
Εικόνα 3: Διάγραμματα μεταβολής της στιγμιαίας θερμικής απόδοσης,  $\eta_{th}$ , των συλλεκτών PV/T.

Το επόμενο βήμα στην πειραματική μελέτη των δύο παραπάνω τύπων PV/T συλλεκτών περιλαμβάνει τον υπολογισμό της στιγμιαίας θερμικής τους απόδοσης κάτω από διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας. Οι τιμές της θερμικής απόδοσης καθορίζονται από την πυκνότητα ηλιακής ισχύος, τη θερμοκρασία εισόδου του θερμορροιστού (νερό) και τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Οι δύο PV/T συλλέκτες εξετάστηκαν με την παρουσία ή χωρίς την παρουσία ηλεκτρικού φορτίου, με σκοπό τον υπολογισμό των αντίστοιχων στιγμιαίων θερμικών αποδόσεων. Η εικόνα 3 απεικονίζει τη μεταβολή της στιγμιαίας θερμικής απόδοσης των συλλεκτών PV/T σε σχέση με την παράμετρο λειτουργίας  $\Delta T/G$  ( $\Delta T/G = (T_{in} - T_a)/G$ ). Παρατηρείται ότι ο συλλέκτης PV/TGL παρουσιάζει υψηλότερες τιμές στιγμιαίας θερμικής απόδοσης σε σχέση με το συλλέκτη PV/TUNGL εξαιτίας των χαμηλότερων θερμικών απωλειών από μεταφορά της προσποστικής επιφάνειας του PV πλαισίου. Και για τους δύο τύπους PV/T συλλεκτών οι τιμές της στιγμιαίας θερμικής απόδοσης είναι χαμηλότερες όταν λειτουργούν με ηλεκτρικό φορτίο. Αυτό οφείλεται στη μετατροπή μέρους της προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική μέσω του PV πριν τη θερμική μετατροπή της. Για τη συγκριτική λειτουργία των δύο τύπων συλλεκτών PV/T εξασφαλίστηκε ότι η λειτουργία τους σε συνθήκες μέγιστης ηλεκτρικής απόδοσης (μέγιστη παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς).

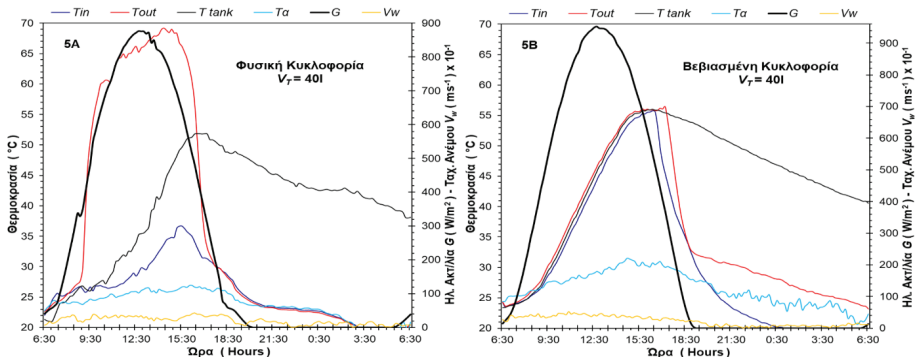
### 3.2. Πειραματική μελέτη και αποτελέσματα κατά τη διάρκεια της ημερήσιας λειτουργίας των συστημάτων.

Επόμενο βήμα είναι η πειραματική μελέτη του συνδυασμού ενός εκ των δύο υβριδικών συλλεκτών με δεξαμενές αποθήκευσης. Πραγματοποιήθηκε μελέτη του PV/TGL συλλέκτη με δεξαμενή νερού για ημερήσια λειτουργία κάνοντας χρήση είτε εξαναγκασμένης είτε φυσικής κυκλοφορίας ρευστού. Η επιλογή του συλλέκτη με το πρόσθετο διαφανές κάλυμμα κρίθηκε αναγκαία, καθώς οι θερμικές απώλειες είναι σαφώς χαμηλότερες. Στόχος αυτής της ενότητας είναι η πειραματική μελέτη και ο υπολογισμός της μέσης ημερήσιας απόδοσης των υπό μελέτη συσκευών καθώς επίσης και η διερεύνηση του κατά πόσο ο όγκος του αποθηκευμένου νερού επηρεάζει τη θερμοκρασιακή απόκρισή τους στη διάρκεια ημερήσιας λειτουργίας. Τέσσερα συστήματα εξετάστηκαν: PV/T 30A, PV/T 30B, PV/T 40A και PV/T 40B. Η διαφοροποίηση των συστημάτων έγκειται στο διαφορετικό όγκο της

δεξαμενής αποθήκευσης αλλά και στον τρόπο κυκλοφορίας του θερμορευστού (φυσική ή βεβιασμένη κυκλοφορία). Οι μεταβολή της μέσης θερμοκρασίας του νερού αποθήκευσης για τα τέσσερα αυτά συστήματα απεικονίζονται στις εικόνες 4 και 5 αντίστοιχα. Επιλέχθηκε αρχική θερμοκρασία του νερού αποθήκευσης η χαμηλότερη δυνατή προκειμένου να διαπιστωθούν σαφώς οι διαφορές στην αύξηση της θερμοκρασίας του νερού χρήσης στο πέρας της ημερήσιας λειτουργίας. Οι τιμές της μέσης ημερήσιας απόδοσης απεικονίζονται στην εικόνα 6. Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι το PV/T 40A σύστημα παρουσιάζει την καλύτερη απόδοση σε όλες τις συνθήκες λειτουργίας. Ακολουθεί το PV/T 40B ενώ τα PV/T 30A και PV/T 30B παρουσιάζουν μικρότερη μέση ημερήσια απόδοση για τις συνολικές συνθήκες λειτουργίας των υπό μελέτη συστημάτων. Επίσης είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι τα συστήματα με φυσική κυκλοφορία ρευστού συμπεριφέρονται καλύτερα σε σχέση με τα συστήματα εξαναγκασμένης κυκλοφορίας αναφορικά με την αύξηση της θερμοκρασίας του νερού (τελική θερμοκρασία).

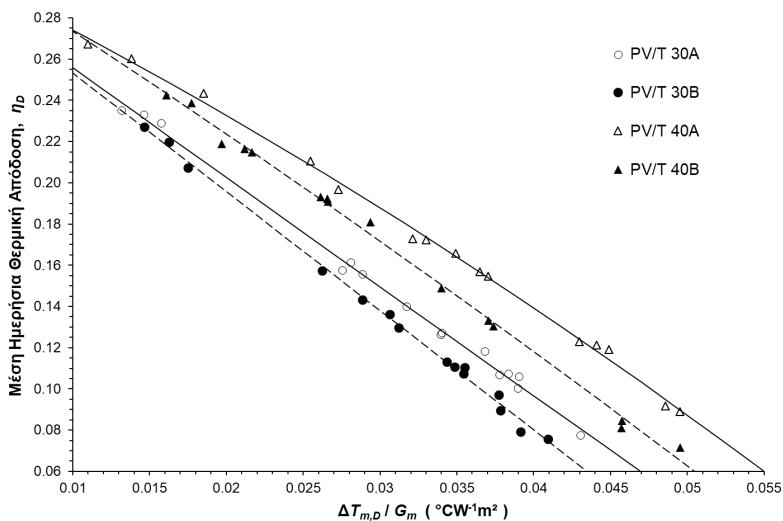


**Εικόνα 4:** Διαγράμματα μεταβολής της ημερήσιας θερμοκρασίας του νερού αποθήκευσης για τις συσκευές PV/T 30A και PV/T 30B.



**Εικόνα 5:** Διαγράμματα μεταβολής της ημερήσιας θερμοκρασίας του νερού αποθήκευσης για τις συσκευές PV/T 40A και PV/T 40B.

Από τα διαγράμματα 4 και 5 προκύπτει ότι και οι δύο συσκευές λειτουργούν αποτελεσματικά ενώ εντοπίζονται πολύ μικρές διαφορές. Επίσης πρέπει να επισημανθεί ότι όλα τα συστήματα μελετήθηκαν κατά την ίδια χρονική περίοδο (τέλος του Σεπτεμβρίου). Η εικόνα 6 παρουσιάζει το διάγραμμα της μέσης ημερήσιας απόδοσης των υπό μελέτη συσκευών. Παρατηρείται ότι υψηλότερη απόδοση επιτυγχάνει το σύστημα με φυσική κυκλοφορία νερού και δεξαμενή νερού 40 λίτρα, που ακολουθείται από το σύστημα με την ίδια δεξαμενή νερού αλλά με βεβιασμένη κυκλοφορία νερού. Τέλος η μικρότερη απόδοση επιδεικνύει το σύστημα με βεβιασμένη κυκλοφορία νερού και δεξαμενή νερού 30 λίτρα.



Εικόνα 6: Διάγραμμα της μέσης ημερήσιας απόδοσης,  $\eta_D$ , των συσκευιών PV/T 30A, 30B, 40A, 40B.

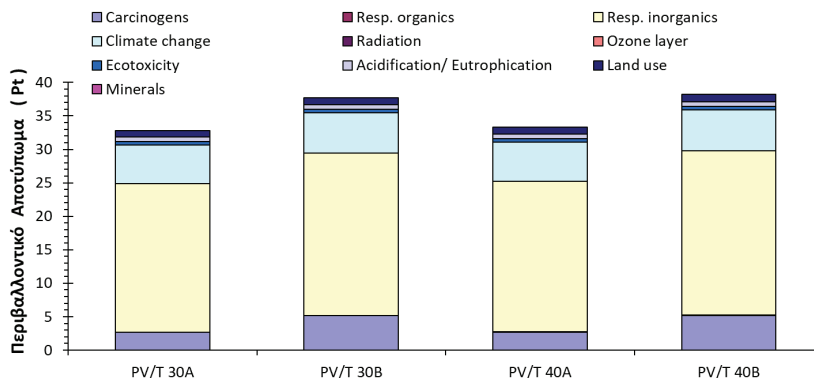
#### 4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ ΤΩΝ PV/T ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Πίνακας 1: Υλικά και μάζες για τα υπό μελέτη συστήματα				
Πλαίσιο (PV) & Θερμικός Απορροφητής (T) (0.99 m <sup>2</sup> )	Δοχεία Νερού (30.17 l) / (40.82 l)	Αντλία Νερού (μόνο για Βτύπο)	Σύστημα Στήριξης	Άλλα Εξαρτήματα
Υλικό (Μάζα, kg)	Υλικό (Μάζα, kg)	Υλικό (Μάζα, kg)	Υλικό (Μάζα, kg)	Υλικό (Μάζα, kg)
Γυαλί (12.38)	Γαλβανισμένη Λαμαρίνα (2.35/2.76)	Χαλκός (0.25)	Γαλβανισμένη Λαμαρίνα (7.15)	Πλαστικό (2.55)
Πυρίτιο (0.62)	Θερμική Μόνωση (1.03/1.23)	Ατσάλι (2.12)	---	Χαλκός (1.25)
Θερμική Μόνωση (0.38)	Νερό (30.17/40.82)	Πλαστικό (0.18)	---	Θερμική Μόνωση (0.97)
Χαλκός (7.05)	---	---	---	---
Νερό (1.85)	---	---	---	---
Μόνωση (1.73)	---	---	---	---
Αλουμίνιο (4.32)	---	---	---	---
Γαλβανισμένη Λαμαρίνα (2.33)	---	---	---	---
Σύνολο (30.6)	Σύνολο (33.55/44.8)	Σύνολο (2.55)	Σύνολο (7.15)	Σύνολο (4.77)

Τα βασικά τμήματα των δύο PV/T συστημάτων, συμπεριλαμβανομένων και των μαζών τους, παρουσιάζονται στον Πίνακα 1 και είναι: Το PV πλαίσιο, η επιφάνεια απορρόφησης με τους σωλήνες με το θερμορευστό (νερό), οι δεξαμενές νερού οι οποίες έχουν συνολική χωρητικότητα 30.17 και 40.82 λίτρα αντίστοιχα, η αντλία νερού και το σύστημα στήριξης. Το σημαντικότερο στάδιο στην παραγωγή των συστημάτων PV/Τ είναι η κατασκευή του πλαισίου πολυκρυσταλλικού πυριτίου (siliconwafers) το οποίο αποτελείται από τα ηλιακές κυψελίδες (solarcells) και το εξωτερικό πλαίσιο. Τα βασικά υλικά που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή του πολυκρυσταλλικού πλαισίου είναι: πυρίτιο, γυαλί και πολυαιθυλένιο. Περιληπτικά η διαδικασία κατασκευής υποδιαιρείται στα ακόλουθα στάδια: αρχικά οι ηλιακές κυψελίδες ελέγχονται για πιθανές αστοχίες μέσω κατάλληλων ηλεκτρικών μετρήσεων και οπτικής αναγνώρισης. Στην συνέχεια συνδέονται σε σειρές και επικαλύπτονται από ειδικό γυαλί υψηλής διαπερατότητας. Το επόμενο στάδιο είναι η μόνωση κάθε ηλιακής κυψελίδας η οποία επιτυγχάνεται με χρήση ενός στρώματος πολυαιθυλενίου, υπό συγκεκριμένη θερμοκρασία και πίεση. Στον ίδιο χρόνο γίνεται και η κατασκευή του εξωτερικού πλαισίου (από αλουμίνιο και γαλβανισμένο σίδηρο) και η κατασκευή ολοκληρώνεται με την τελική συναρμογή του πλαισίου. Στην εμπρόσθια πλευρά του πλαισίου τοποθετείται ένα γυάλινο διαφανές κάλυμμα πάχους 2 mm ενώ ο θερμοκός εναλλάκτης τοποθετείται στην οπίσθια πλευρά αποτελούμενη από δύο τμήματα, επιφάνεια απορρόφησης και τους σωλήνες μέσω των οποίων κυκλοφορεί το θερμορευστό. Και τα δύο αυτά τμήματα κατασκευάζονται από χαλκό. Στο τέλος τοποθετείται ένα στρώμα πολυουρεθάνης πάχους 5 cm μαζί με ένα φύλλο γαλβανισμένου σιδήρου στην οπίσθια πλευρά της επιφάνειας θερμικής απορρόφησης. Η δεξαμενή αποθήκευσης του νερού αποτελείται από ένα μεταλλικό κύλινδρο κατασκευασμένο από φύλλο γαλβανισμένου σιδήρου πάχους 0.5 mm στο οποίο δίνεται κυλινδρικό σχήμα. Η εξωτερική επιφάνεια του κυλίνδρου καλύπτεται από ένα στρώμα πολυουρεθάνης υψηλής πυκνότητας πάχους 5 cm που λειτουργεί ως θερμομονωτικό υλικό. Οι βαλβίδες που καθορίζουν την κυκλοφορία του θερμικού υγρού από και προς την δεξαμενή κατασκευάζονται από χάλυβα και χαλκό και συνδέονται στην συσκευή με χρήση μεταλλικών συνδέσμων. Το σύστημα στήριξης κατασκευάζεται από ράβδους γαλβανισμένου χάλυβα.

## 5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΙΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΒΑΡΥΝΣΕΙΣ ΣΤΟ ΣΤΑΔΙΟ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΚΑΙ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

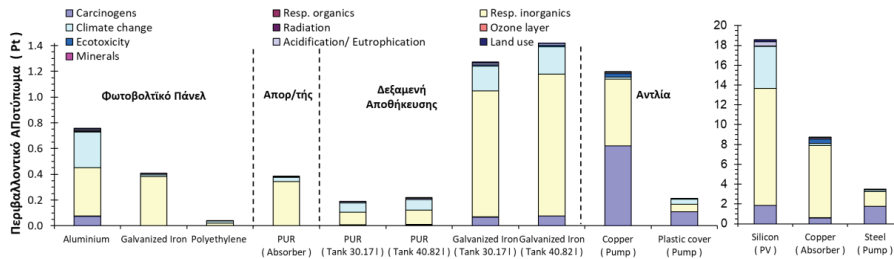
Οι περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις των υπό μελέτη συστημάτων για το συνολικό κύκλο ζωής τους παρουσιάζονται στην εικόνα 7.



**Εικόνα 7:** Συνολικές περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις στα στάδια κατασκευής και εγκατάστασης για όλα τα πειραματικά PV/T μοντέλα.

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται μεγαλύτερη περιβαλλοντική επιβάρυνση στο σύστημα βεβιασμένης κυκλοφορίας που φέρει δεξαμενή νερού 40.82 λίτρα (PV/T 40B) ενώ η μικρότερη περιβαλλοντική επιβάρυνση παρατηρείται στο σύστημα με φυσική κυκλοφορία του θερμικού υγρού και δεξαμενή νερού 30.17 λίτρα (PV/T 30A). Οι κατηγορίες με το μεγαλύτερο περιβαλλοντικό φορτίο είναι η κατηγορία των ανόργανων ουσιών, υπεύθυνων για βλάβες του αναπνευστικού (Respiratory inorganics) καθώς και η κατηγορία της κλιματικής αλλαγής (Climate change). Αναλυτική παρουσίαση

των υλικών κατασκευής και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων τους για κάθε τμήμα των PV/Τυστημάτων παρουσιάζεται στην εικόνα 8.

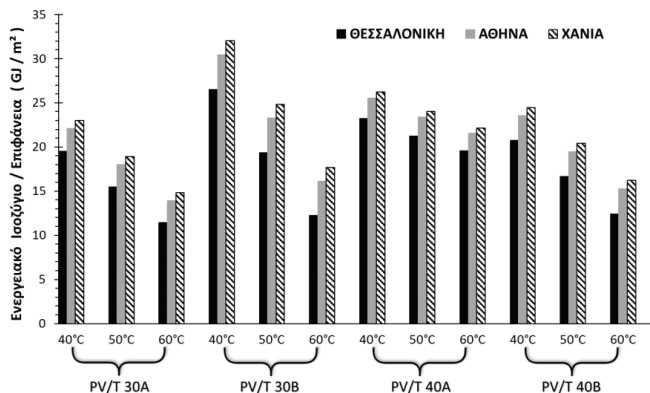


**Εικόνα 8:** Περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις των υλικών κατασκευής

Σύμφωνα με την εικόνα 8 το τμήμα με το μεγαλύτερο περιβαλλοντικό φορτίο είναι ο συλλέκτης (PV/T). Τα υλικά με το μεγαλύτερο περιβαλλοντικό φορτίο είναι το πυρίτιο και ακολούθει ο χαλκός. Για τη βιομηχανική παρασκευή των δίσκων πυρίτιου απαιτούνται μεγάλα ποσά ενέργειας και αυτό έχει ως συνέπεια την αύξηση του αντίστοιχου περιβαλλοντικού φορτίου κατά το στάδιο αυτό. Επιπλέον, η εισπνοή σκόνης κατά την επεξεργασία του χαλκού επιβαρύνει τους πνεύμονες (Respiratory in organics) με αποτέλεσμα την εμφάνιση αναπνευστικών προβλημάτων. Τα συγκεκριμένα υλικά επιβαρύνουν επίσης σημαντικά και την κατηγορία της κλιματικής αλλαγής. Η αντλία νερού παρά το μικρό της μέγεθος παρουσιάζει σημαντικό περιβαλλοντικό φορτίο κυρίως λόγω του περιεχόμενου χαλκού το οποίο διαμοιράζεται στις κατηγορίες των ανόργανων ουσιών που βλάπτουν το αναπνευστικό (Respiratory in organics) και της κλιματικής αλλαγής (Climate change). Ο γαλβανισμένος χάλυβας στις δεξαμενές παρουσιάζει λιγότερες περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις που κατανέμονται κυρίως στις ίδιες κατηγορίες επιπτώσεων με τον συλλέκτη και με παρόμοια σειρά περιβαλλοντικού φορτίου. Τα υπόλοιπα υλικά παρουσιάζουν πολύ μικρό περιβαλλοντικό φορτίο.

## 6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΚΑΤΑ ΤΑ ΣΤΑΔΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ, ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ PV/T ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Το ενεργειακό ισοζύγιο στα στάδια κατασκευής, εγκατάστασης και λειτουργίας των PV/Τυστημάτων παρουσιάζεται στην εικόνα 9. Για τον υπολογισμό της παραγόμενης θερμικής ενέργειας καθορίστηκε η θερμοκρασία του αποθηκευμένου νερού στις δεξαμενές στις τιμές 40, 50 ή 60 °C, σύμφωνα με τα γενικά πρότυπα θερμοκρασίας νερού για οικιακές εφαρμογές. Χρησιμοποιήθηκαν κλιματολογικές συνθήκες συγκεκριμένων γεωγραφικών περιοχών (Χανιά – Νότια Ελλάδα, Αθήνα – Κεντρική Ελλάδα, Θεσσαλονίκη – Βόρεια Ελλάδα), ενώ ως διάρκεια λειτουργίας των συστημάτων θεωρήθηκαν τα 10 χρόνια (όπως και στην μελέτη της ΑΚΖ).



**Εικόνα 9:** Ενεργειακό ισοζύγιο κατά τη διάρκεια της παραγωγής, εγκατάστασης και φάσης λειτουργίας των υπό μελέτη συστημάτων ανά επιφάνεια εγκατάστασης για τις τρεις Ελληνικές πόλεις.

## 7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία παρουσιάστηκε μια λεπτομερή πειραματική μελέτη και μια πλήρης περιβαλλοντική ανάλυση για ολόκληρο τον κύκλο ζωής τεσσάρων υβριδικών PV/T συστημάτων εγκατεστημένων στον Ελλαδικό χώρο. Μελετήθηκε η ηλεκτρική και θερμική συμπεριφορά των συστημάτων αυτών σε εικοσιπεντάωρη βάση και υπό διαφορετικές κλιματολογικές συνθήκες. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν συστήματα με ή χωρίς επιπρόσθετο διαφανές κάλυμμα, σε συνδυασμό με τον υπολογισμό της θερμικής τους απόδοσης με ή χωρίς ηλεκτρικό φορτίο. Καθορίστηκαν παράμετροι όπως η μέγιστη ηλεκτρική απόδοση, η θερμική απόδοση και η μέση ημερήσια απόδοση των συστημάτων αυτών, ενώ το περιβαλλοντικό φορτίο υπολογίστηκε με την μέθοδο της ΑΚΖ. Η ενεργειακή ανάλυση έδειξε ότι τα υπό μελέτη συστήματα παρουσιάζουν μεγαλύτερη απόδοση με χρήση φυσικής κυκλοφορίας νερού και δεξαμενές νερού μεγαλύτερης χωρητικότητας. Επιπλέον οι συσκευές αυτές δίνουν μέγιστο ενεργειακό κέρδος όταν η επιθυμητή θερμοκρασία του αποθηκευμένου νερού είναι η μικρότερη και όταν είναι εγκαταστημένες σε νοτιότερες περιοχές. Το μεγάλο ενεργειακό και περιβαλλοντικό φορτίο στα στάδια κατασκευής και εγκατάστασης οφείλεται στις διαδικασίες κατασκευής των PVπλαισίων. Επιπλέον, η εκτεταμένη χρήση κραμάτων χάλυβα κατά την κατασκευή της δεξαμενής του νερού και των τμημάτων της αντλίας νερού αυξάνει το περιβαλλοντικό φορτίο των συγκεκριμένων τμημάτων του PV/Τσυστήματος.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ο Δρ. Σουλιώτης ευχαριστεί τη Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ) για την οικονομική στήριξη στα πλαίσια της Επώνυμης Έδρας ΔΕΗ με γνωστικό αντικείμενο: «Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και Διαχείριση Ενεργειακών Πόρων».

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Zondag, H., A. "Flat-plate PV-Thermal collectors and systems:A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12 (2005): 891-959.
- [2] Kalogirou, S.,A, and Y. Tripanagnostopoulos. "Hybrid PV/T solar systems for domestic hot water and electricity production." *Energy Conversion and Management* 47 (2006): 3368-3382.
- [3] Vokas, G., N. Christandonis, and F. Skittides. "Hybrid photovoltaic–thermal systems for domestic heating and cooling—A theoretical approach." *Solar Energy* 80 (2005): 607-615.
- [4] Tripanagnostopoulos, Y., Th. Nousia, M.. Souliotis, and P. Yianoulis. "HYBRID PHOTOVOLTAIC/THERMAL SOLAR SYSTEMS." *Solar Energy* 72 (2002): 217-234.
- [5] Brummelen, Mv, BCWV Engelenburg, and E Nieuwlaar. *Methodology for the Life Cycle Assessment of energy technologies*. Utrecht: Department of Science, Technology and Society of the Utrecht University, 1994.
- [6] Ardente, Fulvio, Giorgio Beccali, Maurizio Cellura, and VallerioLoBranco. "Life cycle assessment of a solar thermal collector." *Renewable Energy* 30 (2005): 1031-1054.
- [7] Kalogirou, S.A., and Tripanagnostopoulos Y. "Industrial application of PV/T solar energy systems." *Applied Thermal Engineering* 27 (2007): 1259-1270.
- [8] ISO. "ISO 14040." ISO. September 1, 2006.
- [9] Pre Consultants. "SimaPro Software and Sustainability Consulting." Pre. 2015.
- [10] Ecoinvent. "ecoinvent version 3." Ecoinvent centre. November 30, 2015. <http://www.ecoinvent.org/> (accessed December 7, 2015).
- [11] ISO. "ISO 14042." ISO. 2006.
- [12] Goedkoop, M, and R Spriensma. *The Eco-indicator 99-A damage oriented method for life cycle impact assessment- methodology*. 2001. [www.pre.nl](http://www.pre.nl) (accessed 2008).
- [13] Fthenakis, V M, and H C Kim. "Photovoltaics: Life-cycle analyses." *Solar Energy* 85 (2010): 1609-1628.

- [14] Gallardo, Jorge, Paul, Perez, Stephan Astier, Catherine Azzaro-pantel, Luc Pibouleau, and Serge Domenech. "Multiobjective optimization of Large Scale Photovoltaic (PV) Systems Design: Technico-Economic and Life-Cycle Assessment considerations." *Chemical Engineering Transactions* 25 (2011): 483-488.
- [15] Marimuthu, C, and V Kirubakaran. "Carbon pay back period for solar and wind energy project installed in India: A critical review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 23 (2013): 80-90.
- [16] Zhong, Z., W., B. Song, and M., B., M. Zaki. "Life-cycle assessment of flash pyrolysis of wood waste." *Journal of Cleaner Production* 18 (2010): 1177-1183.
- [17] Tremeac, Brice, and Francis Meunier. "Life cycle analysis of 4.5 MW and 250 W wind turbines." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (2009): 2104-2110.
- [18] Guezuraga, Begona, Rudolf Zauner, and Werner Polz. "Life cycle assessment of two different 2 MW class wind turbines." *Renewable Energy* 37 (2012): 37-44.
- [19] Ardente, Fulvio, Giorgio Beccali, Maurizio Cellura, and VallerioLoBranco. "Life cycle assessment of a solar thermal collector: sensitivity analysis, energy and environmental balances." *Renewable Energy* 30 (2005): 109-130.
- [20] Battisti, Riccardo, and Annalisa Corrado. "Environmental assessment of solar thermal collectors with integrated water storage." *Journal of Cleaner Production* 13 (2005): 1295-1300.
- [21] Kalogirou, S. "Environmental benefits of domestic solar energy systems." *Energy Conversion and Management* 45 (2004): 3075-3092.
- [22] Kalogirou, S. PERFORMANCE AND ENVIRONMENTAL LIFE CYCLE ANALYSIS OF THERMOSYPHON SOLAR WATER HEATERS. Nicosia, Cyprus: Higher Technical Institute, 2004.
- [23] Kalogirou, S.A. "Solar thermal collectors and applications." *Progress in Energy and Combustion Science* 30 (2004): 231-295.
- [24] DeLaborderie, Alexis, et al. "Environmental Impacts of Solar Thermal Systems with Life Cycle Assessment." *World Renewable Energy Congress*, 2011.
- [25] Arnaoutakis, N, M. Souliotis, and S. Papaefthimiou. "Comparative experimental Life Cycle Assessment of two commercial solar thermal devices for domestic applications." *Renewable Energy* 111 (2017): 187-200.
- [26] Crawford, RH, GJBdTreloar, and PED Love. "Comparative greenhouse emissions analysis of domestic solar hot water systems." *Building Research & Information* 31 (2003): 34-47.
- [27] Rey, FJ, E Velasco, J Martin-Gill, LM Navas-Garcia, and Navarro-S Hernandez. "Life cycle analysis of a thermal solar installation at a rural house in Valladolid(Spain)." *Environmental Engineering Science* 25 (2008): 713-724.
- [28] Tsilingiridis, G, G Martinopoulos, and N Kyriakis. "Environmental performance of thermosiphon domestic solar hot water system under different climatic conditions: a case study for Greece." *GNEST* 6 (2004): 183-195.
- [29] Martinopoulos, G, G Tsilingiridis, and N Kyriakis. "Three eco-tool comparison with the example of the environmental performance of domestic solar flat plate hot water systems." *GNEST* 9 (2007): 174-181.
- [30] Martinopoulos, G., G. Tsilingiridis, and N. Kyriakis. "Identification of the environmental impact from the use of different materials in domestic solar hot water systems." *Applied Energy* 102 (2013): 545-555.
- [31] Tsoutsos, Theocharis, NikiFrantzeskaki, and Vassilis Gekas. "Environmental impacts from the solar energy technologies." *Energy policy* 33 (2005): 289-296.
- [32] Carnevale, E., L. Lombardi, and L. Zanchi. "Life Cycle Assessment of solar energy systems: Comparison of photovoltaic and water thermal heater at domestic scale." *Energy* 77 (2014): 434-446.

- [33] Hang, Yin, Ming Qu, and Fu Zhao. "Economic and environmental life cycle analysis of solar hot water systems in the United States." *Energy and Buildings* 45 (2012): 181-188.
- [34] Koroneos, Christopher, J., and Evanthia, A. Nanaki. "Life cycle environmental impact assessment of a solar water heater." *Journal of Cleaner Production* 37 (2012): 154-161.
- [35] Masruroh, Nur, Aini, Bo Li, and Jiri Klemes. "Life cycle analysis of a solar thermal system with thermochemical storage process." *Renewable Energy* 31 (2006): 537-548.
- [36] Greening, Benjamin, and AdisaAzapagic. "Domestic solar thermal water heating: A sustainable option for the UK?" *Renewable Energy* 63 (2014): 23-36.
- [37] Menzies, G., F., and Y. Roderick. "Energy and carbon impact analysis of a solar thermal collector system." *International Journal of Sustainable Engineering*, 2009: 1-8.
- [38] Good, Clara. "Environmental impact assessments of hybrid photovoltaic-thermal (PV/T) systems – A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 55 (2016): 234-239.
- [39] Lamnatou, Chr., G. Notton, and C. Cristofari. "Life cycle analysis of a building - integrated solar thermal collector, based on embodied energy and embodied carbon methodologies." *Energy and Buildings* 84 (2014): 378-387.
- [40] Tripanagnostopoulos, Y., M. Souliotis, R. Battisti, and A. Corrado. "Energy, Cost and LCA Results of PV and Hybrid PV/T Solar Systems." *PROGRESS IN PHOTOVOLTAICS: RESEARCH AND APPLICATIONS* 13 (2005): 235-250.
- [41] Tripanagnostopoulos, Y., M. Souliotis, R. Battisti, and A. Corrado. "Performance, Cost and Life-cycle Assessment Study of Hybrid PVT/AIR Solar Systems." *PROGRESS IN PHOTOVOLTAICS: RESEARCH AND APPLICATIONS* 14 (2006): 65-76.
- [42] Raman, Vivek, and G.N Tiwari. "Life cycle cost analysis of HPVT air collector under different Indian climatic conditions." *Energy Policy* 36 (2008): 603-611.
- [43] Kumar, Shiv, and G.N. Tiwari. "Life cycle cost analysis of single slope hybrid (PV/T) active solar still." *Applied Energy* 86 (2009): 1995-2004.
- [44] Agrawal, Basant, and G.N. Tiwari. "Life cycle cost assessment of building integrated photovoltaic thermal (BIPVT) systems." *Energy and Buildings* 42 (2010): 1472-1481.
- [45] Agrawal, Sanjay, and G.N. Tiwari. "Enviroeconomic analysis and energy matrices of glazed hybrid photovoltaic thermal module air collector." *Solar Energy* 92 (2013): 139-146.
- [46] Chow, Tin-Tai, and Jie Ji. "Environmental Life-Cycle Analysis of Hybrid Solar Photovoltaic/Thermal Systems for Use in Hong Kong." *International Journal of Photoenergy*, 2012: 9.

## ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ ΣΤΗΝ ΥΠΟΒΑΘΜΙΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΦΩΤΟΕΥΑΙΣΘΗΤΩΝ ΗΛΙΑΚΩΝ ΚΥΤΤΑΡΩΝ ΜΕ ΧΡΩΣΤΙΚΗ ΟΥΣΙΑ

**Δ.Α. Χαλκιάς\*, Δ.Δ. Λοΐζος, Γ.Χ. Παπανικολάου**

Τμήμα Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών  
e-mail: chalkias@mech.upatras.gr

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα φωτοευαίσθητα ηλιακά κύτταρα με χρωστική ουσία (Dye Sensitized Solar Cells, DSSCs) έχουν προσελκύσει μεγάλο ενδιαφέρον στις μέρες μας, τόσο ερευνητικά όσο και στην αγορά των φωτοβολταϊκών. Η συγκεκριμένη τεχνολογία ηλιακών κυττάρων αποτελεί μια χαμηλού κόστους εναλλακτική λύση στα συμβατικά ηλιακά κύτταρα κρυσταλλικού πυριτίου, προσφέροντας ταυτόχρονα μοναδικά πλεονεκτήματα. Η μακροχρόνια σταθερότητα των DSSCs εξακολουθεί να αποτελεί ανοικτό ζήτημα που πρέπει να αντιμετωπιστεί, με σκοπό την ευρεία εμπορευματοποίησή τους. Η παρούσα εργασία αποτελεί μια συστηματική μελέτη της σταθερότητας των DSSCs υπό την επίδραση των κυριότερων περιβαλλοντικών παραγόντων, που οδηγούν στην υποβάθμιση της απόδοσής τους. Πειράματα επιταχυνόμενης γήρανσης διεξήχθησαν σε DSSCs, τα οποία κατασκευάστηκαν στο εργαστήριο, με τη χρήση επι το πλείστον εμπορικά διαθέσιμων υλικών, παρασκευασμένων για τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Οι συνθήκες επιταχυνόμενης γήρανσης που μελετήθηκαν αφορούσαν σε σταθερή υψηλή και χαμηλή θερμοκρασία, απότομες θερμοκρασιακές μεταβολές, σταθερή υψηλή θερμοκρασία και υγρασία, καθώς και ανάστροφη πόλωση των ηλιακών κυττάρων, προσομοιώνοντας συνθήκες μερικής σκίασης φωτοβολταϊκών μονάδων. Σε κάθε περίπτωση η απόδοση των ηλιακών κυττάρων προσδιοριζόταν σε συνθήκες πολύ κοντά στις πρότυπες συνθήκες δοκιμής (ένταση ακτινοβολίας  $1000 \text{ W/m}^2$  και θερμοκρασία περιβάλλοντος  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Στα πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάζεται η μεταβολή της απόδοσης, του ρεύματος βραχυκύκλωσης, της τάσης ανοιχτού κυκλώματος και του παράγοντα πλήρωσης για κάθε πείραμα επιταχυνόμενης γήρανσης. Η εφαρμογή ενός αναλυτικού μοντέλου ισοδύναμου κυκλώματος μονής διόδου στις πειραματικές καμπύλες ρεύματος-τάσης συνέβαλε στην περαιτέρω κατανόηση των μηχανισμών που οδηγούν στην υποβάθμιση της απόδοσης των DSSCs. Ο προσδιορισμός της μεταβολής του παραγομένου φωτορεύματος, του συντελεστή ιδανικότητας, του ρεύματος σκότους και των εσωτερικών παρασιτικών αντιστάσεων των ηλιακών κυττάρων καταδεικνύει μεταβολές τόσο στις ιδιότητες των συνιστωσών υλικών όσο και των διεπιφανειών που αναπτύσσονται στην όλη δομή των DSSCs. Από τη μελέτη συμπεραίνεται ότι η υγρασία σε συνδυασμό με την υψηλή θερμοκρασία αποτελεί το σημαντικότερο περιβαλλοντικό παράγοντα που οδηγεί στην υποβάθμιση της απόδοσης των DSSCs. Σε όλες τις περιπτώσεις των πειραμάτων επιταχυνόμενης γήρανσης, η σταθερότητα των ηλιακών κυττάρων έδειξε να εξαρτάται έντονα από φαινόμενα εκρόφησης της συμβατικής υδροφιλικής χρωστικής ουσίας (N719) από τον ημιαγωγό της ανόδου.

**Λέξεις Κλειδιά:** Φωτοευαίσθητα ηλιακά κύτταρα με χρωστική ουσία, Σταθερότητα, Υποβάθμιση, Επιταχυνόμενη γήρανση, Περιβαλλοντικοί παράγοντες

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα φωτοβολταϊκά αποτελούν αδιαμφισβήτητα μία από τις σημαντικότερες πηγές βιώσιμης και χωρίς εκπομπές άνθρακα ενέργειας, καθιστώντας τα ως μία από τις σημαντικότερες ελπίδες του ανθρώπου για την κάλυψη των ολοένα αυξανόμενων ενεργειακών αναγκών του [1, 2]. Η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική μέσω των φωτοβολταϊκών συστημάτων έχει μελετηθεί συστηματικά τις τελευταίες δεκαετίες [3]. Το κόστος ανά μονάδα παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος από τα ηλιακά κύτταρα κρυσταλλικού πυριτίου, τα οποία αποτελούν και την πιο διαδεδομένη τεχνολογία φωτοβολταϊκών, έχει μειωθεί πλέον σημαντικά. Παρόλα αυτά, οι συσκευές αυτές εξακολουθούν να είναι αρκετά δαπανηρές σε πολλές εκ των περιπτώσεων για να ανταγωνίζονται το συμβατικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, χωρίς η εγκατάστασή τους να επωφελείται από κρατικές επιδοτήσεις [1]. Επίσης, οι εφαρμογές της προαναφερθείσας τεχνολογίας φωτοβολταϊκών είναι περιορισμένες, καθώς τα ηλιακά κύτταρα κρυσταλλικού πυριτίου χαρακτηρίζονται από ψαθυρότητα, ακαμψία, ενώ τα περιθώρια τροποποίησης του βασικού σχεδιασμού τους είναι περιορισμένα.

Στο πλαίσιο της επίτευξης χαμηλού κόστους, αποτελεσματικής και χωρίς εκπομπές άνθρακα ενέργειας, τα φωτο-ευαίσθητα ηλιακά κύτταρα με χρωστική ουσία (Dye Sensitized Solar Cells, DSSCs) έχουν προσελκύσει την προσοχή πολλών ερευνητών στις μέρες μας [4]. Η πρώτη αναφορά σε υψηλής απόδοσης DSSC χρονολογείται από το 1991, από τους Brian O' Regan και Michael Grätzel [5]. Έκτοτε, πολλές ερευνητικές προσπάθειες έχουν γίνει και γίνονται στην κατεύθυνση της αύξησης της αποδοτικότητας, της αξιοπιστίας και του χρόνου ζωής τους, καθώς και της περαιτέρω μείωσης του κόστους τους [6]. Η σταθερότητα που επιδεικνύουν τα DSSCs κατά τη λειτουργία τους στο χρόνο αποτελεί, όπως και σε όλες τις αναπτυσσόμενες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών, ένα από τα βασικότερα κριτήρια για την ευρεία εμπορευματοποίησή τους. Παρόλα αυτά, ο προσδιορισμός του χρόνου ζωής τους δεν είναι εύκολος, καθώς η υποβάθμιση της απόδοσής τους κατά τη λειτουργία τους συναρτάται από πολλούς, εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, οι οποίοι μπορεί να δρουν και ταυτόχρονα [7]. Τα πειράματα επιταχυνόμενης γήρανσης βοηθούν στην εκτίμηση της συμπεριφοράς των ηλιακών κυττάρων υπό συγκεκριμένες συνθήκες κατά τον χρόνο λειτουργίας τους. Εντούτοις, τα πειραματικά αποτελέσματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο για τη μελετώμενη φωτοβολταϊκή τεχνολογία, καθώς διαφορετικοί τύποι ηλιακών κυττάρων παρουσιάζουν διαφορετικούς μηχανισμούς υποβάθμισης [7]. Η θέσπιση νέων πρωτοκόλλων για τον προσδιορισμό της σταθερότητας των DSSCs απαιτεί τη γνώση των λόγων υποβάθμισης των υλικών καθώς και των διεπιφανειών που αναπτύσσονται στη δομή τους. Επίσης, η κατανόηση των μηχανισμών υποβάθμισης είναι απαραίτητη, με σκοπό την ανάπτυξη νέων υλικών που θα ενσωματωθούν στα ηλιακά αυτά κύτταρα και που θα επιδεικνύουν τις επιθυμητές ιδιότητες.

Για τη θέσπιση τυπικών πειραμάτων που αφορούν στη σταθερότητα των DSSCs πρέπει να προσδιοριστεί η εφαρμογή για την οποία αυτά προορίζονται καθώς και να καθοριστούν οι στόχοι. Συγκεκριμένα, θα πρέπει να καθοριστούν πρώτα οι προβλεπόμενες συνθήκες λειτουργίας, καθώς και η ανοχή στη μείωση της απόδοσης των ηλιακών κυττάρων. Ένα άλλο σημαντικό ερώτημα είναι εάν η απόδοση ενεργειακής μετατροπής από μόνη της μπορεί να καθοριστεί ως κριτήριο αξιολόγησης ή θα πρέπει να εξεταστούν όλα τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των ηλιακών κυττάρων. Τα πιο συνηθισμένα πειράματα επιταχυνόμενης γήρανσης που διεξάγονται στα DSSCs από ερευνητές αφορούν στη συνεχή υψηλή ακτινοβολία των ηλιακών κυττάρων με φως που προσομοιώνει την ηλιακή ακτινοβολία, παραμονή των ηλιακών κυττάρων σε συνθήκες σταθερής υψηλής θερμοκρασίας, υψηλής υγρασίας, απότομων θερμοκρασιακών μεταβολών ή συνδυασμός των παραπάνω [7-9]. Συνήθως, η διάρκεια των πειραμάτων αυτών αφορά σε 1000 ώρες, με τα διαστήματα μετρήσεων να ορίζονται περίπου στις 100 ή 200 ώρες. Η μέγιστη αποδεκτή μείωση της απόδοσης ενεργειακής μετατροπής των ηλιακών κυττάρων μετά το πέρας της επιταχυνόμενης γήρανσης προσδιορίζεται στο 20%. Συνήθως, ο μέγιστος ρυθμός υποβάθμισης, λόγω επιταχυνόμενης γήρανσης, παρατηρείται κατά τα αρχικά στάδια του πειράματος. Σήμερα, η τεχνολογία των DSSCs, κυρίως στην πρότυπη μορφή τους, ικανοποιεί τα κριτήρια εμπορευματοποίησής τους για συγκεκριμένες εφαρμογές, ενώ πολλές ερευνητικές προσπάθειες στην κατεύθυνση της περαιτέρω αύξησης της σταθερότητάς τους με τη χρήση νέων υλικών καταλήγουν σε ελπιδοφόρα αποτελέσματα [6, 10]. Ο επιστημονικός κλάδος που αφορά σε θέματα σταθερότητας των DSSCs χρήζει περαιτέρω έρευνας, με σκοπό την ανάπτυξη νέων ηλιακών κυττάρων, που βασίζονται στον πρότυπο σχεδιασμό των DSSCs, τα οποία θα ανοίξουν το δρόμο για νέες, πρωτοπόρες εφαρμογές φωτοβολταϊκών.

Η παρούσα εργασία αποτελεί μία συστηματική μελέτη με σκοπό τον προσδιορισμό της σταθερότητας που επιδεικνύουν ηλιακά κύτταρα τύπου DSSC, τα οποία κατασκευάστηκαν στο εργαστήριο με χρήση

εμπορικά διαθέσιμων πρώτων υλών, υπό διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες. Οι συνθήκες επιταχυνόμενης γήρανσης που μελετήθηκαν αφορούν σε σταθερή υψηλή και χαμηλή θερμοκρασία, απότομες θερμοκρασιακές μεταβολές, σταθερή υψηλή θερμοκρασία και υγρασία, καθώς και ανάστροφη πόλωση των ηλιακών κυττάρων, προσομοιώνοντας συνθήκες μερικής σκίασης φωτοβολταϊκών μονάδων. Στα πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάζεται ο μέσος όρος και η τυπική απόκλιση της μεταβολής όλων των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των ηλιακών κυττάρων για κάθε πείραμα επιταχυνόμενης γήρανσης. Ο υπολογισμός σημαντικών συντελεστών που χαρακτηρίζουν τα ηλιακά κύτταρα κατά τη λειτουργία τους, μέσω της εφαρμογής του αναλυτικού μοντέλου ισοδύναμου κυκλώματος μονής διόδου στις πειραματικές καμπύλες ρεύματος-τάσης, συνέβαλε στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων, καταδεικνύοντας τους μηχανισμούς που οδηγούν στην υποβάθμιση της απόδοσης των DSSCs σε κάθε περίπτωση.

## 2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

### 2.1. Κατασκευή των φωτο-ευαίσθητων ηλιακών κυττάρων με χρωστική ουσία

#### 2.1.1. Κατασκευή της φωτο-ανόδου

Για την κατασκευή των ηλεκτροδίων που θα αποτελέσουν την άνοδο των DSSCs χρησιμοποιήθηκαν άκαμπτα γυάλινα υποστρώματα, τεχνολογίας Fluorine doped Tin Oxide (FTO), κατηγορίας Tec 8 κατασκευασμένα από soda-lime τύπο γυαλιού. Η συγκεκριμένη τεχνολογία παρουσιάζει επιφανειακή αντίσταση μόλις 8 Ω/sq και χαρακτηρίζεται από μεγάλη διαπερατότητα. Τα υποστρώματα κόπηκαν από μεγάλες πλάκες πάχους 2.2 mm σε διαστάσεις μήκους 3 cm και πλάτους 2 cm, ώστε να εξυπηρετούν την παρούσα μελέτη. Ο καθαρισμός τους έγινε με τη χρήση αιθανόλης προκειμένου να απομακρυνθούν σκόνης και υπολείμματα άλλων ουσιών από το περιβάλλον. Στην αγώγιμη επιφάνεια τους επιστρώθηκε ο ημιαγωγός της ανόδου.

Η κατασκευή του ημιαγωγού της ανόδου πραγματοποιήθηκε με τη χρήση πάστας διοξειδίου του τιτανίου (TiO<sub>2</sub>). Η σκόνη νανοκλίμακας TiO<sub>2</sub> που χρησιμοποιήθηκε ως πρόδρομο υλικό είχε μέσο μέγεθος σωματιδίων 21 nm και σύσταση 80% σε ανατάση και 20% σε ρουτίλιο. Οι υψηλές αποδόσεις που επιτυγχάνονται στα DSSCs με άνοδο TiO<sub>2</sub> σε σύγκριση με άλλους ημιαγωγούς, καθώς και η ευρεία διαθεσιμότητά του αποτέλεσαν τους κυριότερους παράγοντες για αυτήν την επιλογή. Η χρήση νανοσωματιδίων βασίζεται στη επιθυμία ανάπτυξης ενός ημιαγωγού με υψηλό μεσοπορώδες και ειδική επιφάνεια, χαρακτηριστικά απαραίτητα για την ανάπτυξη υψηλής απόδοσης DSSCs. Αναλυτικά η διαδικασία παρασκευής της πάστας TiO<sub>2</sub> περιγράφεται σε προηγούμενη μελέτη [11].

Για την αποτελεσματική εναπόθεση της πάστας TiO<sub>2</sub> στο αγώγιμο υπόστρωμα και την κατασκευή ενός λεπτού υμενίου, χρησιμοποιήθηκε η τεχνική του spin-coating. Αρχικά, στα υποστρώματα είχε προκαθοριστεί η επιφάνεια επιστρώσεως με τη βοήθεια αυτοκόλλητων ταινιών, σχηματίζοντας επιφάνεια τετραγωνικής διατομής, εμβαδού 0.25 cm<sup>2</sup>. Μικρή ποσότητα πάστας TiO<sub>2</sub> τοποθετήθηκε στο κέντρο της επιφάνειας, στη συνέχεια απλώθηκε με περιστροφή του υποστρώματος για 1 λεπτό στα 500 rpm και η διαδικασία αυτή επαναλήφθηκε για μια επιπλέον στρώση. Στη συνέχεια ακολούθησε η όπτηση των ηλεκτροδίων για 90 λεπτά στους 500 °C, με ελεγχόμενη ψύξη. Η διαδικασία της όπτησης θεωρείται απαραίτητη για την εξαέρωση των υγρών στοιχείων της πάστας, ώστε να μείνει ένα λεπτό στερεό υμένιο TiO<sub>2</sub>, και τα νανο-σωματίδια να αποκτήσουν καλή ηλεκτρική επικοινωνία (διαδικασία πυροσυσσωμάτωσης, sintering). Τέλος, τα ηλεκτρόδια TiO<sub>2</sub> τοποθετήθηκαν σε υδατικό διάλυμα τετραχλωριούχου τιτανίου (TiCl<sub>4</sub>) συγκέντρωσης 40 mM και αποθηκεύτηκαν σε σφραγισμένο δοχείο στους 70 °C για 30 λεπτά. Στη συνέχεια, ακολούθησε η όπτησή τους στους 500 °C για επιπλέον 30 λεπτά, ενώ η ψύξη τους επαναπραγματοποιήθηκε ελεγχόμενα. Ως ευαισθητοποιητής του ημιαγωγού της ανόδου χρησιμοποιήθηκε εμπορικά διαθέσιμη χρωστική ουσία, με κωδική ονομασία N719 της εταιρείας Dyesol. Για την ευαισθητοποίηση του ημιαγωγού παρασκευάστηκε αθανικό διάλυμα συγκέντρωσης 0.3 mM σε χρωστική ουσία. Τα ηλεκτρόδια TiO<sub>2</sub> εμβαπτίστηκαν στο προαναφερόμενο διάλυμα για διάστημα 24 ωρών, με σκοπό την απορρόφηση επαρκούς ποσότητας χρωστικής ουσίας.

#### 2.1.2. Κατασκευή της καθόδου

Η κατασκευή της καθόδου των DSSCs πραγματοποιήθηκε με χρήση γυάλινων υποστρωμάτων τεχνολογίας FTO και πλατίνης ως υλικού καθόδου. Τα υποστρώματα είχαν πάχος 3.2 mm και η επιφανειακή τους αντίσταση ήταν 8 Ω/sq. Αρχικά, στα υποστρώματα δημιουργήθηκε διαμπερής οπή με χρήση κατάλληλου τρυπανιού, απαραίτητη στην κατασκευή των ηλιακών κυττάρων. Στην αγώγιμη επιφάνεια των γυάλινων υποστρωμάτων επιστρώθηκε εμπορικά διαθέσιμη πλατίνα σε μορφή νανοσυμπλεγμάτων (PT1 paste) της εταιρείας Dyesol. Η τεχνική επίστρωσης ήταν doctor-blading σε

προκαθορισμένη επιφάνεια, ανάλογη με την άνοδο. Η όπτηση των αντι-ηλεκτροδίων διεξήχθη στους 500 °C για 30 λεπτά.

### 2.1.3. Στεγανοποίηση και πλήρωση των ηλιακών κυττάρων

Η στεγανοποίηση των DSSCs ήταν απαραίτητη προϋπόθεση για τη χρήση τους σε πειράματα επιταχυνόμενης γήρανσης. Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης χρησιμοποιήθηκε το εμπορικά διαθέσιμο στεγανοποιητικό της εταιρείας Dyesol Low Temperature Thermoplastic Sealant, πάχους 50 μm. Με σκοπό τη χρήση του στα DSSCs, το ειδικό στεγανοποιητικό φύλλο κόπηκε σε τετραγωνικές διαστάσεις 2 x 2 cm, με εσωτερικό κενό 1.4 x 1.4 cm. Στη συνέχεια, αυτό τοποθετήθηκε μεταξύ της άνοδου και της καθόδου και με την εφαρμογή πίεσης στους 120 °C για 15 λεπτά ολοκληρώθηκε η διαδικασία στεγανοποίησης των ηλιακών κυττάρων περιμετρικά. Ένα επιπλέον δευτερεύον πολυμερικό στεγανοποιητικό (Hybrifix super 7, Den Braven) εφαρμόστηκε περιμετρικά των ηλιακών κυττάρων, ώστε να βελτιωθεί η περιμετρική στεγανοποίηση των ηλιακών κυττάρων. Τα στεγανοποιημένα περιμετρικά πλέον ηλιακά κύτταρα πληρώθηκαν με ηλεκτρολύτη, εξασφαλίζοντας τη μεταφορά ηλεκτρικών φορτίων από την κάθοδο στην άνοδο. Η πλήρωσή τους πραγματοποιήθηκε μέσω της οπής που είχε δημιουργηθεί στο υποστρώμα της καθόδου, με τη χρήση ειδικής σύριγγας. Τέλος, με τη στεγανοποίηση της οπής εξωτερικά του υποστρώματος της καθόδου ολοκληρώθηκε η κατασκευή πλήρως λειτουργικών DSSCs. Ο ηλεκτρολύτης που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη ήταν ο εμπορικά διαθέσιμος High Stability Electrolyte (EL-HSE) της εταιρείας Dyesol.

## 2.2. Χαρακτηρισμός των φωτο-ευαίσθητων ηλιακών κυττάρων με χρωστική ουσία

Ο χαρακτηρισμός των DSSCs διεξήχθη με τη βοήθεια διάταξης μεταβλητού φορτίου, με απευθείας ακτινοβολή τους από τον ήλιο, σε ένταση ακτινοβολίας  $1000 \pm 10 \text{ W/m}^2$ , γωνίας ζενίθ  $48 \pm 2^\circ$  και θερμοκρασία περιβάλλοντος  $30 \pm 2^\circ \text{C}$ . Η εξαγωγή των χαρακτηριστικών καμπυλών ρεύματος-τάσης πραγματοποιήθηκε με ρυθμό σάρωσης 50 mV/sec, με φορά από το ρεύμα βραχυκύκλωσης στην τάση ανοιχτού κυκλώματος. Η εφαρμογή του αναλυτικού μοντέλου ισοδύναμου κυκλώματος μονής διόδου στις πειραματικές καμπύλες ρεύματος-τάσης βασίζεται σε προηγούμενες μελέτες [12, 13]. Από το αναλυτικό μοντέλο υπολογίστηκε σε κάθε περίπτωση το παραγόμενο φωτο-ρεύμα (photo-generated current), ο συντελεστής ιδανικότητας (ideality factor), το ρεύμα σκότους (dark saturation current) και η συνισταμένη εν σειρά (series parasitic resistance) και εν παράλληλω παρασιτική αντίσταση (shunt parasitic resistance).

## 2.3. Πειραματικές διατάξεις επιταχυνόμενης γήρανσης

### 2.3.1. Σταθερή υψηλή θερμοκρασία

Η επίδραση της παραμονής των ηλιακών κυττάρων σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών προσομοιώθηκε εργαστηριακά με πειράματα θερμικής κόπωσης υπό σταθερή υψηλή θερμοκρασία (isothermal fatigue), στους 85 °C. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε κατάλληλος εργαστηριακός φούρνος. Η αύξηση της θερμοκρασίας πραγματοποιήθηκε με ρυθμό  $1^\circ \text{C}/\text{min}$  από τη θερμοκρασία δωματίου μέχρι τους 85 °C, όπου παρέμεινε σταθερή για το απαιτούμενο χρονικό διάστημα της μελέτης. Η ομαλή αύξηση αλλά τις μείωση της θερμοκρασίας, απέτρεψε την όποια υποβάθμιση των χαρακτηριστικών των ηλιακών κυττάρων λόγω απότομων θερμοκρασιακών μεταβολών. Η μελέτη της επίδρασης της θερμικής κόπωσης στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των DSSCs πραγματοποιήθηκε σε διαστήματα των 100 ωρών. Η συνολική διάρκεια του πειράματος ήταν 1000 ώρες.

### 2.3.2. Σταθερή χαμηλή θερμοκρασία

Η λειτουργία των ηλιακών κυττάρων σε χαμηλές θερμοκρασίες προσομοιώθηκε με πειράματα θερμικής κόπωσης υπό σταθερή χαμηλή θερμοκρασία (isothermal fatigue), με χρήση καταψύκτη. Τα ηλιακά κύτταρα εκτέθηκαν από τις αρχικές συνθήκες δωματίου σε θερμοκρασία -25 °C, με μέγιστο ρυθμό μείωσης της θερμοκρασίας τον  $1^\circ \text{C}/\text{min}$ . Η αύξηση της θερμοκρασίας των ηλιακών κυττάρων πραγματοποιήθηκε με τον ίδιο ρυθμό, μέχρι τη θερμοκρασία δωματίου. Η μελέτη της επίδρασης της θερμικής κόπωσης στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των DSSCs πραγματοποιήθηκε ανά διαστήματα των 100 ωρών. Η συνολική διάρκεια του πειράματος ήταν 1000 ώρες. Η αεροστεγής σφράγιση των ηλιακών κυττάρων περιόρισε την όποια επίδραση της υγρασίας.

### 2.3.3. Απότομες θερμοκρασιακές μεταβολές

Τα ηλιακά κύτταρα υποβλήθηκαν και σε πείραμα απότομων θερμοκρασιακών μεταβολών (thermal shock cycling). Κάθε κύκλος πειράματος είχε συνολική διάρκεια 30 λεπτών, με 15 λεπτά στους -25 °C και 15 λεπτά στους 85 °C. Οι μετρήσεις των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των DSSCs ελήφθησαν στους 10, 20, 40, 60, 80, 100, 130, 160 και 200 κύκλους. Για την αποφυγή της έκθεσης των ηλιακών

κυττάρων στην υγρασία κατά τη διάρκεια του πειράματος, αυτά τοποθετήθηκαν σε λεπτό αεροστεγώς κλειστό πλαστικό σακουλάκι, χωρίς όμως να δυσχεραίνεται η μεταφορά θερμότητας από και προς τα ηλιακά κύτταρα.

#### 2.3.4. Υψηλή θερμοκρασία και υγρασία

Ο προσδιορισμός της επίδρασης της υψηλής περιβαλλοντικής υγρασίας στα ηλιακά κύτταρα πραγματοποιήθηκε με τη χρήση ειδικού θαλάμου, ο οποίος εξασφάλιζε περιβάλλον σταθερής υψηλής θερμοκρασίας και υγρασίας (hydrothermal fatigue). Τα ηλιακά κύτταρα τοποθετήθηκαν σε συνθήκες θερμοκρασίας 65 °C και σχετικής υγρασίας 85% για διαστήματα 20 ωρών. Οι μετρήσεις των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών τους ελήφθησαν μετά το πέρας του διαστήματος αυτού, με σκοπό τον έλεγχο της επίδρασης της υψηλής θερμοκρασίας και υγρασίας περιβάλλοντος στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των DSSCs. Το πείραμα είχε μέγιστη διάρκεια 100 ωρών.

#### 2.3.5. Ανάστροφη πόλωση

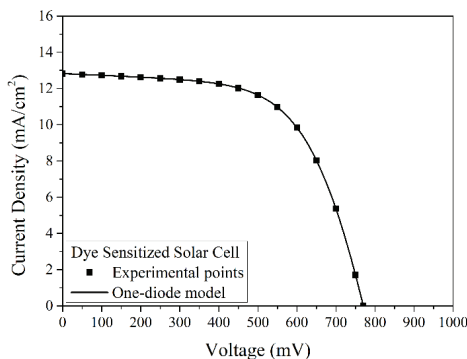
Με σκοπό τη μελέτη της επίδρασης του φαινομένου της μερικής σκίασης φωτοβολταϊκών μονάδων πραγματοποιήθηκαν πειράματα ανάστροφης πόλωσης (reverse biasing) στα DSSCs. Τα ηλιακά κύτταρα συνδέθηκαν σε τροφοδοτικό συνεχούς ρεύματος, η ένταση του οποίου ήταν σταθερή, τετραπλάσια του ρεύματος βραχυκύκλωσης των DSSCs. Το πείραμα διεξήχθη σε συνθήκες σκότους, ώστε τα ηλιακά κύτταρα να μην παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα. Η επίδραση της ανάστροφης πόλωσης στην υποβάθμιση της απόδοσης των DSSCs υπολογίστηκε μετά από 10, 20, 30, 40, 60, 80, 100 και 150 ώρες πειράματος.

#### 2.3.6. Χρονική πάροδος

Τέλος, έγινε μελέτη της υποβάθμισης της απόδοσης των ηλιακών κυττάρων κατά την αποθήκευσή τους σε συνθήκες δωματίου (normal ageing). Τα DSSCs τοποθετήθηκαν σε σφραγισμένα πλαστικά σακουλάκια υπό συνθήκες σκιάς, για την αποφυγή της υποβάθμισής τους λόγω της λειτουργίας τους ή της διείσδυσης υγρασίας μέσω των στεγανοποιητικών τους.

### 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα DSSCs παρουσίασαν σε όλες τις περιπτώσεις, πριν τα πειράματα επιταχυνόμενης γήρανσης, την ίδια απόδοση ενεργειακής μετατροπής, με την τιμή της να κυμαίνεται περίπου στο 6%. Στην Εικόνα 1 παρουσιάζεται η τυπική χαρακτηριστική καμπύλη πυκνότητας ρεύματος-τάσης των ηλιακών κυττάρων. Ενδεικτικά, τα ηλεκτρικά τους χαρακτηριστικά, καθώς και οι τιμές των παραμέτρων που υπολογίστηκαν ύστερα από την εφαρμογή του αναλυτικού μοντέλου ισοδύναμου κυκλώματος μόνης δόδου στην πειραματική καμπύλη ρεύματος-τάσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.



Εικόνα 1: Τυπική χαρακτηριστική καμπύλη πυκνότητας ρεύματος-τάσης των DSSCs

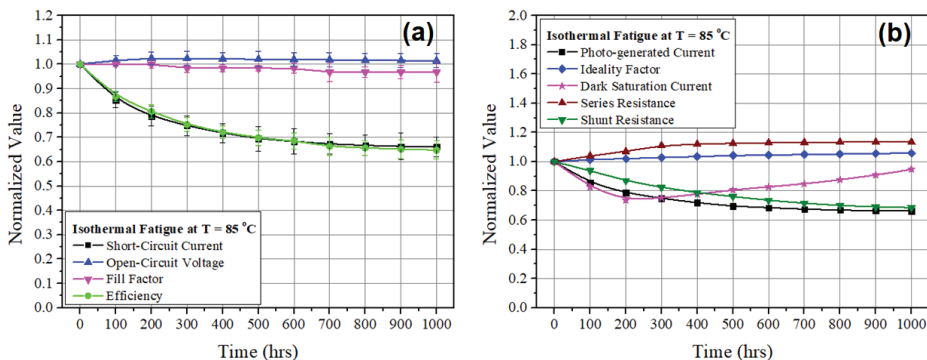
Πίνακας 1: Ενδεικτικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των DSSCs

	$J_{SC}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{OC}$ (mV)	FF (-)	$\eta$ (%)	$J_L$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$n$ (-)	$J_0$ (nA/cm <sup>2</sup> )	$r_s$ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	$r_{SH}$ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )
DSSC	12.82	770	0.61	6.02	12.88	2.88	435	5.00	1080

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων της επιταχυνόμενης γήρανσης της παρούσας μελέτης παρουσιάζονται ανηγμένα ως προς τις αρχικές τιμές των αντίστοιχων μεγεθών, με σκοπό τον εύκολο προσδιορισμό της υποβάθμισης σε κάθε περίπτωση. Σε κάθε μέτρηση προέκυψε μια μέση τιμή καθώς και μια τυπική απόκλιση που αφορά στα αντίστοιχα μεγέθη, τιμές των οποίων υπολογίστηκαν βάσει μετρήσεων που ελήφθησαν από τρία πανομοιότυπα ηλιακά κύτταρα για κάθε ένα από τα πειράματα επιταχυνόμενης γήρανσης.

### 3.1. Σταθερή υψηλή θερμοκρασία

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2α, η υποβάθμιση της απόδοσης των ηλιακών κυττάρων, λόγω παραμονής τους στους 85 °C, ήταν μεγάλη στην αρχή του πειράματος. Στις 1000 ώρες πειράματος τα ηλιακά κύτταρα διατηρούσαν περίπου το 65% της αρχικής τους απόδοσης. Ο κύριος λόγος της υποβάθμισης της απόδοσής τους ήταν η μείωση του ρεύματος βραχυκύκλωσης, με τον παράγοντα πλήρωσης και την τάση ανοιχτού κυκλώματος να παραμένουν σχεδόν σταθερά στις αρχικές τους τιμές καθόλη τη διάρκεια της επιταχυνόμενης γήρανσης. Το παραγόμενο φωτο-ρεύμα παρουσίασε παρόμοια μείωση με το ρεύμα βραχυκύκλωσης, ενώ ο συντελεστής ιδανικότητας μικρή αύξηση. Το ρεύμα σκότους παρουσίασε αρχικά μείωση μέχρι τις 200 ώρες και ύστερα αύξηση. Όσον αφορά στις παρασιτικές αντιστάσεις, η εν σειρά παρασιτική αντίσταση παρουσίασε μικρή αύξηση, η οποία ήταν εντονότερη στις πρώτες 300 ώρες πειράματος, ενώ η εν παραλλήλω παρασιτική αντίσταση παρουσίασε μείωση, η οποία μετά από 1000 ώρες πειράματος έφτασε το 30% (Εικόνα 2b).



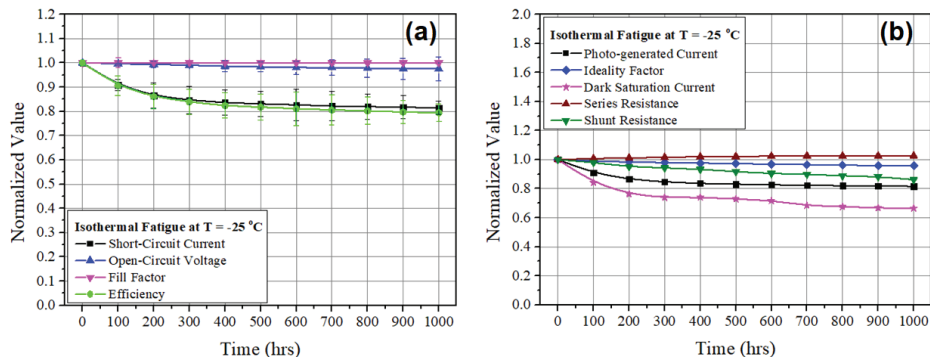
Εικόνα 2: Επίδραση της υψηλής θερμοκρασίας στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των DSSCs

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, ο κύριος λόγος υποβάθμισης της απόδοσης των DSSCs υπό σταθερή υψηλή θερμοκρασία 85 °C και άνω είναι η υποβάθμιση της χρωστικής ουσίας [7, 14]. Συγκεκριμένα, η υποβάθμισή τους αποδίδεται σε φαινόμενα εκρόφησης και διάσπασης του συμπλόκου της χρωστικής ουσίας N719 [8, 15]. Αποτέλεσμα αυτού είναι η έντονη μείωση του παραγόμενου φωτο-ρεύματος και κατ' επέκταση του ρεύματος βραχυκύκλωσης. Λόγω της μείωσης αυτής παρατηρείται αρχικά και η μείωση του ρεύματος σκότους. Η αύξηση του ρεύματος σκότους μετά τις 200 ώρες πειράματος, η αύξηση της εν σειρά παρασιτικής αντίστασης και η μείωση της εν παραλλήλω παρασιτικής αντίστασης οφείλεται στην υποβάθμιση του ηλεκτρολύτη [7, 16]. Σε πειράματα επιταχυνόμενης γήρανσης σε υψηλές θερμοκρασίες παρατηρείται συχνά μείωση της συγκέντρωσης του οξειδωαναγωγικού ζεύγους του ηλεκτρολύτη, λόγω αναντιστρεπτών αντιδράσεων, σχηματισμός παραπροϊόντων στον ηλεκτρολύτη, καθώς και αποκόλληση σωματιδίων από το αντιηλεκτρόδιο. Τα παραπροϊόντα αυτά διαχέονται μέσω του ηλεκτρολύτη στο φωτο-ηλεκτρόδιο και δρουν ως κέντρα ανασυνδυασμών [7, 17].

### 3.2. Σταθερή χαμηλή θερμοκρασία

Η παραμονή των ηλιακών κυττάρων σε συνθήκες -25 °C προκάλεσε μικρότερη υποβάθμιση στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά τους, σε σχέση με τα αντίστοιχα πειράματα που διεξήχθησαν στους 85 °C. Τα ηλιακά κύτταρα διατήρησαν το 80% της αρχικής τους απόδοσης μετά από 1000 ώρες πειράματος (Εικόνα 3α). Η μείωση του ρεύματος βραχυκύκλωσης ήταν και σε αυτή την περίπτωση σημαντική, ενώ η τάση ανοιχτού κυκλώματος και ο παράγοντας πλήρωσης δεν παρουσίασαν κάποια αξιοσημείωτη μεταβολή. Το παραγόμενο φωτο-ρεύμα, το ρεύματος σκότους και η εν παραλλήλω παρασιτική

αντίσταση παρουσίασαν μείωση, ενώ ο συντελεστής ιδανικότητας και η εν σειρά παρασιτική αντίσταση δεν παρουσίασαν έντονη μεταβολή (Εικόνα 3b).

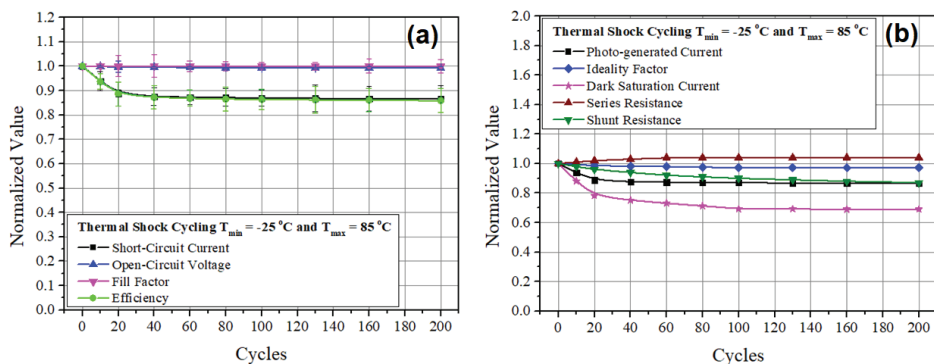


Εικόνα 3: Επίδραση της χαμηλής θερμοκρασίας στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των DSSCs

Η παραμονή των DSSCs σε σταθερή χαμηλή θερμοκρασία φάνηκε να επηρεάζει αρκετά την απόδοσή τους, υποβαθμίζοντας τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά τους. Παρόλο που ο μηχανισμός υποβάθμισης σε άλλες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών έχει ερευνηθεί, στα DSSCs οι μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί είναι ελάχιστες, χωρίς να περιγράφονται αναλυτικά τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα. Στην παρούσα μελέτη, η μείωση της απόδοσης των DSSCs αποδίδεται κυρίως στην υποβάθμιση των χαρακτηριστικών της χρωστικής ουσίας, καθώς εμφανής ήταν ο αποχρωματισμός της φωτοανόδου. Φαινόμενα εκρόφησης και διάσπασης της χρωστικής ουσίας αποτελούν συνήθως τον κύριο λόγο της μείωσης του παραγόμενου φωτο-ρεύματος και κατ' επέκταση του ρεύματος βραχυκύκλωσης. Στα προαναφερόμενα αποδίδεται και η μείωση του ρεύματος σκότους. Τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρολύτη φάνηκε να μην επηρεάζονται έντονα υπό την παραμονή των ηλιακών κυττάρων σε σταθερή χαμηλή θερμοκρασία, καθώς η εν σειρά και η εν παραλλήλω παρασιτικές αντιστάσεις παρουσίασαν μικρή μεταβολή. Ο ηλεκτρολύτης δεν παρουσίασε οπτικά κάποια μεταβολή, ενώ επίσης δεν παρατηρήθηκαν φαινόμενα θερμικής αστάθειας.

### 3.3. Απότομες θερμοκρασιακές μεταβολές

Η υποβάθμιση της απόδοσης των ηλιακών κυττάρων που υποβλήθηκαν σε πειράματα επιταχυνόμενης γήρανσης απότομων θερμοκρασιακών μεταβολών ήταν μικρή και παρουσιάστηκε από τους πρώτους κύκλους θερμικής κόπωσης. Μείωση της απόδοσης της τάξεως του 10% παρατηρήθηκε στους πρώτους 20 κύκλους, ενώ η συνολική υποβάθμιση μετά από 200 κύκλους περιορίστηκε στο 15% (Εικόνα 4a). Κύριος λόγος μείωσης της απόδοσης των ηλιακών κυττάρων αποτέλεσε η μείωση του ρεύματος βραχυκύκλωσης. Ο παράγοντας πλήρωσης και η τάση ανοικτού κυκλώματος των ηλιακών κυττάρων παρέμειναν σταθερά καθόλη τη διάρκεια του πειράματος. Το παραγόμενο φωτο-ρεύμα παρουσίασε παρόμοια διακύμανση με το ρεύμα βραχυκύκλωσης. Ο συντελεστής ιδανικότητας δεν παρουσίασε κάποια μεταβολή στην τιμή του, ενώ έντονη ήταν η μείωση του ρεύματος σκότους, με την τιμή του να σταθεροποιείται τελικά σχεδόν στο 70% της αρχικής του τιμής μετά από 200 κύκλους θερμικής κόπωσης. Οι εσωτερικές παρασιτικές αντιστάσεις των ηλιακών κυττάρων παρουσίασαν μικρές μεταβολές καθόλη τη διάρκεια του πειράματος, οι οποίες δεν ξεπέρασαν το 10% σε σχέση με την αρχική τους τιμή (Εικόνα 4b).

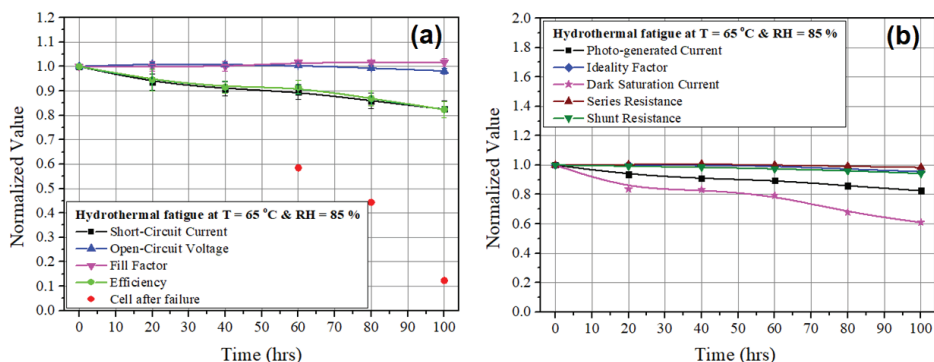


Εικόνα 4: Επίδραση των απότομων θερμοκρασιακών μεταβολών στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των DSSCs

Συμπερασματικά, τα DSSCs παρουσίασαν υψηλή σταθερότητα σε συνθήκες απότομων θερμοκρασιακών μεταβολών, με τα περισσότερα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά τους να παρουσιάζουν μικρή μεταβολή. Η μείωση του ρεύματος βραχυκύκλωσης, που αποτέλεσε και τον κύριο λόγο υποβάθμισης της απόδοσης των DSSCs, αποδίδεται στην υποβάθμιση της χρωστικής ουσίας, φαινόμενο που παρατηρήθηκε πιο έντονα στα πειράματα επιταχυνόμενης γήρανσης σε σταθερή υψηλή και χαμηλή θερμοκρασία. Αναφορικά στα υπόλοιπα υλικά που απαρτίζουν τα ηλιακά κύτταρα, οι απότομες θερμοκρασιακές μεταβολές δεν φάνηκε να επηρεάζουν τις ιδιότητές τους, καθώς η εν σειρά και εν παράλληλω παρασιτική αντίσταση δεν παρουσίασαν ιδιαίτερη μεταβολή στην τιμή τους. Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχει πολύ μικρός αριθμός μελετών που αφορούν σε πειράματα σταθερότητας των DSSCs υπό συνθήκες απότομων θερμοκρασιακών μεταβολών, χωρίς να καταδεικνύονται επιπλέον μηχανισμοί υποβάθμισης [18, 19].

### 3.4. Υψηλή θερμοκρασία και υγρασία

Τα ηλιακά κύτταρα παρουσίασαν χαμηλή σταθερότητα σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας και υγρασίας, καθώς και κάποια από αυτά καταστράφηκαν ολοκληρωτικά όταν η υγρασία εισχώρησε από τα στεγανοποιητικά τους. Όπως φαίνεται και από την Εικόνα 5a, τα περισσότερα ηλιακά κύτταρα παρουσίασαν μείωση της απόδοσής τους της τάξης του 20% μετά από μόλις 100 ώρες πειράματος. Η μείωση αυτή οφείλεται στη μείωση του ρεύματος βραχυκύκλωσης, με την τάση ανοιχτού κυκλώματος και τον παράγοντα πλήρωσης να μην παρουσιάζουν κάποια αξιοσημείωτη μεταβολή. Το παραγόμενο φωτο-ρεύμα και το ρεύμα σκότους παρουσίασαν έντονη μείωση, ενώ συντελεστής ιδανικότητας, η εν σειρά και η εν παράλληλω παρασιτική αντίσταση παρέμειναν σχεδόν σταθερά καθόλη τη διάρκεια του πειράματος (Εικόνα 5b).

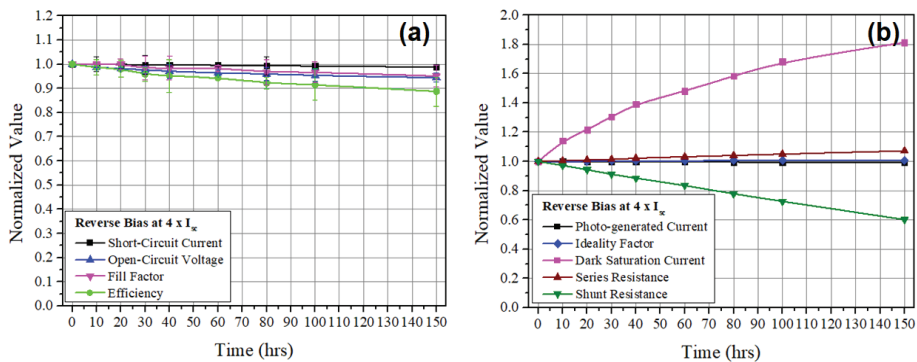


Εικόνα 5: Επίδραση της υψηλής θερμοκρασίας και υγρασίας στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των DSSCs

Η υποβάθμιση της απόδοσης των DSSCs υπό συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας και υγρασίας αποδίδεται κυρίως στην υποβάθμιση της χρωστικής ουσίας, γεγονός που έγινε αντιληπτό και οπτικά με τον αποχρωματισμό της. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, τα μόρια του νερού που εισχωρούν στο ηλιακό κύτταρο, παρεμβάλλονται στο  $\text{TiO}_2$ , το οποίο παρουσιάζει υδροφιλικές ιδιότητες. Αποτέλεσμα αυτού είναι η εκρόφηση και σε μερικές περιπτώσεις η διάσπαση της χρωστικής ουσίας, ιδιαίτερα όταν η χρωστική ουσία που χρησιμοποιείται έχει υδροφιλικές ιδιότητες, όπως η N719 [7, 20]. Οι ανασυνδυασμοί εσωτερικά των DSSCs μειώνονται με την παρουσία μορίων νερού εσωτερικά του ηλιακού κυττάρου, καθώς αυτά εμποδίζουν την αναγωγή των τριώνιδίων του ηλεκτρολύτη από τα ηλεκτρόνια του ημιαγωγού και του υποστρώματος της ανόδου [21, 22]. Τα παραπάνω παρατηρήθηκαν και στην παρούσα μελέτη, με το ρεύμα σκότους να παρουσιάζει έντονη μείωση, ιδιαίτερα μετά τις 60 ώρες πειράματος. Υποβάθμιση παρατηρείται συνήθως και στους ηλεκτρολύτες οξειδοαναγωγικού ζεύγους ιωδίου, καθώς συντελούνται αναντιστρεπτές χημικές αντιδράσεις μεταξύ των τριώνιδίων και των μορίων του νερού. Η παραπάνω αντίδραση γίνεται και οπτικά αντιληπτή, με τον αποχρωματισμό του ηλεκτρολύτη, καθώς μειώνονται τα τριώνια και δημιουργούνται μη επιθυμητά παράγωγα του ιωδίου [7]. Τα παραπάνω φαινόμενα εκτιμάται ότι είναι και ο κύριος λόγος της υποβάθμισης των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των DSSCs υπό συνθήκες αυξημένης περιβαλλοντικής θερμοκρασίας και υγρασίας.

### 3.5. Ανάστροφη πόλωση

Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των ηλιακών κυττάρων παρουσίασαν μικρή μεταβολή στη διάρκεια των πειραμάτων ανάστροφης πόλωσης τους. Τα ηλιακά κύτταρα διατήρησαν σχεδόν το 90% της αρχικής τους απόδοσης μετά από 150 ώρες πειράματος (Εικόνα 6α). Το ρεύμα βραχυκύκλωσης δεν παρουσίασε κάποια μεταβολή, ενώ η τάση ανοιχτού κυκλώματος και ο παράγοντας πλήρωσης παρουσίασαν πολύ μικρή μείωση στην τιμή τους. Το παραγόμενο φωτο-ρεύμα και ο συντελεστής ιδανικότητας παρέμειναν σταθερά στην αρχική τους τιμή, ενώ το ρεύμα σκότους παρουσίασε έντονη συνεχή αύξηση η οποία έφτασε το 80% στο τέλος του πειράματος. Η εν σειρά παρασιτική αντίσταση παρουσίασε μικρή συνεχή αύξηση, ενώ η εν παραλλήλω παρασιτική αντίσταση παρουσίασε έντονη μείωση, η οποία έφτασε το 40% στο τέλος του πειράματος (Εικόνα 6β).



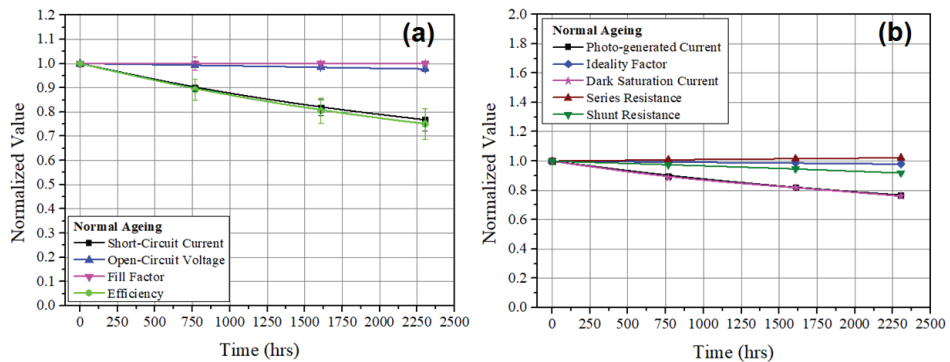
Εικόνα 6: Επίδραση της ανάστροφης πόλωσης στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των DSSCs

Η ανάστροφη πόλωση φάνηκε να μην επηρεάζει σημαντικά την απόδοση των DSSCs στη διάρκεια των 150 ωρών πειράματος. Στην παρούσα μελέτη δεν παρατηρήθηκε έντονη υποβάθμιση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των ηλιακών κυττάρων, καθώς και φαινόμενα όπως η δημιουργία φυσαλίδων στο εσωτερικό τους, η αστοχία των στεγανοποιητικών και η κατάφραυση της φωτο-διόδου, τα οποία μπορεί να παρατηρηθούν κατά την ανάστροφη πόλωση των DSSCs [23]. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης αλλά και τη βιβλιογραφία, ο κύριος λόγος της υποβάθμισης των DSSCs υπό ανάστροφη πόλωση είναι η υποβάθμιση του ηλεκτρολύτη. Το φαινόμενο αυτό γίνεται αντιληπτό και με τον αποχρωματισμό του ηλεκτρολύτη, γεγονός που παρατηρήθηκε και στην παρούσα μελέτη. Ο αποχρωματισμός οφείλεται στη μείωση της συγκέντρωσης των τριώνιδίων του ηλεκτρολύτη, η οποία οδηγεί και στη μείωση της αγωγιμότητάς του [23, 24]. Εμφανής αλλοίωση παρατηρήθηκε επίσης και στην κάθοδο των ηλιακών κυττάρων, γεγονός που έχει παρατηρηθεί και βιβλιογραφικά [24]. Στους παραπάνω λόγους αποδίδεται η μικρή αύξηση της εν σειρά παρασιτικής αντίστασης. Η αύξηση του ρεύματος σκότους και η μείωση της εν παραλλήλω παρασιτικής αντίστασης υποδηλώνει αυξημένους ανασυνδυασμούς στη διεπιφάνεια  $\text{TiO}_2$ /ηλεκτρολύτη, καθώς και αγωγίμου

υποστρώματος/ηλεκτρολύτη, αντίστοιχα. Τα παραπάνω οφείλονται στη μεταβολή του πάχους της διπλοστιβάδας Helmholtz και σε παραπροϊόντα που δημιουργούνται στον ηλεκτρολύτη, τα οποία λειτουργούν ως κέντρα ανασυνδυασμών ηλεκτρονίων-οπών [25].

### 3.6. Χρονική πάροδος

Τα πειράματα γήρανσης σε συνθήκες δωματίου που πραγματοποιήθηκαν στα DSSCs είχαν ως σκοπό τον προσδιορισμό της επίδρασης της χρονικής παρόδου στα ηλεκτρικά τους χαρακτηριστικά τους. Η υποβάθμιση της απόδοσης των ηλιακών κυττάρων θεωρήθηκε γραμμική με την πάροδο του χρόνου (Εικόνα 7a). Η απόδοση των DSSCs παρουσίασε μείωση της τάξεως του 25% μετά από 2300 ώρες πειράματος. Κύριος λόγος της μείωσης αυτής ήταν η μείωση του ρεύματος βραχυκύκλωσης. Η τάση ανοικτού κυκλώματος και ο παράγοντας πλήρωσης των ηλιακών κυττάρων δεν παρουσίασε κάποια αξιοσημείωτη μεταβολή κατά τη διάρκεια του πειράματος. Όσον αφορά στα μεγέθη που προσδιορίστηκαν ύστερα από την εφαρμογή του αναλυτικού μοντέλου ισοδύναμου κυκλώματος μόνης διόδου, το παραγόμενο φωτο-ρεύμα και το ρεύμα σκότους παρουσίασαν γραμμική μείωση με το χρόνο, ενώ ο συντελεστής ιδανικότητας παρέμεινε αμετάβλητος καθόλη τη διάρκεια του πειράματος. Η εν σειρά και η εν παράλληλω παρασιτικές αντιστάσεις παρουσίασαν μικρές μεταβολές σε σχέση με την αρχική τους τιμή, οι οποίες δεν ξεπερνούσαν το 10% ακόμα και μετά από 2300 ώρες πειράματος (Εικόνα 7b).



Εικόνα 7: Επίδραση της χρονικής παρόδου στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των DSSCs

Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης έδειξαν μείωση της απόδοσης των DSSCs ακόμα και με την αποθήκευσή τους σε συνθήκες δωματίου. Το γεγονός αυτό αποδίδεται κυρίως στην περίσσεια της χρωστικής ουσίας στη φωτοάνοδο, η οποία διεισδύει με την πάροδο του χρόνου στον ηλεκτρολύτη, αλλά και σε φαινόμενα αλλοίωσης του αντι-ηλεκτροδίου [26, 27]. Έρευνες έχουν δείξει μείωση της απόδοσης των DSSCs με την παρουσία μορίων χρωστικής στον ηλεκτρολύτη, παρατηρώντας μεταβολές στα ηλεκτρικά τους χαρακτηριστικά, αντίστοιχες με την παρούσα μελέτη [27]. Μετά την ευαισθητοποίηση της ανόδου είναι απαραίτητο να πραγματοποιείται απομάκρυνση της περίσσειας των μορίων της χρωστικής ουσίας, διαδικασία η οποία δεν ακολουθήθηκε κατά την κατασκευή των υπό μελέτη ηλιακών κυττάρων. Έτσι, η κάλυψη της χρωστικής ουσίας στον ημιαγωγό της ανόδου δεν ήταν μονομοριακή. Τα μόρια της χρωστικής που έρχονται σε άμεση επαφή με το  $\text{TiO}_2$  είναι τα μόνα που δημιουργούν ισχυρούς χημικούς δεσμούς και συμβάλλουν αποτελεσματικά στην παραγωγή φωτο-ρεύματος [28, 29]. Αντιθέτως, τα μόρια της χρωστικής ουσίας που δεν συγκρατούνται με χημικούς δεσμούς από την επιφάνεια του ημιαγωγού της ανόδου διεισδύουν με την πάροδο του χρόνου στον ηλεκτρολύτη. Η ταχύτητα εξέλιξης του φαινομένου αυτού εξαρτάται από το ιξώδες του ηλεκτρολύτη [30]. Γενικά η σύσταση του ηλεκτρολύτη, και συγκεκριμένα ο διαλύτης και τα κατιόντα που εμπεριέχει, διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη μακροπρόθεσμη σταθερότητα της διεπιφάνειας  $\text{TiO}_2$ /ηλεκτρολύτη και κατ' επέκταση της απόδοσης των DSSCs [31, 32].

## 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα μελέτη έχει ως σκοπό τον προσδιορισμό της επίδρασης των κυριότερων περιβαλλοντικών παραγόντων στην υποβάθμιση της απόδοσης των DSSCs. Η υποβάθμιση της απόδοσης των ηλιακών κυττάρων αποδόθηκε κυρίως σε φαινόμενα εκρόφησης και διάσπασης του συμπλόκου της χρωστικής

ουσίας. Η υγρασία σε συνδυασμό με την υψηλή θερμοκρασία φάνηκε να αποτελεί το σημαντικότερο περιβαλλοντικό παράγοντα που οδηγεί στην υποβάθμιση της απόδοσης των DSSCs, με την υγρασία να εισχωρεί από τα στεγανοποιητικά των ηλιακών κυττάρων και σε μερικές περιπτώσεις να τα καταστρέφει ολοκληρωτικά. Αναφορικά στα πειράματα επιταχυνόμενης γήρανσης σε σταθερή υψηλή και χαμηλή θερμοκρασία, η υποβάθμιση των DSSCs αποδόθηκε κυρίως στην υποβάθμιση της χρωστικής ουσίας, με τον ηλεκτρολύτη να μην παρουσιάζει μεγάλη υποβάθμιση και φαινόμενα θερμικής αστάθειας. Υψηλή σταθερότητα παρατηρήθηκε κατά την έκθεση των DSSCs σε απότομες θερμοκρασιακές μεταβολές. Η υποβάθμιση της απόδοσης των ηλιακών κυττάρων αποδόθηκε και σε αυτήν την περίπτωση στην υποβάθμιση της χρωστικής ουσίας, ενώ οι ιδιότητες των υπολοίπων υλικών δεν φάνηκε να επηρεάζονται έντονα. Στην περίπτωση της αναστροφής πόλωσης των DSSCs δεν παρατηρήθηκε έντονη υποβάθμιση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών τους. Στη διάρκεια του πειράματος δεν εμφανίστηκαν φαινόμενα που να υποδηλώνουν την κατάρρευση της φωτο-διόδου. Τέλος, τα DSSCs φάνηκε να επηρεάζονται αισθητά κατά την αποθήκευσή τους σε συνθήκες δωματίου. Το φαινόμενο αυτό αποδόθηκε κυρίως στη διείσδυση της περισσειας μορίων χρωστικής ουσίας, τα οποία δεν έχουν χημειοροφηθεί στον ημιαγωγό της ανόδου, στον ηλεκτρολύτη.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Grätzel, M., 2006, "Photovoltaic performance and long-term stability of dye-sensitized mesoscopic solar cells", *C. R. Chim.*, 9(5-6), pp. 578-583.
- [2] Kamat, P.V., 2007, "Meeting the clean energy demand: Nanostructure architectures for solar energy conversion", *J. Phys. Chem. C*, 111(7), pp. 2834-2860.
- [3] Parida, B., Iniyan, S., and Goic, R., 2011, "A review of solar photovoltaic technologies", *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 15(3), pp. 1625-1636.
- [4] Gong, J., Sumathy, K., Qiao, Q., and Zhou, Z., 2017, "Review on dye-sensitized solar cells (DSSCs): Advanced techniques and research trends", *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 68, pp. 234-246.
- [5] O'Regan, B., and Grätzel, M., 1991, "A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO<sub>2</sub> films", *Nature*, 353(6346), pp. 737-740.
- [6] Sugathan, V., John, E., and Sudhakar, K., 2015, "Recent improvements in dye sensitized solar cells: A review", *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 52(12), pp. 54-64.
- [7] Asghar, M.I., Miettunen, K., Halme, J., Vahermaa, P., Toivola, M., Aitola, K., and Lund, P., 2010, "Review of stability for advanced dye solar cells", *Energy Environ. Sci.*, 3(4), pp. 418-426.
- [8] Hinsch, A., Kroon, J.M., Kern, R., Uhlendorf, I., Holzbock, J., Meyer, A., and Ferber, J., 2001, "Long-term stability of dye-sensitized solar cells", *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, 9(6), pp. 425-438.
- [9] Harikisun, R., and Desilvestro, H., 2011, "Long-term stability of dye solar cells", *Sol. Energy*, 85(6), pp. 1179-1188.
- [10] Wu, J., Lan, Z., Lin, J., Huang, M., Huang, Y., Fan, L., and Luo, G., 2015, "Electrolytes in Dye-Sensitized Solar Cells", *Chem. Rev.*, 115(5), pp. 2136-2173.
- [11] Yan, Y., Wang, J., Chang, Q., Babikier, M., Wang, H., Li, H., Yu, Q., Gao, S., Jiao, S., 2013, "Fabrication of mesoporous TiO<sub>2</sub> electrodes by chemical technique for dye-sensitized solar cells", *Electrochim. Acta*, 94, pp. 277-284.
- [12] Sze, S.M., 1981, *Physics of Semiconductor Devices*, John Wiley and Sons 2nd ed., New York, United States, Chap. 12.
- [13] De Blas, M.A., Torres, J.L., Prieto, E., García, A., 2002, "Selecting a suitable model for characterizing photovoltaic devices", *Renew. Energ.*, 25(3), pp. 371-380.
- [14] Sarker, S., Seo, H.W., and Kim, D.M., 2013, "Electrochemical impedance spectroscopy of dye-sensitized solar cells with thermally degraded N719 loaded TiO<sub>2</sub>", *Chem. Phys. Lett.*, 585, pp. 193-197.
- [15] Wang, Q., Moser, J.-E., and Grätzel, M., 2005, "Electrochemical impedance spectroscopic analysis of dye-sensitized solar cells", *J. Phys. Chem. B*, 109(31), pp. 14945-14953.

- [16] Perganti, D., Kontos, A.G., Stergiopoulos, T., Likodimos, V., Farnell, J., Milliken, D., Desilvestro, H., Falaras, P., 2015, "Thermal Stressing of Dye Sensitized Solar Cells Employing Robust Redox Electrolytes", *Electrochim. Acta*, 179, pp. 241-249.
- [17] Lee, W.J., Ramasamy, E., Lee, D.Y., and Song, J.S., 2008, "Performance variation of carbon counter electrode based dye-sensitized solar cell", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 92(7), pp. 814-818.
- [18] Matsui, H., Okada, K., Kitamura, T., and Tanabe, N., 2009, "Thermal stability of dye-sensitized solar cells with current collecting grid", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 93(6-7), pp. 1110-1115.
- [19] Sastrawan, R., Beier, J., Belledin, U., Hemming, S., Hinsch, A., Kern, R., Vetter, C., Petrat, F.M., Prodi-Schwab, A., Lechner, P., and Hoffmann, W., 2006, "A glass frit-sealed dye solar cell module with integrated series connections", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 90(11), pp. 1680-1691.
- [20] Lu, H.-L., Shen, T.F.-R., Huang, S.-T., Tung, Y.-L., and Yang, T.C.-K., 2011, "The degradation of dye sensitized solar cell in the presence of water isotopes", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 95(7), pp. 1624-1629.
- [21] Mozaffari, S., Nateghi, M.R., and Borhanizarandi, M., 2014, "Effects of water-based gel electrolyte on the charge recombination and performance of dye-sensitized solar cells", *J. Solid State Electrochem.*, 18(9), pp. 2589-2598.
- [22] Liu, Y., Hagfeldt, A., Xiao, X.-R., and Lindquist, S.-E., 1998, "Investigation of influence of redox species on the interfacial energetics of a dye-sensitized nanoporous TiO<sub>2</sub> solar cell", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 55(3), pp. 267-281.
- [23] Mastroianni, S., Lanuti A., Brown, T.M., Argazzi, R., Caramori, S., Reale, A., and Di Carlo, A., 2012, "Reverse bias degradation in dye solar cells", *Appl. Phys. Lett.*, 101(12), 123302.
- [24] Bari, D., Wrachien, N., Tagliaferro, R., Brown, T.M., Reale, A., Di Carlo, A., Meneghesso, G., and Cester, A., 2013, "Comparison between positive and negative constant current stress", *Microelectron. Reliab.*, 53(9-11), pp. 1804-1808.
- [25] Agresti, A., Cinà, L., Pescetelli, S., Taheri, B., and Di Carlo, A., 2016, "Stability of dye-sensitized solar cell under reverse bias condition: Resonance Raman spectroscopy combined with spectrally resolved analysis by transmittance and efficiency mapping", *Vib. Spectrosc.*, 84, pp. 106-117.
- [26] Syrokostas, G., Siokou, A., Leftheriotis, G., and Yianoulis, P., 2012, "Degradation mechanisms of Pt counter electrodes for dye sensitized solar cells", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 103, pp. 119-127.
- [27] Heo, N., Jun, Y., and Park, J.H., 2013, "Dye molecules in electrolytes: New approach for suppression of dye-desorption in dye-sensitized solar cells", *Sci. Rep.*, 3, 1712.
- [28] Hagfeld, A., and Grätzel, M., 1995, "Light-induced redox reactions in nanocrystalline systems", *Chem. Rev.*, 95(1), pp. 49-68.
- [29] Gusak, V., Nkurunziza, E., Langhammer, C., and Kasemo, B., 2014, "Real-time adsorption and desorption kinetics of dye Z907 on a flat mimic of dye-sensitized solar cell TiO<sub>2</sub> photoelectrodes", *J. Phys. Chem. C*, 118(30), pp. 17116-17122.
- [30] Uam, H.-S., Jung, Y.-S., Jun, Y., and Kim, K.-J., 2010, "Relation of Ru(II) dye desorption from TiO<sub>2</sub> film during illumination with photocurrent decrease of dye-sensitized solar cells", *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.*, 212(2-3), pp. 122-128.
- [31] Mohanty, S.P., and Bhargava, P., 2015, "Impact of electrolytes based on different solvents on the long term stability of dye sensitized solar cells", *Electrochim. Acta*, 168, pp. 111-115.
- [32] Zhang, C., Huang, Y., Chen, S., Tian, H., Mo, L., Hu, L., Huo, Z., Kong, F., Ma, Y., and Dai, S., 2012, "Photoelectrochemical analysis of the dyed TiO<sub>2</sub>/electrolyte interface in long-term stability of dye-sensitized solar cells", *J. Phys. Chem. C*, 116(37), pp. 19807-19813.

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΕΠΙΔΟΣΕΙΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ /ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ

**Π. Αξαόπουλος, Ε. Σακελλαρίου**

ΤΕΙ Αθηνών – Τμήμα Μηχανικών Ενεργειακής Τεχνολογίας  
Αγ. Σπυριδώνα και Παλληκαρίδη – 122 10 Αιγάλεω.  
pax@teiath.gr

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο φωτοβολταϊκός/θερμικός συλλέκτης (PV/T), είναι ένας συνδυασμός φωτοβολταϊκού πλαισίου και θερμικού ηλιακού συλλέκτη, για την ταυτόχρονη μετατροπή τμήματος της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρισμό και θερμότητα.

Στη εργασία αυτή γίνεται πειραματική σύγκριση ενός συγκεκριμένου και εμπορικά διαθέσιμου φωτοβολταϊκού πλαισίου, με ένα πανομοιότυπο φ/β πλαίσιο, στο οποίο έχει προστεθεί ένας απορροφητήρας και αντίστοιχη μόνωση, προκειμένου να λειτουργεί σαν φωτοβολταϊκός/θερμικός συλλέκτης (PV/T). Ο απορροφητήρας έχει σχεδιασθεί και κατασκευασθεί στο εργαστήριο Ανανεώσιμων πηγών ενέργειας του Τμήματός μας.

Οι δύο συλλέκτες έχουν τοποθετηθεί σε νότιο προσανατολισμό, με την ίδια κλίση, ενώ ένα αυτόματο σύστημα λήψης και επεξεργασίας μετρήσεων, καταγράφει κάθε ένα λεπτό τις θερμοκρασίες σε αρκετά σημεία και στους δύο συλλέκτες, την ολική ηλιακή ακτινοβολία στην κεκλιμένη επιφάνεια των συλλεκτών, την ταχύτητα του ανέμου, την παροχή του νερού, την θερμοκρασία περιβάλλοντος και την τάση και ένταση του ρεύματος.

Οι πειραματικές μετρήσεις επεξεργάζονται και τα αποτελέσματα από ορισμένες χαρακτηριστικές ημέρες παρουσιάζονται σε μια σειρά από διαγράμματα, τα οποία δείχνουν υπεροχή στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον συνδυασμένο φωτοβολταϊκό και θερμικό ηλιακό συλλέκτη (PV/T), αλλά και επιπλέον παραγωγή θερμικής ενέργειας.

**Λέξεις Κλειδιά :** Φωτοβολταϊκός/θερμικός συλλέκτης (PV/T), PV/T απορροφητήρας, Υβριδικός συλλέκτης

Είναι γνωστό ότι τα φωτοβολταϊκά πλαίσια μετατρέπουν ένα τμήμα της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχονται, σε ηλεκτρική ενέργεια σύμφωνα με το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, ενώ παράλληλα έχουν και μεγάλες θερμικές και οπτικές απώλειες. Η απόδοση της μετατροπής αυτής για τα στοιχεία πυριτίου σε τυπικές επίγειες εφαρμογές κυμαίνεται μεταξύ 12 - 17 %, σε συγκεκριμένες συνθήκες αναφοράς. Επίσης, η αύξηση της θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου επηρεάζει αρνητικά την απόδοσή του. Επομένως, η απαγωγή θερμότητας από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο, θα το οδηγήσει σε χαμηλότερες θερμοκρασίες και κατά συνέπεια σε καλύτερη απόδοση, ενώ η θερμότητα που απάγεται μπορεί να χρησιμοποιηθεί για θέρμανση κάποιου ρευστού ώστε να είναι χρήσιμη για τον καταναλωτή. Επομένως, η ιδέα της ταυτόχρονης μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρισμό και θερμότητα, παρουσιάζεται αρκετά ενδιαφέροντα.

Έπειτα από αυτά, αρκετοί ερευνητές έχουν συνδυάσει τα φωτοβολταϊκά πλαίσια με κάποιο είδος εναλλάκτη θερμότητας, προκειμένου να μελετήσουν τα ηλεκτρικά και θερμικά χαρακτηριστικά τους. Όμως, ενώ οι έρευνες αυτές έχουν ξεκινήσει από την δεκαετία του 1970, δεν είχε παρουσιασθεί στην αγορά εμπορική συσκευή φωτοβολταϊκού πλαισίου η οποία να δίνει ηλεκτρισμό και θερμότητα συγχρόνως. Όμως, τα τελευταία χρόνια έχουν παρουσιασθεί στην αγορά κάποια φωτοβολταϊκά πλαίσια που συνδυάζουν και παραγωγή θερμότητας. Αρκετοί ερευνητές καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι θα πρέπει να γίνει οικονομική αξιολόγηση των συστημάτων αυτών προκειμένου να επεκταθούν στην αγορά [1-3]. Μια πρόσφατη μελέτη παρουσιάζει τις επιδόσεις των συστημάτων αυτών για τρεις διαφορετικές Ευρωπαϊκές πόλεις και αναλύει την οικονομική βιωσιμότητά τους [4].

Στο διάστημα αυτό, αρκετές μελέτες έχουν γίνει, που κάνουν ανασκόπηση των ερευνητικών προσπαθειών πάνω στον τομέα αυτό [5-8],[2]. Επίσης, σε αρκετές εργασίες γίνεται μελέτη της επίδρασης που έχει η διαμόρφωση του απορροφητήρα στην απόδοση, στο κόστος και στο βάρος του PVΤ συλλέκτη [5,8,9].

Σε εργασία των Charalambous et al.[10] βρέθηκε ότι ο απορροφητήρας τύπου σωλήνων-περυγίου είναι ελαφρύτερος, συγκρινόμενος με εκείνον της σερπαντίνας ο οποίος έχει διπλάσιο βάρος. Επίσης, ο απορροφητήρας τύπου σερπαντίνας, είχε 40% λιγότερο χαλκό και σχεδόν ίδια απόδοση με το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε από τους Zondag et al.[11]. Σχετικά με το σχήμα του απορροφητήρα, έχει βρεθεί μετά από πειραματισμό, ότι ο απορροφητήρας τύπου σπирάλ είναι ο πιο αποδοτικός [12]. Όμως, ο απορροφητήρας αυτός, είναι συγχρόνως πιο βαρύς και πιο δαπανηρός.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται συνήθως για την κατασκευή του απορροφητήρα, στους PV/T συλλέκτες, είναι χαλκός, αλουμίνιο και σίδηρος.

Όμως, υπάρχουν μελέτες που χρησιμοποιήθηκαν, ακόμα και πολυμερή υλικά [13-14]. Επίσης, έχει μελετηθεί και η χρήση θερμοσωλήνων τοποθετημένων στην πίσω πλευρά του φ/β πλαισίου, επιτυγχάνοντας μια συνολική απόδοση 63.65% και μια ηλεκτρική απόδοση 8.45% [15].

Στο εργαστήριο του Τμήματός μας, σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε ένας απορροφητήρας ο οποίος τοποθετήθηκε στην πίσω πλευρά ενός εμπορικά διαθέσιμου φ/β πλαισίου προκειμένου να λειτουργεί σαν PV/T συλλέκτης. Ο συλλέκτης αυτός μαζί με ένα πανομοιότυπο φ/β πλαίσιο τοποθετήθηκαν στην οροφή του εργαστηρίου προκειμένου να γίνουν πειραματικές μετρήσεις.

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η πειραματική μελέτη σε πραγματικές συνθήκες, των ηλεκτρικών επιδόσεων δυο πανομοιότυπων φ/β πλαισίων, το ένα εκ των οποίων έχει τροποποιηθεί κατάλληλα έτσι ώστε να αποτελεί ένα PV/T συλλέκτη, καθώς επίσης και η μελέτη της θερμικής απόδοσης του PV/T συλλέκτη.

## 2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Για τις ανάγκες του πειράματος, κατασκευάστηκε ένας απορροφητήρας ο οποίος αποτελείται από ένα επίπεδο φύλλο χαλκού πάχους 0.28 mm και διαστάσεων 0.52X1.16 m, πάνω στο οποίο κολλήθηκε χαλκινός σωλήνας διαμέτρου 1/4 in, με απόσταση μεταξύ των σωλήνων 6 cm, έτσι ώστε το σύνολο να αποτελεί ένα απορροφητήρα τύπου σερπαντίνας με μία είσοδο και μία έξοδο για το ρευστό μεταφοράς θερμότητας. Ο απορροφητήρας αυτός τοποθετήθηκε κατάλληλα στο φ/β πλαίσιο, έτσι ώστε να έχει πλήρη επαφή η χάλκινη επιφάνεια με την πίσω πλευρά του φ/β πλαισίου. Στη συνέχεια εφαρμόστηκε

μόνωση 1 cm πίσω από τον απορροφητήρα, για μείωση των θερμικών απωλειών της πίσω πλευράς. Με την τροποποίηση αυτή το φ/β πλαίσιο έχει διαμορφωθεί σαν ένας PV/T συλλέκτης. Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του εμπορικά διαθέσιμου φ/β πλαισίου που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα είναι :  $P_{max} = 76.6 \text{ W}$ ,  $V_{mp} = 17.3 \text{ V}$ ,  $I_{mp} = 4.4 \text{ A}$ ,  $V_{oc} = 21.4 \text{ V}$  και  $I_{sc} = 5.0 \text{ A}$ .

Έτσι όπως κατασκευάστηκε ο PV/T συλλέκτης, τοποθετήθηκε μαζί με ένα πανομοιότυπο φ/β πλαίσιο, σε μια μεταλλική κεκλιμένη βάση νότιου προσανατολισμού και  $40^\circ$  κλίση, που είχε διαμορφωθεί για το σκοπό αυτό στην οροφή του εργαστηρίου. Στο σύστημα αυτό των δυο συλλεκτών τοποθετήθηκαν αρκετά αισθητήρια, τα οποία συνδέθηκαν κατάλληλα σε μία αυτόματη μονάδα συλλογής και επεξεργασίας πειραματικών δεδομένων, η οποία σαρώνει τα κανάλια κάθε πρώτο λεπτό και αποθηκεύει τις μέσες τιμές κάθε δυο πρώτα λεπτά. Τα αισθητήρια αυτά είναι: Pt-100 για μέτρηση της θερμοκρασίας στην είσοδο, στην έξοδο και στην πλάτη του PV/T, στην πλάτη του φ/β πλαισίου και σε αεριζόμενο κλωβό για την θερμοκρασία περιβάλλοντος, ένα πυρανόμετρο στην κεκλιμένη επιφάνεια των φ/β για μέτρηση της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας, ένα κυπελλοφόρο ανεμόμετρο για μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου στο επίπεδο των φ/β, και κατάλληλοι αισθητήρες για μέτρηση της τάσης και έντασης από το PV/T και το φ/β πλαίσιο. Επίσης χρησιμοποιήθηκε μία αντλία, η οποία βαθμονομήθηκε για το σκοπό αυτό, προκειμένου να κυκλοφορεί το νερό με μία παροχή  $0.021 \text{ kg/s}$  από μία δεξαμενή των 20 λίτρων, στο εσωτερικό του σωλήνα του απορροφητήρα. Το νερό στη δεξαμενή ανανεώνεται συνεχώς από το νερό του δικτύου, ενώ το νερό από την έξοδο του απορροφητήρα απορρίπτεται στην υδρορροή.

Ο συλλέκτης PV/T είναι συνδεδεμένος σε μπαταρία 90 Ah, μέσω ενός ελεγκτή φόρτισης που διαθέτει σύστημα MPPT. Το ίδιο ισχύει και για το φ/β πλαίσιο το οποίο είναι συνδεδεμένο σε ξεχωριστή ίδια μπαταρία και ίδιο ελεγκτή φόρτισης.

Σε κάθε μπαταρία είναι συνδεδεμένος λαμπτήρας πυρακτώσεως 60W συνεχούς ρεύματος, ο οποίος ενεργοποιείται κατάλληλα μέσω χρονοδιακόπτη, ώστε να εκφορτίζει τις μπαταρίες στη διάρκεια της νύκτας. Με τον τρόπο αυτό οι μπαταρίες κάθε πρωί, πριν την έναρξη του πειράματος, βρίσκονται στο ίδιο χαμηλό επίπεδο φόρτισης.

Μια σειρά από πειραματικές μετρήσεις έγιναν στην διάρκεια της Άνοιξης του 2017 και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο.

### 3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Από τις ημέρες των πειραματικών μετρήσεων, έγινε επιλογή τριών ημερών με διαφορετικό προφίλ, και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 1.

Ημερομηνία	Ολική ηλιακή ενέργεια ανά επιφάνεια συλλέκτη kWh	Μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος $^\circ\text{C}$	Μέση ταχύτητα ανέμου m/s
01.06.2017	3.51	28.75	1.74
16.05.2017	1.68	22.70	2.70
19.05.2017	3.83	21.50	3.30

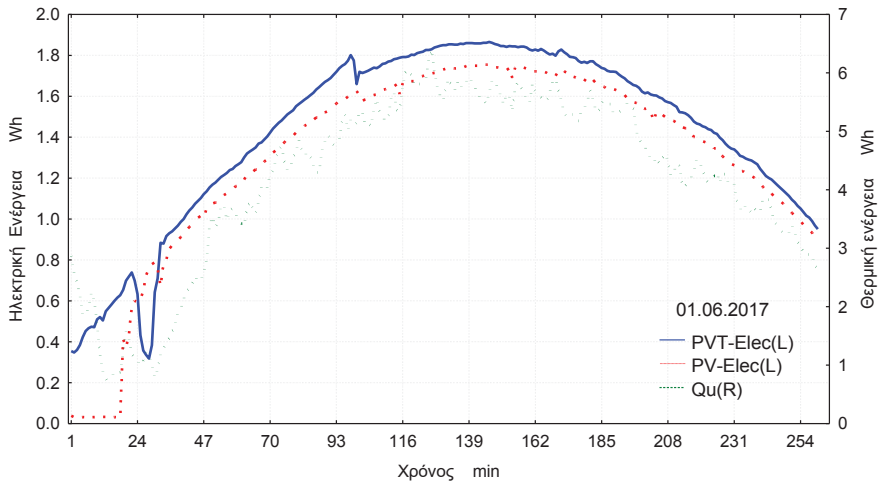
Πίνακας 1. Κλιματικά δεδομένα τριών χαρακτηριστικών ημερών.

Η Ηλεκτρική ενέργεια από τον PV/T συλλέκτη και το φ/β πλαίσιο καθώς και η θερμική ενέργεια από το PV/T, για τις τρεις χαρακτηριστικές ημέρες παρουσιάζονται στα διαγράμματα 1,2 και 3 αντίστοιχα.

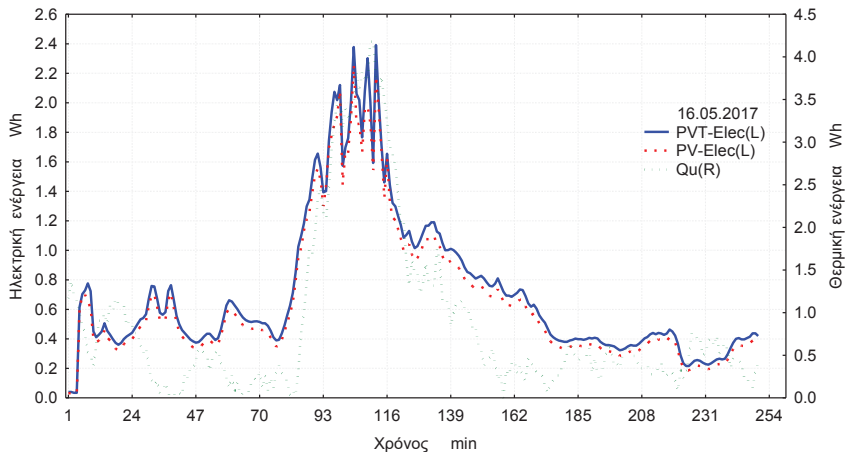
Από τα διαγράμματα αυτά παρατηρείται ότι ανεξάρτητα από τις καιρικές συνθήκες που επικρατούσαν κάθε ημέρα, η ηλεκτρική ενέργεια από τον PV/T συλλέκτη υπερτερεί έναντι εκείνης από το φ/β πλαίσιο. Η υπεροχή αυτή είναι 9.03%, 8.98% και 7.49% αντίστοιχως για κάθε μία από τις χαρακτηριστικές ημέρες. Αξίζει να αναφερθεί ότι όλη την περίοδο των πειραματικών μετρήσεων υπήρχε υπεροχή του PV/T συλλέκτη, στην παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, η οποία κυμάνθηκε από 7.1% μέχρι 10.2% σε ημερήσια βάση. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το διάγραμμα 4, όπου στην διάρκεια των τριών ημερών, η μέση θερμοκρασία του PV/T συλλέκτη ήταν πάντοτε μικρότερη εκείνης του φ/β πλαισίου. Το εύρος διακύμανσης αυτής της θερμοκρασίας για όλη την περίοδο των μετρήσεων είναι για τον PV/T συλλέκτη από  $25.6^\circ\text{C}$  μέχρι  $29.9^\circ\text{C}$ , ενώ για το φ/β πλαίσιο από  $27.6^\circ\text{C}$  μέχρι

44.27 °C. Επίσης, παράλληλα με την ηλεκτρική παραγωγή, ο PV/T συλλέκτης είχε και θερμική παραγωγή, η οποία για τις εξεταζόμενες ημέρες ήταν 1088.31 Wh, 82.66 Wh και 673.62 Wh αντιστοίχως.

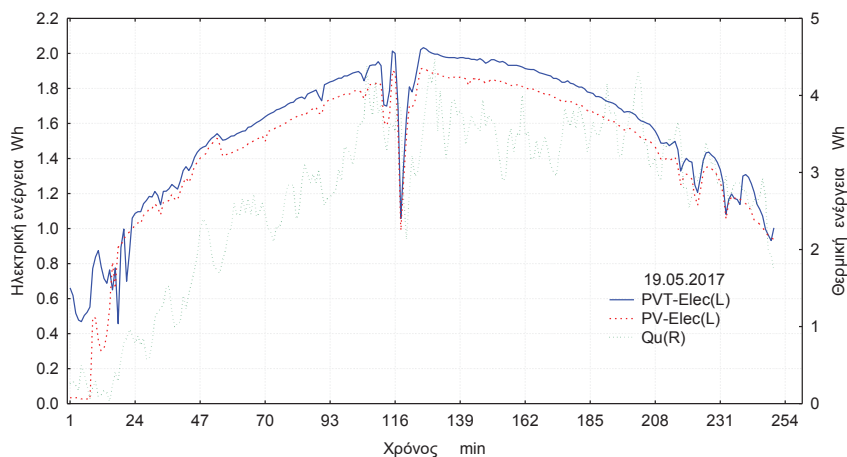
Από την σύγκριση των διαγραμμάτων 1 και 3, και με την βοήθεια του πίνακα 1, παρατηρείται ότι, παρόλο ότι η ολική ηλιακή ενέργεια που δέχθηκε η επιφάνεια των φ/β στις 19.05.2017 είναι μεγαλύτερη εκείνης της 01.06.2017, η παραγόμενη θερμική ενέργεια την ημέρα αυτή (01.06.2017) είναι μεγαλύτερη. Η εξήγηση είναι ότι στις 19.05.2017 η ταχύτητα του ανέμου είναι περίπου διπλάσια εκείνης της 01.06.2017, αλλά και η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι μικρότερη, με αποτέλεσμα οι θερμικές απώλειες του PV/T συλλέκτη να είναι σημαντικές ώστε να μην του επιτρέπουν να αυξήσει την θερμική παραγωγή. Έτσι, η ημερήσια θερμική του απόδοση είναι 17.6%, έναντι 31% που παρουσίασε για την 01.06.2017



Διάγραμμα 1. Ηλεκτρική ενέργεια από PVT και PV καθώς και θερμική ενέργεια (01.06.2017)



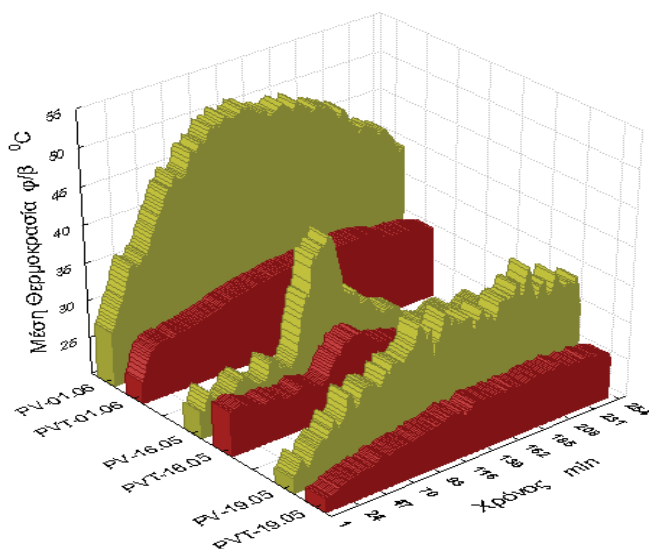
Διάγραμμα 2. Ηλεκτρική ενέργεια από PVT και PV καθώς και θερμική ενέργεια (16.0.2017)



Διάγραμμα 3. Ηλεκτρική ενέργεια από PVT και PV καθώς και θερμική ενέργεια (19.05.2017)

Από το διάγραμμα 2 και σε συνδυασμό με τον πίνακα 1, συνάγεται ότι πρόκειται για μια ημέρα με έντονη συννεφιά, εκτός κάποιου μικρού διαστήματος με ήλιο. Παρόλα αυτά, ο PV/T συλλέκτης υπερτερεί στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Όμως, όπως είναι αναμενόμενο η θερμική παραγωγή του είναι μειωμένη διότι εκτός από την μειωμένη ακτινοβολία, υπάρχει σχετικά χαμηλή, για την εποχή, θερμοκρασία περιβάλλοντος, αλλά και λίγο ενισχυμένος άνεμος. Έτσι, η ημερήσια θερμική του απόδοση είναι αρκετά χαμηλή (4.92%).

Στο σχήμα 4 παρουσιάζεται η διακύμανση των μέσων θερμοκρασιών για το PV/T και PV, στις τρεις εξεταζόμενες ημέρες. Είναι εμφανές ότι για τις τρεις αυτές ημέρες η μέση θερμοκρασία της πλάτης του PV/T είναι αρκετά χαμηλότερη από την αντίστοιχη του PV.



Διάγραμμα 4. Μέση θερμοκρασία PV/T και PV για τις εξεταζόμενες ημέρες

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο χάλκινος απορροφητήρας που κατασκευάστηκε και προσαρμόστηκε στην πίσω πλευρά ενός εμπορικού φ/β πλαισίου, έδειξε ότι μπορεί να αυξήσει την ηλεκτρική παραγωγή του φ/β, ενώ παράλληλα να παράγει και θερμική ενέργεια για νερό, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ανάλογα με τις απαιτήσεις.

Για τα ελληνικά δεδομένα, ένα τέτοιο σύστημα, θα είχε πολλαπλά οφέλη όχι μόνο για τον καταναλωτή αλλά και για το περιβάλλον.

Η υπεροχή του PV/T συλλέκτη, στη ηλεκτρική παραγωγή κυμάνθηκε για όλη την περίοδο των μετρήσεων από 6.64% μέχρι 10.2%, ενώ η θερμική του απόδοση από 4.92% μέχρι 31%.

Η ταχύτητα του ανέμου και η εξωτερική θερμοκρασία επηρεάζουν σημαντικά την συμπεριφορά του PV/T συλλέκτη.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Sok, E., Zhuo, Y., Wang, S., 2010, "Performance and Economic Evaluation of a Hybrid Photovoltaic/Thermal Solar System in Northern China", World Academy of Science, Engineering and Technology, 72.

[2] Zhang, X., Zhao, X., Smith, S., Xu, J., Yu, X., 2012, "Review of R&D progress and practical application of the solar photovoltaic/thermal (PV/T) technologies", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16 (1), 599-617.

[3] Dubey, S., Solanki, S.C., Tiwari, A., 2009, "Energy and exergy analysis of PV/T air collectors connected in series", Energy and Buildings, 41 (8), pp. 863-870.

[4] Axaopoulos, P., and Fylladitakis, E., 2013, "Performance and economic evaluation of a hybrid photovoltaic/thermal solar system for residential applications", Energy and Buildings 65, pp. 488-496.

[5] Zondag, H. A., 2008, "Flat-plate PV-Thermal collectors and systems: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 12, no. 4, pp. 891-959.

[6] Abdul Hamid, S., Yusof Othman, M., Sopian, K., and Zaidi, S.H., 2014 "An overview of photovoltaic thermal combination (PV/T combi) technology," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 38, pp. 212-222.

[7] Moradi, K., Ali Ebadian, M., and Lin, C.X., 2013 "A review of PV/T technologies: Effects of control parameters," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 64, pp. 483-500.

[8] Charalambous, P.G., Maidment, G.G., Kalogirou, S.A., and Yiakoumetti, K., 2007, "Photovoltaic thermal (PV/T) collectors: A review," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 27, no. 2-3, pp. 275-286.

[9] Rossi, C., Tagliafico, L.A., Scarpa, F., and Bianco, V., 2013, "Experimental and numerical results from hybrid retrofitted photovoltaic panels," *Energy Convers. Manag.*, vol. 76, pp. 634-644.

[10] Charalambous, P.G., Kalogirou, S.A., Maidment, G.G., and Yiakoumetti, K., 2011, "Optimization of the photovoltaic thermal (PV/T) collector absorber," *Sol. Energy*, vol. 85, no. 5, pp. 871-880.

[11] Zondag, H.A., De Vries, D.W., Van Helden, W.G.J., Van Zolingen, R.J.C., and Van Steenhoven, A.A., 2002, "The thermal and electrical yield of a PV-thermal collector," *Sol. Energy*, vol. 72, no. 2, pp. 113-128.

[12] Ibrahim, A., Othman, M.Y., Ruslan, M.H., Mat, S., Zaharim, A., and Sopian, K., 2010, "Experimental studies on water based Photovoltaic Thermal Collector (PVT)," *Syst. Sci. Simul. Eng.*, pp. 439-443.

- [13] Sandnes B., and Rekstad, J., 2002, "A photovoltaic/thermal (PV/T) collector with a polymer absorber plate. Experimental study and analytical model," *Sol. Energy*, vol. 72, no. 1, pp. 63–73.
- [14] Kroiß, A., Pröbst, A., Hamberger, S., Spinnler, M., Tripanagnostopoulos, Y., and Sattelmayer, T., 2014, "Development of a seawater-proof hybrid photovoltaic/thermal (PV/T) solar collector," *Energy Procedia*, vol. 52, pp. 93–103.
- [15] Wu, S.Y., Zhang, Q.L., Xiao, L., and Guo, F.H., 2011, "A heat pipe photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid system and its performance evaluation," *Energy Build.*, vol. 43, no. 12, pp. 3558–3567.



## ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΦΒ ΠΑΡΚΟΥ 1 MW<sub>p</sub>

Αντώνης Ν. Οικονομόπουλος\*, Γεώργιος Σβεντζίδης, Γεώργιος Τσιλιγκιρίδης

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, ΑΠΘ

\*e-mail: [anoikon@auth.gr](mailto:anoikon@auth.gr)

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα προηγούμενα χρόνια, λόγω του ευνοϊκού επενδυτικού περιβάλλοντος, εγκαταστάθηκαν στη χώρα και λειτουργούν αρκετές χιλιάδες ΦΒ συστήματα, διαφόρων μεγεθών, συνολικής εγκατεστημένης ισχύος στα τέλη του 2017 περί τα 2,60 GW<sub>p</sub>. Οι εγκαταστάσεις αυτές είναι διάσπαρτες στο σύνολο της επικράτειας, τόσο στο Εθνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα όσο και στα αυτόνομα τοπικά συστήματα της Κρήτης, της Ρόδου και των νησιών του Αιγαίου.

Η μέχρι στιγμής ενασχόληση με την αξιολόγηση των εγκαταστάσεων αυτών αφορούσε κυρίως την οικονομική τους απόδοση, ήτοι τα προβλήματα με τα “έσοδα” των παραγωγών/επενδυτών. Η αξιολόγηση της λειτουργίας και της απόδοσης των εγκαταστάσεων αυτών δεν ήταν στις προτεραιότητες των παραγωγών, όπως και των εγκαταστατών, των προμηθευτών εξοπλισμού αλλά και των χρηματοδοτών. Ως αποτέλεσμα οι σχετικές δημοσιευμένες εργασίες είναι περιορισμένες.

Το εύρος των εγκαταστάσεων αυτών, η θέση τους (επί του εδάφους ή επί του κτιρίου), η εγκαταστημένη ισχύς, το σύστημα παρακολούθησης του ήλιου (σταθερής κλίσης, μετακινούμενο μονού ή διπλού άξονα), αλλά και οι επικρατούσες τοπικά κλιματικές συνθήκες, αποδίδουν σε κάθε εγκατάσταση ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και την καθιστούν μοναδική με αποτέλεσμα να διευρύνεται το πεδίο έρευνας και των συγκρίσεων που μπορούν να γίνουν.

Στην παρούσα εργασία γίνεται αξιολόγηση της λειτουργίας σε πραγματικές συνθήκες ενός ΦΒ συστήματος ισχύος 1 MW<sub>p</sub> εγκατεστημένου στη ΒΙΠΕ Σερρών. Η εκτίμηση της απόδοσης και διάφορων άλλων λειτουργικών παραμέτρων γίνεται σε ετήσια, μηνιαία ή ημερήσια/ωριαία βάση αξιοποιώντας μετρήσεις της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας και βασικών κλιματικών μεγεθών.

**Λέξεις Κλειδιά:** Φωτοβολταϊκά, διασυνδεδεμένα ΦΒ συστήματα, απόδοση, συντελεστής λειτουργίας, συντελεστής φόρτισης.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην Ελλάδα από το 2007 και έπειτα υπήρξε ραγδαία ανάπτυξη στις επενδύσεις εγκαταστάσεων ΑΠΕ. Το υψηλό ποσοστό επιδότησης της εγκατάστασης, καθώς επίσης και η συμφέρουσα τιμή πώλησης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας (€/kWh), όπως διαμορφώθηκαν τα πρώτα χρόνια της περιόδου αυτής, είχαν ως αποτέλεσμα μεγάλο αριθμό επενδύσεων. Συγκεκριμένα η εγκατάσταση ΦΒ συστημάτων, είτε επρόκειτο για οικιακά συστήματα ισχύος <math>10\text{kW}\_p</math>, είτε για μεγάλα ΦΒ πάρκα, γνώρισε μεγάλη άνθηση ακόμη και τα πρώτα χρόνια της οικονομικής κρίσης που αντιμετωπίζει η χώρα μας, έως περίπου το 2013 [1]. Το επενδυτικό σκηνικό διαφοροποιήθηκε από εκείνη την χρονιά και έπειτα, καθώς η πτώση της τιμής πώλησης της παραγόμενης kWh, άφησε πολύ μικρότερα περιθώρια κέρδους στους υποψηφίους επενδυτές [2]. Σήμερα, τέλη του 2017, λόγω του ευνοϊκού επενδυτικού περιβάλλοντος των προηγούμενων ετών, έχουν τελικά εγκατασταθεί και λειτουργούν στη χώρα μας αρκετές χιλιάδες ΦΒ συστήματα, διαφόρων μεγεθών, συνολικής εγκατεστημένης ισχύος περί τα 2,60 GW<sub>p</sub> [3].

Η ανάπτυξη των ΦΒ και των άλλων ΑΠΕ στην Ελλάδα, όπως και σε πολλές άλλες χώρες στον κόσμο, επιδοτήθηκε μέσω υβριδικών χρηματοδοτικών εργαλείων, που περιλάμβαναν κρατικές ενισχύσεις ή φοροαπαλλαγές σε συνδυασμό με το Ειδικό Τέλος Μείωσης Εκπομπών Αερίων Ρύπων (ΕΤΜΕΑΡ). Οι επιδοτήσεις προήλθαν, ως επί το πλείστον, από τον κρατικό προϋπολογισμό αλλά και από κονδύλια της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Ε.Ε.) που διατέθηκαν για αυτόν τον σκοπό, καθώς ο στρατηγικός στόχος της τελευταίας είναι η ενεργειακή απεξάρτηση από τις συμβατικές/ρυπογόνες μορφές ενέργειας, όπως ο λιγνίτης, το πετρέλαιο ή/και το φυσικό αέριο. Τα ΦΒ συστήματα γνώρισαν όμως την πιο θεαματική μεταβολή κόστους τα τελευταία χρόνια και από τη θέση της πιο ακριβής μορφής ενέργειας ανταγωνίζονται πλέον τις πιο φθηνές.

Η εγκατάσταση των πρώτων φωτοβολταϊκών πάρκων στην Ελλάδα με σκοπό την πώληση του ρεύματος, ξεκίνησε τον Ιανουάριο του 2007, με αρχικό στόχο η εγκατεστημένη ισχύς να φθάσει τα 1.500 MW<sub>p</sub> έως το τέλος του 2014. Αρχικά, η πλειονότητα των εγκαταστάσεων αφορούσε στην κατηγορία 20–150 kW<sub>p</sub>, ενώ η εγκατάσταση μεγάλων φωτοβολταϊκών συστημάτων (>150 kW<sub>p</sub>) παρουσίασε σταδιακή άνοδο. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα περισσότερα φωτοβολταϊκά συστήματα εγκαταστάθηκαν αρχικά στις βόρειες περιοχές της Ελλάδος [1] και στη συνέχεια στις νότιες, ιδιαίτερα τα μεγάλα συστήματα, καθότι η γεωγραφική αυτή θέση είναι πιο ευνοϊκή για αυτού του είδους τις εγκαταστάσεις.

Οι αρχικοί στόχοι παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές που τέθηκαν από την Ευρωπαϊκή Ένωση για το 2014 επιτεύχθηκαν, με το ενδιαφέρον πλέον να εστιάζεται στους στόχους που έχουν τεθεί για τα τέλη του 2020 [4].

Η μέχρι στιγμής ενασχόληση με την αξιολόγηση των εγκαταστάσεων αυτών αφορούσε κυρίως την οικονομική τους απόδοση, ήτοι τα προβλήματα με τα "έσοδα" των παραγωγών/επενδυτών. Η αξιολόγηση της λειτουργίας και της απόδοσης των εγκαταστάσεων αυτών δεν ήταν στις προτεραιότητες των παραγωγών, όπως και των εγκαταστατών, των προμηθευτών εξοπλισμού αλλά και των χρηματοδοτών. Κατά συνέπεια οι σχετικές δημοσιευμένες εργασίες είναι περιορισμένες. Αφορούν κυρίως την οικονομική και την τεχνική αξιολόγηση της λειτουργίας ΦΒ εγκαταστάσεων σε σχέση με την γεωγραφική τους θέση, τις κλιματικές συνθήκες (θερμοκρασία, ταχύτητα του ανέμου), το είδος του εφαρμοζόμενου συστήματος παρακολούθησης του ήλιου, κτλ.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση της λειτουργίας μιας από τις μεγαλύτερες εγκαταστάσεις Φωτοβολταϊκών Συστημάτων στη Βόρεια Ελλάδα, του ισχύος 1 MW<sub>p</sub> Φωτοβολταϊκού Πάρκου της "Δρομέας ΑΒΕΕΑ" στη ΒΙΠΕ. Σερρών, που υλοποιήθηκε την περίοδο 2012-2013 και συνδέθηκε με το δίκτυο το Μάρτιο του 2013. Στόχος είναι η αξιολόγηση των επιδόσεων της μονάδας με στόχο τον εντοπισμό τυχόν προβλημάτων ή και αστοχιών, όσον αφορά στην απόδοση και τη λειτουργία τους, και η εν γένει εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων από τη λειτουργία αυτών των μονάδων.

## 2. ΤΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

Η εγκατάσταση του εξεταζόμενου ΦΒ πάρκου του "Δρομέα ΑΒΕΕΑ", εταιρείας η οποία δραστηριοποιείται στον τομέα κατασκευής επίπλου γραφείου, βρίσκεται στην περιοχή της ΒΙ.ΠΕ. Σερρών (βλ. εικόνα 1). Το ΦΒ πάρκο, συνολικής ισχύος 1MW<sub>p</sub>, έχει κατασκευαστεί με χρήση

φωτοβολταϊκών πλαισίων πολυκρυσταλλικού πυριτίου, που εδράζονται σε σταθερές μεταλλικές βάσεις. Τα τεχνικά/κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του συστήματος είναι:

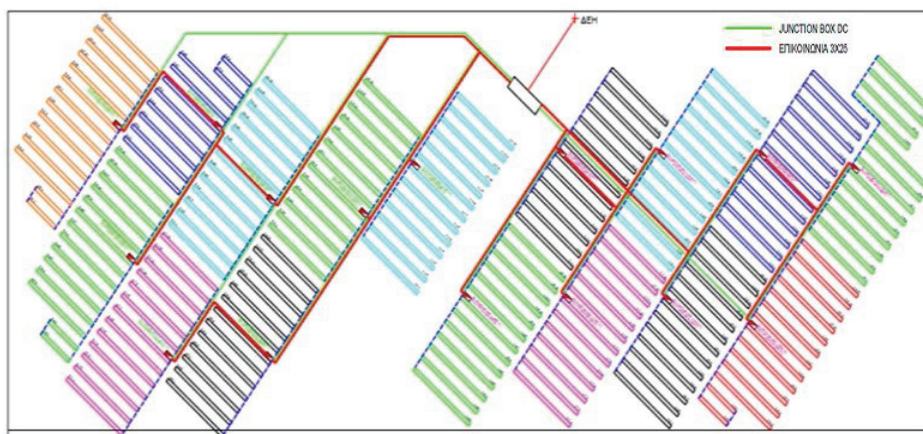
- Συνολική ισχύς: 1 MW<sub>p</sub>.
- ΦΒ πλαίσια: 4.080 τεμ., ισχύος 245 W<sub>p</sub>, διαστάσεων 1.650mm x 990mm, βάρους 19,1 kg, απόδοσης (module efficiency) 15%.
- Προσανατολισμός: νότιος.
- Κλίση πλαισίων: 27°.
- Απόσταση μεταξύ των σειρών των βάσεων: 2,6 m.

Στο ΦΒ πάρκο περιλαμβάνονται επίσης, προκāt κατασκευή για την στέγαση του κεντρικού πίνακα, των inverter και των μετασχηματιστών, κατασκευή ερμαρίου για εγκατάσταση μετρητή της ΔΕΗ, επιφανειακά μεταλλικά κανάλια και σχάρες για τη διέλευση των καλωδίων προς το χώρο των inverter.

Το ΦΒ πάρκο συνδέεται με το δίκτυο της ΔΕΗ μέσω δύο Κλάδων που περιλαμβάνουν από ένα μετασχηματιστή (ισχύος 500 kVA, 20kV/300V) και ένα μετατροπέα-inverter (ισχύος 500kW/300V). Κάθε Κλάδος περιλαμβάνει 8 κούτια διακλάδωσης-παραλληλισμού (Junction Boxes), τα οποία είναι συνδεδεμένα παράλληλα μεταξύ τους. Σε κάθε κούτιο παραλληλισμού συνδέονται 13 συστοιχίες (strings) των 20 ΦΒ πλαισίων συνδεδεμένων παράλληλα. Μοναδική εξαίρεση αποτελεί το PV JUNCTION BOX 2.4 του Κλάδου 2 που περιλαμβάνει 9 συστοιχίες, σε αντίθεση με όλα τα άλλα που περιλαμβάνουν 13. Η τοπογραφική και ηλεκτρολογική κάτοψη του ΦΒ πάρκου φαίνεται στην εικόνα 2.



Εικόνα 1: Χωροθέτηση ΦΒ πάρκου.



Εικόνα 2: Τοπογραφική και ηλεκτρολογική κάτοψη ΦΒ πάρκου.

Το ΦΒ πάρκο διαθέτει σύστημα τηλεμετρίας για την παρακολούθηση και εποπτεία της λειτουργίας του, το οποίο εγκαταστάθηκε τον Αύγουστο του 2013. Μέσω του συστήματος τηλεμετρίας, γίνονται διαδίκτυακά διαθέσιμα στοιχεία όπως, η στιγμιαία ηλεκτροπαραγωγή, ανά 10', η ημερήσια συνολική

παραγωγή στο τέλος της κάθε ημέρας, η θερμοκρασία αέρα περιβάλλοντος και η θερμοκρασία των ΦΒ πλαισίων, ανά 15', η εσωτερική θερμοκρασία των χώρων που είναι εγκατεστημένοι οι μετατροπείς και οι μετασχηματιστές, ανά 15'.

Λόγω έλλειψης οργάνου μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας και για την πληρέστερη αξιολόγηση της μονάδας, χρησιμοποιήθηκε εξωτερικό πυρανόμετρο για τη μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας στο επίπεδο των πλαισίων για ικανοποιητικό αριθμό επιλεγμένων ημερών από τον Οκτώβριο 2015 έως τον Ιούνιο 2016. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνταν από την ανατολή μέχρι την δύση του ηλίου, αρχικά με χρονικό βήμα 1' και στη συνέχεια 10'.

### 3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η εκτίμηση της απόδοσης και διάφορων λειτουργικών χαρακτηριστικών ενός ΦΒ Πάρκου γίνεται με βάση μετρήσεις βασικών χαρακτηριστικών λειτουργίας του, που περιλαμβάνουν την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας στο επίπεδο των πλαισίων, τη θερμοκρασία του αέρα και τη θερμοκρασία που αναπτύσσεται στα πλαίσια, και την παραγόμενη από το ΦΒ σύστημα ηλεκτρική ενέργεια.

Οι επιδόσεις της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης εξετάζονται κυρίως μέσω του κανονισμού 61724, που ανέπτυξε η Διεθνής Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή [5], στον οποίο περιγράφονται οι παράμετροι αξιολόγησης της απόδοσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Οι σημαντικότερες από αυτές είναι [6,7]:

- **Τελική Απολαβή (Final Yield,  $Y_F$ )**. Είναι ο λόγος της παραγόμενης ηλεκτρικής (AC) ενέργειας κατά την εξεταζόμενη χρονική περίοδο (ημέρα, μήνας, έτος) προς την εγκατεστημένη ισχύ του συστήματος σε συνθήκες αναφοράς:

$$Y_F = \frac{E_{AC}}{P_{rated}} \quad <1>$$

Όπου:  $E_{AC}$  είναι η παραγόμενη ενέργεια σε kWh/περίοδο (ημέρα, μήνας, έτος), και  $P_{rated}$  είναι η εγκατεστημένη ισχύς του συστήματος, σε kW<sub>p</sub>, σε συνθήκες αναφοράς (συνθήκες STC,  $G_o=1.000 \text{ W/m}^2$ ,  $T_{cell}=25 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Η τελική απόδοση επιτρέπει την σύγκριση παρόμοιων ΦΒ συστημάτων στην ίδια περιοχή.

- **Απολαβή Αναφοράς (Reference Yield,  $Y_R$ )**. Είναι ο λόγος της ολικής προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στο επίπεδο των ΦΒ πλαισίων, προς την ηλιακή ακτινοβολία αναφοράς:

$$Y_R = \frac{H_t}{G_o} \quad <2>$$

Όπου:  $H_t$  είναι η ολική ηλιακή ακτινοβολία στο επίπεδο των ΦΒ πλαισίων (Wh/m<sup>2</sup>),  $G_o$  η ηλιακή ακτινοβολία αναφοράς (1.000 W/m<sup>2</sup>)

- **Συντελεστής Λειτουργικής Απόδοσης (Performance Ratio, PR)**. Είναι ο λόγος της Τελικής προς την Απολαβή Αναφοράς, δηλ. ο λόγος της ενέργειας που παρέχεται στο δίκτυο προς την ενέργεια που το σύστημα θα παρήγαγε εάν λειτουργούσε στις συνθήκες αναφοράς (STC). Παρουσιάζει το κλάσμα της πραγματικά διαθέσιμης/παραγόμενης ενέργειας έπειτα από την αφαίρεση των απωλειών ενέργειας:

$$PR = \frac{Y_F}{Y_R} = \frac{E_{AC} \times G_o}{P_{rated} \times H_t} \quad <3>$$

- **Συντελεστής φόρτισης (Capacity Factor, CF)**. Ορίζεται ως ο λόγος της παραγόμενης (ετήσιας, μηνιαίας, ημερήσιας) ενέργειας προς την ενέργεια που θα παραγόταν εάν το ΦΒ σύστημα λειτουργούσε καθ' όλη την εξεταζόμενη περίοδο στην ονομαστική ισχύ για 24h την ημέρα:

$$CF = \frac{E_{AC}}{P_{rated} \times N_d \times N_h} \quad <4>$$

Όπου:  $N_d$  είναι ο αριθμός ημερών της εξεταζόμενης περιόδου,  $N_h$  είναι ο αριθμός ωρών της ημέρας, 24h/d.

Εκτός των ανωτέρω υπολογίζονται δύο ακόμη παράγοντες που εκφράζουν την απόδοση του συστήματος:

- **Βαθμός (ενεργειακής) απόδοσης του συστήματος (System Efficiency,  $n_s$ ).** Ορίζεται ως ο λόγος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας προς την συνολική συλλεγόμενη ηλιακή ενέργεια από το ΦΒ Πεδίο:

$$n_s = \frac{E_{AC}}{H_t \times A_{PV}} \quad <5>$$

Όπου:  $A_{PV}$  είναι η συνολική επιφάνεια των ΦΒ πλαισίων ( $m^2$ ).

- **Αποφυγή εκπομπών CO<sub>2</sub> (Avoided CO<sub>2</sub> emissions,  $EM_{CO_2,AV}$ ).** Εκφράζει, σε τόνους τις ποσότητες CO<sub>2</sub> που δεν εκπέμπονται (ή αλλιώς που αποφεύγονται), λόγω της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από το φωτοβολταϊκό σύστημα, που υποκαθιστά ίση ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από το Ηλεκτρικό Σύστημα της χώρας από συμβατικά καύσιμα (λιγνίτη, πετρέλαιο, φυσικό αέριο).

$$EM_{CO_2,AV} = \frac{E_{AC} * F_C}{10^6} \quad <6>$$

Όπου:  $F_C$  είναι ο μέσος ανά έτος συντελεστής εκπομπής CO<sub>2</sub> του ηλεκτρικού συστήματος (g/kWh). Ο συντελεστής  $F_C$  υπολογίζεται από την αφαίρεση των εκπομπών CO<sub>2</sub> του κύκλου ζωής του ΦΒ συστήματος (οι οποίες υπολογίζονται σε 53g CO<sub>2</sub>,eq/kWh για τα συστήματα Poly-Si (πολυκρυσταλλικού πυριτίου) και σε 61 CO<sub>2</sub>,eq/kWh για τα συστήματα Μονο-Si (μονοκρυσταλλικού πυριτίου) [8,9], και από τον συντελεστή εκπομπών του εθνικού δικτύου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, που για την Ελλάδα στο πλαίσιο της εργασίας υπολογίσθηκε ότι την περίοδο 2013-2016 κυμάνθηκε από 935 έως 1.160 gCO<sub>2</sub>/kWh [3,10].

#### 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στη συνέχεια παρουσιάζονται μετρούμενα μεγέθη και υπολογισμένοι δείκτες, όπως η ηλιακή ακτινοβολία στο επίπεδο των ΦΒ πλαισίων, η ηλεκτροπαραγωγή, η απόδοση και οι άλλοι δείκτες αξιολόγησης της λειτουργίας του ΦΒ πεδίου. Εξετάζονται αφενός ημερήσιες τιμές καθώς και η «στιγμιαία» και ωριαία διακύμανσή τους κατά τη διάρκεια των επιλεγμένων ημερών δειγματοληπτικών μετρήσεων της περιόδου Οκτ. 2015 – Ιούν. 2016 και αφετέρου η διαχρονική εξέλιξη και η μηνιαία διακύμανση κατά την εξεταζόμενη περίοδο λειτουργίας του συστήματος Αυγ. 2013 – Απρ. 2017.

##### 4.1. Μετρήσεις σε επιλεγμένες ημέρες της περιόδου Οκτώβριος 2015 – Ιούνιος 2016

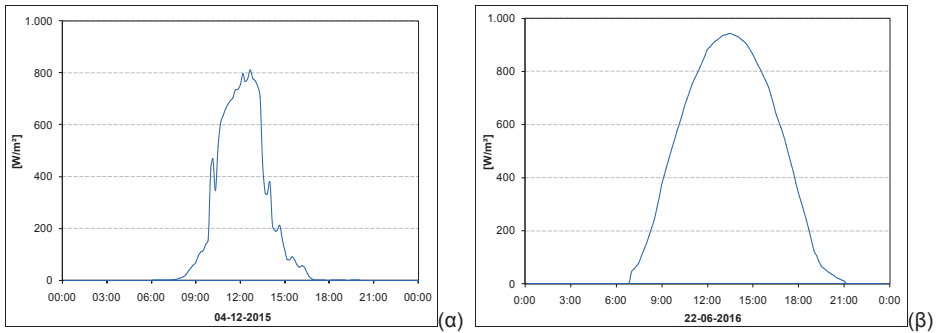
Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις κατά τη διάρκεια 16 αντιπροσωπευτικών ημερών της περιόδου Οκτώβριος 2015 – Ιούνιος 2016.

Στην εικόνα 3 παρουσιάζεται η διακύμανση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας (με βήμα 10') ενδεικτικά κατά τη διάρκεια (α) μιας χειμερινής και (β) μιας θερινής ημέρας.

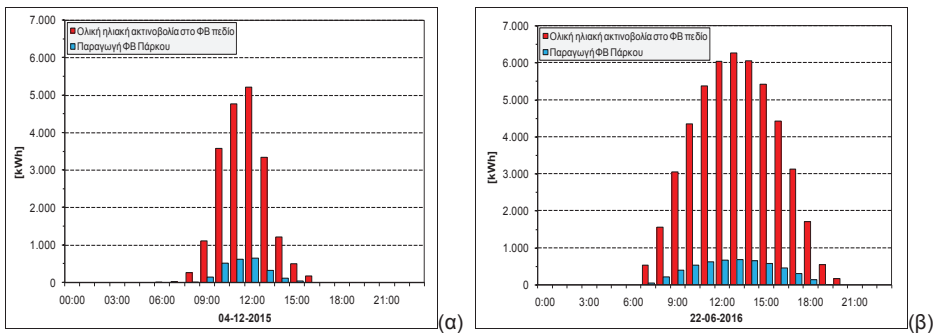
Στην εικόνα 4 παρουσιάζεται για τις ίδιες ενδεικτικές ημέρες η ωριαία διακύμανση της προσπίπτουσας ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στο ΦΒ πεδίο καθώς και η ηλεκτροπαραγωγή του ΦΒ συστήματος.

Στην εικόνα 5 παρουσιάζεται ο μέσος ωριαίος βαθμός απόδοσης του ΦΒ πάρκου κατά τις ίδιες ημέρες. Παρατηρούμε πως η απόδοση του συστήματος ανέρχεται κατά τις πρωινές ώρες έως και 14% περίπου, ενώ κατά την περίοδο των μετρήσεων, η μέση ημερήσια απόδοση κυμαίνεται από 10,4 - 13,1%, χαμηλότερα από τον ονομαστικό βαθμό απόδοσης 15% που δίνει ο κατασκευαστής (εικόνα 6). Είναι εμφανής η επίδραση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος στην ενεργειακή απόδοση του συστήματος, που σημειώνει τις μικρότερες τιμές στις πιο ζεστές ώρες/ημέρες.

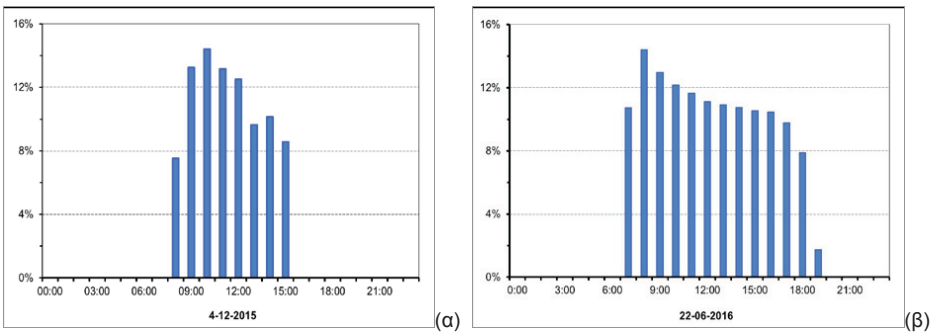
Στη διαμόρφωση του (μειωμένου) βαθμού απόδοσης συμβάλλουν (και) οι απώλειες που οφείλονται σε μειωμένη διαπερατότητα-σκόνη, "κιτρίνισμα" προστατευτικού καλύμματος, παλαίωση πλακετών, σε φαινόμενα αλληλοσκίασης, μη ταύτιση τάσης και στις απώλειες του Μετατροπέα και του Μετασχηματιστή.



Εικόνα 3: Ηλιακή Ακτινοβολία (μετρήσεις ανά 10min) στις (α) 4/12/2015 και (β) 22/6/2016.

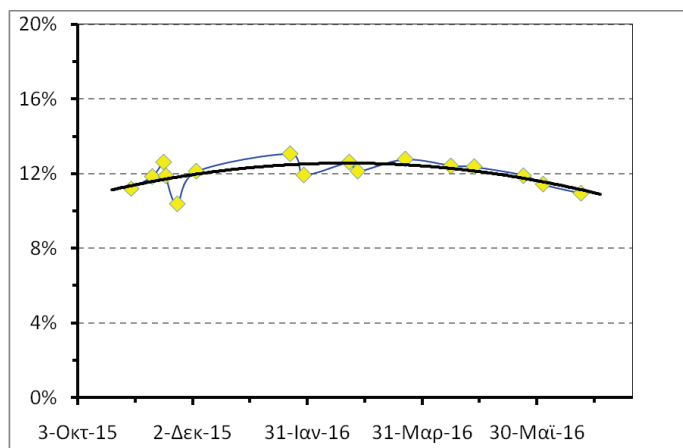


Εικόνα 4: Ολική ηλιακή ακτινοβολία στο ΦΒ Πεδίο και ηλεκτροπαραγωγή του ΦΒ Πάρκου (Μ.Ο. ώρας) στις (α) 4/12/2015 και (β) 22/6/2016.

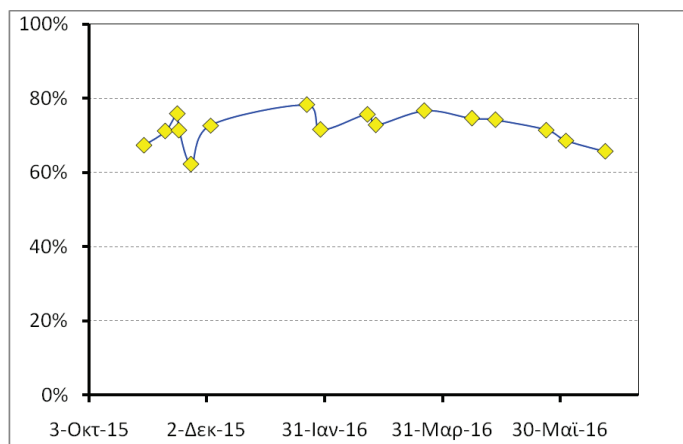


Εικόνα 5: Μέσος ωριαίος βαθμός απόδοσης ΦΒ Πάρκου στις (α) 4/12/2015 και (β) 22/6/2016.

Στην εικόνα 7 παρουσιάζεται η μεταβολή του μέσου ημερήσιου συντελεστή λειτουργίας (PR) του συστήματος κατά την διάρκεια της περιόδου μετρήσεων, ο οποίος ακολουθεί τη μεταβολή της απόδοσης του ΦΒ συστήματος καθώς αντιπροσωπεύει το κλάσμα της πραγματικά διαθέσιμης/παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας έπειτα από την αφαίρεση των απωλειών (μετατροπής, κτλ) του συστήματος.



Εικόνα 6: Μεταβολή της μέσης ημερήσιας απόδοσης του συστήματος κατά την διάρκεια της περιόδου μετρήσεων, Οκτ. 2015 - Ιούν. 2016.



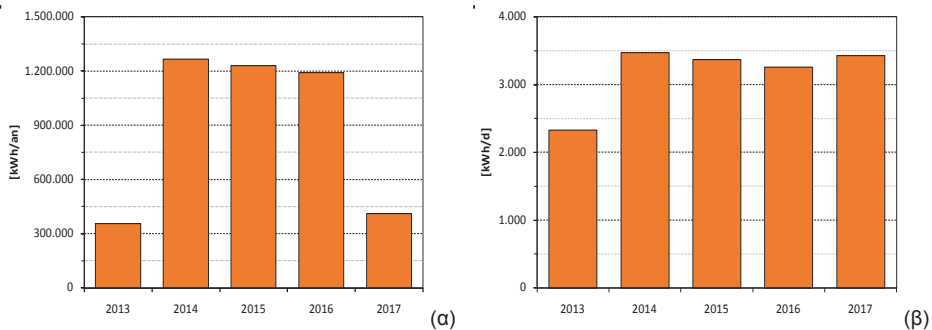
Εικόνα 7: Μεταβολή του μέσου ημερήσιου συντελεστή λειτουργίας (PR) του συστήματος κατά την διάρκεια της περιόδου μετρήσεων, Οκτ. 2015 - Ιούν. 2016.

#### 4.2. Διαχρονική εξέλιξη περιόδου Αύγουστος 2013 – Απρίλιος 2017

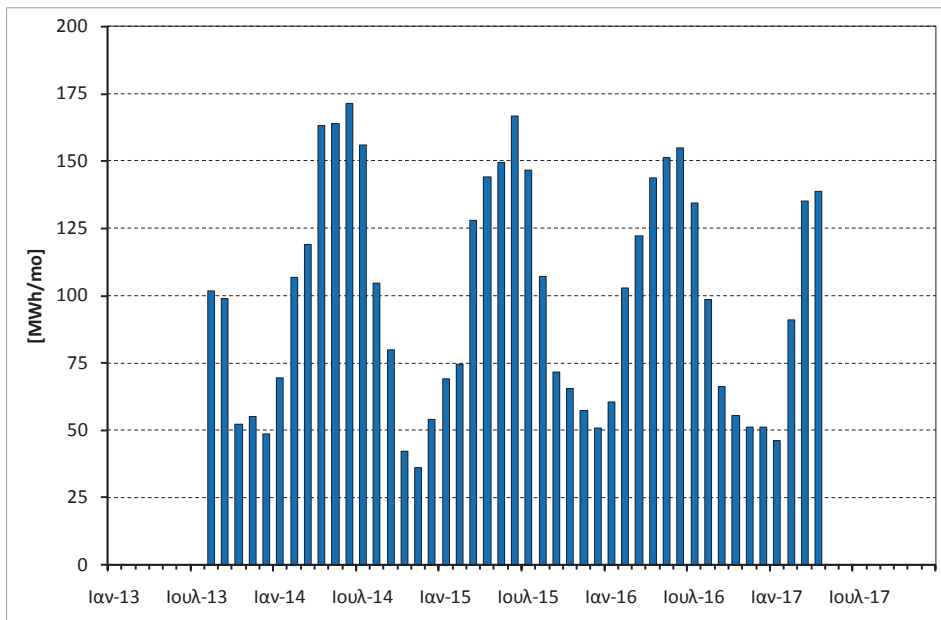
Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η διαχρονική εξέλιξη και η μηνιαία διακύμανση της ηλεκτροπαραγωγής, των εξεταζόμενων δεικτών  $Y_F$ , CF και της αποφυγής εκπομπών  $CO_2$  κατά την εξεταζόμενη περίοδο λειτουργίας του ΦΒ πάρκου (Αύγουστος 2013 έως και Απρίλιος 2017).

Στην εικόνα 8 παρουσιάζεται η εξέλιξη (α) της συνολικής και (β) της μέσης ανά ημέρα ετήσιας ηλεκτροπαραγωγής κατά την εξεταζόμενη περίοδο. Το σύστημα παρουσιάζει μια σταθερότητα στην ηλεκτροπαραγωγή με μία μέση ημερήσια τιμή (3.370 kWh/d). Η μικρή διακύμανση της τιμής από το 2014 έως το 2017 δεν είναι σημαντική και μπορεί να οφείλεται σε μη συστηματικούς, π.χ. κλιματικούς, παράγοντες.

Στην εικόνα 9 παρουσιάζεται η μηνιαία διακύμανση της ηλεκτροπαραγωγής κατά την εξεταζόμενη περίοδο, η οποία ακολουθεί την εποχική διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας.



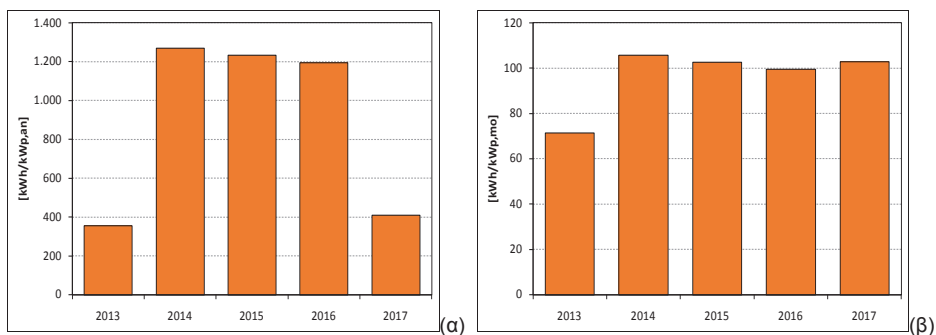
Εικόνα 8: Εξέλιξη (α) της ετήσιας και (β) της μέσης ανά ημέρα ηλεκτροπαραγωγής κατά την εξεταζόμενη περίοδο (Αύγουστος 2013 - Απρίλιος 2017).



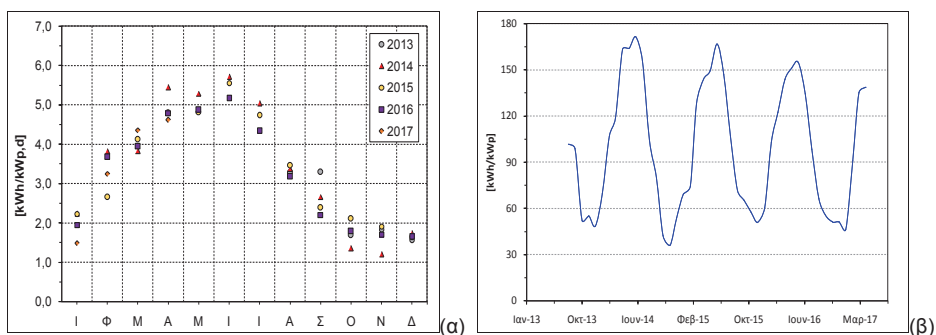
Εικόνα 9: Μηνιαία διακύμανση της ηλεκτροπαραγωγής κατά την εξεταζόμενη περίοδο (Αύγουστος 2013 - Απρίλιος 2017).

Στην εικόνα 10 παρουσιάζεται η εξέλιξη (α) της ετήσιας και (β) της μέσης ανά μήνα τιμής της Τελικής Απολαβής του συστήματος,  $Y_F$ , κατά την εξεταζόμενη περίοδο. Το σύστημα παρουσιάζει μια σταθερότητα και ακολουθεί, φυσιολογικά, την εξέλιξη της ηλεκτροπαραγωγής, καθώς καθορίζεται τόσο από το ύψος όσο και από τη διακύμανσή της.

Στην εικόνα 11 παρουσιάζεται η μηνιαία διακύμανση (α) της μέσης ημερήσιας  $[kWh/kW_p, d]$  και (β) της μέσης μηνιαίας  $[kWh/kW_p, mo]$  τιμής της Τελική Απολαβής του ΦΒ συστήματος κατά την εξεταζόμενη περίοδο (Αύγουστος 2013 - Απρίλιος 2017). Παρατηρούμε ότι η μέση ημερήσια τιμή κυμαίνεται κατά τους χειμερινούς μήνες από 1,2-1,8  $kWh/kW_p, d$  και κατά τους θερινούς μήνες από 5,2-5,7  $kWh/kW_p, d$ . Οι αντίστοιχες μέσες μηνιαίες τιμές κυμαίνονται από 40-50  $kWh/kW_p, mo$  κατά τους χειμερινούς μήνες έως 155-170  $kWh/kW_p, mo$  κατά τους θερινούς. Τα αποτελέσματα αυτά είναι εμφανώς μικρότερα από μετρήσεις συστημάτων που έγιναν σε νοτιότερες περιοχές της χώρας [11].

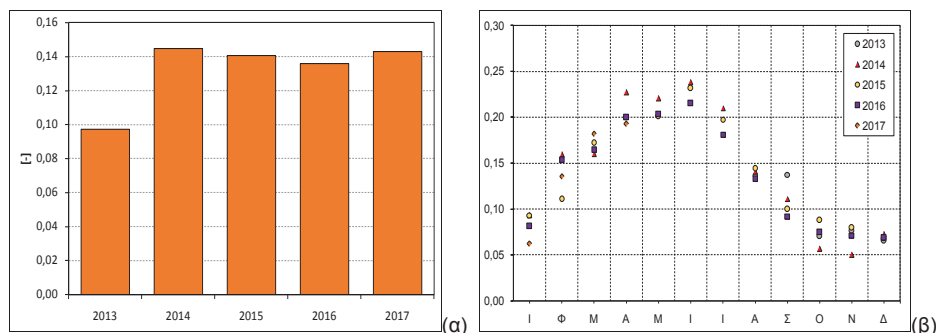


Εικόνα 10: Εξέλιξη (α) της ετήσιας και (β) της μέσης ανά ημέρα τιμής του δείκτη Τελικής Απολαβής,  $Y_F$ , κατά την εξεταζόμενη περίοδο (Αύγουστος 2013 - Απρίλιος 2017).



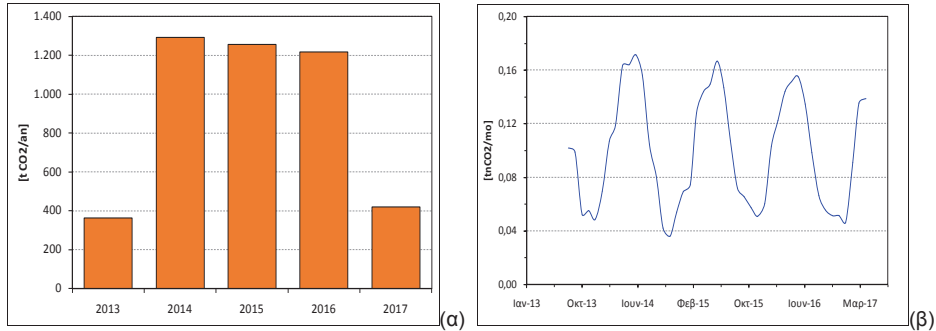
Εικόνα 11: Μηνιαία διακύμανση (α) της μέσης ημερήσιας και (β) της μέσης μηνιαίας Τελικής Απολαβής του συστήματος,  $Y_F$ , κατά την εξεταζόμενη περίοδο (Αύγουστος 2013 - Απρίλιος 2017).

Στην εικόνα 12 παρουσιάζεται η εξέλιξη της μέσης ετήσιας και της μέσης ανά μήνα τιμής του Συντελεστή Φόρτισης,  $CF$ , κατά την εξεταζόμενη περίοδο. Το σύστημα παρουσιάζει μια σταθερότητα στη διαχρονική εξέλιξη της τιμής του συντελεστή φόρτισης (0,135 - 0,145) και φυσιολογική μηνιαία διακύμανση (0,05-0,10 τους χειμερινούς, 0,20-0,25 τους θερινούς μήνες) καθώς καθορίζεται κυρίως από την εξέλιξη και από τη μηνιαία διακύμανση της ηλεκτροπαραγωγής.



Εικόνα 12: Εξέλιξη (α) της μέσης ετήσιας και (β) της μέσης μηνιαίας τιμής Συντελεστή Φόρτισης,  $CF$ , του συστήματος κατά την εξεταζόμενη περίοδο (Αύγουστος 2013 - Απρίλιος 2017).

Στην εικόνα 13 παρουσιάζεται η εξέλιξη (α) της μέσης ετήσιας και (β) της μέσης μηνιαίας αποφυγής CO<sub>2</sub>, λόγω της ηλεκτροπαραγωγής του ΦΒ συστήματος κατά την εξεταζόμενη περίοδο. Τόσο η ετήσια εξέλιξη όσο και η μηνιαία διακύμανση ακολουθούν τις αντίστοιχες της ηλεκτροπαραγωγής. Επιπλέον η ετήσια εξέλιξη επηρεάζεται και από την αντίστοιχη εξέλιξη της ειδικής εκπομπής CO<sub>2</sub>, g/kWh.



Εικόνα 13: Εξέλιξη (α) της ετήσιας και (β) της μηνιαίας αποφυγής εκπομπών CO<sub>2</sub>, λόγω της ηλεκτροπαραγωγής του ΦΒ συστήματος κατά την εξεταζόμενη περίοδο (Αύγουστος 2013 - Απρίλιος 2017).

### 3.5. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΟΥ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΆΛΛΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Για την αξιολόγηση της λειτουργίας του εξεταζόμενου ΦΒ πάρκου έγινε σύγκριση με τις επιδόσεις άλλων συστημάτων συγκρίσιμης ισχύος από τη βιβλιογραφία. Για τη σύγκριση χρησιμοποιήθηκαν οι συντελεστές/δείκτες  $Y_f$ ,  $\eta_s$ , PR και CF. Για το εξεταζόμενο σύστημα οι παράμετροι αυτοί υπολογίστηκαν τόσο με βάση τα ιστορικά δεδομένα της εξεταζόμενης περιόδου όσο και με βάση τις μετρήσεις κατά τη διάρκεια των 16 επιλεγμένων ημερών.

Οι δείκτες που υπολογίστηκαν βάση της πλήρους περιόδου λειτουργίας έχουν τιμές που κυμαίνονται στα πλαίσια των τιμών της βιβλιογραφίας προς τα ανώτερα όρια. Οι δείκτες που υπολογίστηκαν από τις μετρήσεις των επιλεγμένων ημερών (Οκτ. 2015 – Ιούν. 2016) λαμβάνουν τιμές που επίσης κυμαίνονται στα πλαίσια των τιμών της βιβλιογραφίας. Οι τιμές των  $Y_f$  και  $\eta_s$  είναι μεγαλύτερες, ενώ του CF είναι μεγαλύτερη τους ανοιξιάτικους – θερινούς μήνες και μικρότερη τους φθινοπωρινούς – χειμερινούς. Οι τιμές του PR είναι προς τα κατώτερα όρια λόγω έλλειψης μετρήσεων τους μήνες με τη μεγαλύτερη ηλιοφάνεια.

Πίνακας 1: Σύγκριση του συστήματος που αξιολογείται με άλλα συστήματα [12,13,14,15,16].

Θέση εγκατάστασης ΦΒ συστήματος	$P_{PV}$ [kW <sub>p</sub> ]	$Y_f$ [kWh/kW <sub>p</sub> ,yr]	$Y_f$ [h/d]	$\eta_s$ [-]	PR [%]	CF [-]
Khatkar-Kalan, North India	190,0	813,9	2,23	8,30	74,0	-
Crete, Greece	171,0	1.335,9	2,00 - 5,10	-	67,4	0,15
Lecce, Italy	960,0	1.387,0	-	-	84,4	0,16
Tamilnadu, India	5.000,0	1.752,0	-	-	89,1	0,20
Mae Hong Son, Thailand	500,0	-	2,90 - 4,00	4,00 - 5,00	60,0 - 80,0	-
Singapore, Malaysia	142,5	-	3,10	11,20	81,0	-
Ramagudan, India	10.000,0	-	1,96 - 5,07	12,90	86,1	-
<b>ΦΒ Πεδίο, Σέρρες:</b>						
Βάσει των καταγραφών της περιόδου λειτουργίας (Μ.Ο.)	999,6	1.231	1,21 - 5,71 (3,37)	-	-	1,35 - 1,45 (1,4)
Βάσει μετρήσεων επιλεγμένων ημερών (Μ.Ο.)	-	-	2,07 - 6,33 (4,09)	10,4 - 13,1 (12,0)	62,3 - 78,3 (71,9)	0,09 - 0,26 (0,17)

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ηλεκτροπαραγωγή, η Τελική Απόδοση ( $Y_F$ ) και ο Συντελεστής Απόδοσης (CF) κυμαίνονται σε παρόμοια επίπεδα για τα έτη της εξεταζόμενης περιόδου.

Σε σχέση με άλλα ΦΒ συστήματα συγκρίσιμης ισχύος, οι συντελεστές/δείκτες  $Y_F$ ,  $\eta_s$ , PR και CF έχουν τιμές που κυμαίνονται στα πλαίσια των τιμών της βιβλιογραφίας προς τα ανώτερα όρια.

Ο βαθμός απόδοσης,  $\eta_s$ , της εγκατάστασης κυμάνθηκε μεταξύ 10,4–13,1, χαμηλότερα από τον ονομαστικό βαθμό απόδοσης 15% που δίνει ο κατασκευαστής. Στη διαμόρφωση αυτού του μειωμένου βαθμού απόδοσης συμβάλλουν οι απώλειες που οφείλονται σε μειωμένη διαπερατότητα-σκόνη, "κιτρίνισμα" προστατευτικού καλύμματος, παλαιώση πλακετών, φαινόμενα αλληλοσκίασης, μη ταύτιση τάσης και σε απώλειες Μετατροπεία και Μετασχηματιστή. Σε σύγκριση με άλλες εγκαταστάσεις και στοιχεία από τη βιβλιογραφία κυμαίνεται σε υψηλότερα επίπεδα, με τιμές που είναι υψηλότερες κατά τους μήνες με χαμηλή θερμοκρασία και που μειώνονται κατά τους θερμότερους μήνες του έτους, καθώς επηρεάζεται από την θερμοκρασία των στοιχείων.

Ο Συντελεστής Φόρτισης (CF) αυξάνεται τους θερινούς μήνες λόγω διάρκειας της ηλιοφάνειας, παρουσιάζει δε πανομοιότυπη συμπεριφορά κατά τα εξεταζόμενα έτη με την διαφορά ότι υπάρχει μία μικρή διακύμανση στην ανώτερη τιμή από χρονιά σε χρονιά, γεγονός που οφείλεται στις εκάστοτε καιρικές συνθήκες.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε την εταιρεία ΔΡΟΜΕΑΣ ΑΒΕΕΑ για την παροχή των στοιχείων, την συνεργασία και την πολύτιμη βοήθειά του προσωπικού της.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Tsilingiridis G., Ikonomopoulos A., 2013, First results of incentives policy on grid interconnected photovoltaic systems development in Greece. *Energy Policy* 58, 303–311.
- [2] Υπουργείο Περιβάλλοντος κ Ενέργειας, Υ.Α.Π.Ε./Φ1/1288/9011 περί τροποποίησης της υπ' αριθμ. Υ.Α.Π.Ε./Φ1/οικ.2262/31.01.2012 (Β' 97/31.01.2012) απόφασης του Υπουργού Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής με θέμα «Τιμολόγηση ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από φωτοβολταϊκούς σταθμούς».
- [3] Λ.ΑΓ.Η.Ε., Μηνιαίο Δελτίο Ειδικού Λογαριασμού ΑΠΕ & ΣΗΘΥΑ Διασυνδεδεμένου Συστήματος και Δικτύου, Δεκέμβριος 2017, <http://www.lagie.gr/systema-eggymenon-timon/ape-sithya/miniaia-deltia-eidikoy-logariasmoy-ape-sithya/>
- [4] Υπουργική Απόφαση Α.Υ./Φ1/οικ. 19598/1-10-2010, Απόφαση για την αναλογία εγκατεστημένης ισχύος και την κατανομή της στο χρόνο μεταξύ διαφόρων τεχνολογιών Α.Π.Ε., ΦΕΚ 1630 Β/11-10-2010.
- [5] International standard IEC 61724, Photovoltaic system performance monitoring – Guidelines for measurements, data exchange and analysis.
- [6] D. Okello et al (2015), Analysis of measured and simulated performance data of 3.2 kW<sub>p</sub> grid-connected PV system in Port Elizabeth, South Africa, *Energy Conversion and Management* 100, 10-15.
- [7] A. Allohi et al, 2016, Grid-connected PV systems installed on institutional buildings: Technology comparison, energy analysis and economic performance, *Energy and Buildings* 130, 188-201.
- [8] J. Peng et al, 2013, Review on life cycle assessment of energy payback and greenhouse gas emission of solar photovoltaic systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 19, 255-274.
- [9] G. Hou et al, 2016, Life Cycle assessment of grid-connected photovoltaic power generation from crystalline silicon solar modules in China, *Appl. Energ.* 164, 82-890.
- [10] U.N. National Inventory Submissions 2017, [http://unfccc.int/national\\_reports/annex\\_i\\_ghg\\_inventories/national\\_inventories\\_submissions/items/10116.php](http://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/items/10116.php).
- [11] N. Savvakis and T. Tsoutsos, 2015, "Performance assessment of a thin film photovoltaic system under actual Mediterranean climate conditions in the island of Crete, *Energy* 90 (2015), 1435-1455.
- [12] Chokmaviroj S, Wattanapong R, Suchart Y. Performance of a 500 kW<sub>p</sub> grid connected photovoltaic system at Mae Hong Son Province, Thailand. *Renew Energy* 2006 (31) 19-28.
- [13] Sharma V, Chandel SS. Performance analysis of a 190 kW<sub>p</sub> grid interactive solar photovoltaic power plant in India. *Energy* (2013) (55) (4) 76-85.
- [14] Wittkopf S, Valliappan S, Liu L, Kian Seng A, Seng Chye C.J. Analytical performance monitoring of a 142.5 kW<sub>p</sub> grid-connected rooftop BIPV system in Singapore. *RenEn* (2012) (47) 9-20.
- [15] Kymakis E, Kalykakis S, Papazoglou T. Performance analysis of a grid connected photovoltaic park on the island of Crete. *Energy Convers Manage* 50 (3) (2009) 433-438.
- [16] Kumar B.S., Sudhakar K. Performance evaluation of 10MW grid-connected solar PV power plant in India, *Energy Rep.* 1 (2015) 184-192.



## ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΤΕΓΗΣ 9,8 kW<sub>p</sub>

Βασίλειος Κωνσταντάρας<sup>1</sup>, Κωνσταντίνος Κοσμάς<sup>1</sup>, Χρήστος Σιδηρόπουλος<sup>2</sup>,  
Γεώργιος Τσιλιγκιρίδης<sup>\*1\*</sup>

<sup>1</sup>Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΑΠΘ  
<sup>2</sup>Δημόσια Επιχείρηση Ύδρευσης Αποχέτευσης Βέροιας  
\*e-mail: [tsil@eng.auth.gr](mailto:tsil@eng.auth.gr)

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία διερευνάται η λειτουργία φωτοβολταϊκού (ΦΒ) συστήματος ισχύος 9,8kW<sub>p</sub> συνδεδεμένου με το δίκτυο και εγκατεστημένου στη στέγη του κτηρίου της ΔΕΥΑ Βέροιας.

Η αξιολόγηση της λειτουργίας του ΦΒ συστήματος βασίζεται στον υπολογισμό συγκεκριμένων, διεθνώς καθιερωμένων, παραμέτρων απόδοσης Φ/Β συστημάτων, που υπολογίστηκαν σε ετήσια, μηνιαία και ημερήσια/ωριαία βάση και βοήθησαν στην εξαγωγή συμπερασμάτων, που αφορούν στη λειτουργία του συστήματος. Παράλληλα γίνεται εκτίμηση των ποσοτήτων των εκπομπών CO<sub>2</sub> που αποσποούνται κατά την περίοδο λειτουργίας του συστήματος. Για τον υπολογισμό των παραμέτρων χρησιμοποιήθηκαν αναλυτικά δεδομένα μετρήσεων της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από το σύστημα τηλεμετρίας της εγκατάστασης για την περίοδο 2012-2017, καθώς και δεδομένων ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας του ατμοσφαιρικού αέρα, τα οποία προήλθαν από μετρήσεις, που πραγματοποιήθηκαν επιλεγμένες ημέρες κατά την χρονική περίοδο από τον Ιανουάριο 2017 μέχρι και το Σεπτέμβριο του 2017. Τα συμπεράσματα που εξάγονται, σχετικά με την αποδοτικότητα του συστήματος, συγκρίνονται με ανάλογα αποτελέσματα φωτοβολταϊκών συστημάτων από την βιβλιογραφία.

Με βάση τα συμπεράσματα της αξιολόγησης και την εν γένει εξέταση και παρακολούθηση του ΦΒ συστήματος διατυπώνονται προτάσεις, με στόχο τη διατήρηση ή/και βελτίωση της αποδοτικότητας του συστήματος. Οι σημαντικότερες είναι η ανάγκη εγκατάστασης συστήματος αποτελεσματικότερης επιτήρησης της λειτουργίας της ΦΒ εγκατάστασης, ο συστηματικός έλεγχος και συντήρηση των επιμέρους μερών της, καθώς και ο τακτικός καθαρισμός των πλαισίων από επικαθίσεις.

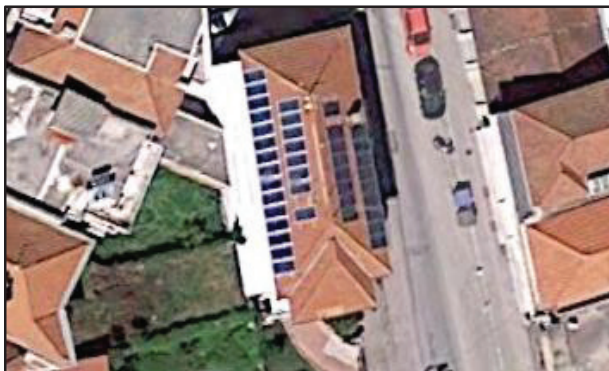
**Λέξεις κλειδιά:** Φωτοβολταϊκό σύστημα, συνδεδεμένο στο δίκτυο, Φωτοβολταϊκά στέγης, Βόρεια Ελλάδα

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι πλέον ευρύτατα διαδεδομένη, εξαιτίας του ευνοϊκού θεσμικού πλαισίου που έχει δημιουργηθεί και των επακόλουθων επενδύσεων με μειωμένο κόστος αγοράς και εγκατάστασής τους, καθώς και τον χρόνο απόσβεσής τους. Λόγω ευνοϊκότερης νομοθεσίας, και ειδικά μετά την Υπουργική Απόφαση 12323, ΦΕΚ Β 1079/04.06.2009, «Ειδικό Πρόγραμμα Ανάπτυξης Φωτοβολταϊκών Συστημάτων σε κτιριακές εγκαταστάσεις και ιδίως σε δώματα και στέγες κτιρίων», έχει αυξηθεί ο αριθμός των συστημάτων που εγκαθίστανται, για παραγωγή ενέργειας και πώληση στο δίκτυο [1]. Μεγάλο μέρος τέτοιου είδους επενδύσεων γίνεται από Οργανισμούς Δημόσιου Συμφέροντος (Σχολεία, Δημοτικές Επιχειρήσεις, κτλ).

Κατά την λειτουργία των συστημάτων αυτών, απαιτείται παρακολούθηση και συντήρησή τους, ώστε να διατηρείται η αποδοτικότητά τους. Λόγω της διεύρυνσης του ενδιαφέροντος για τη χρήση τέτοιου είδους συστημάτων, μεγάλο ποσοστό επενδυτών έχει ελλιπείς γνώσεις επί του αντικειμένου. Πρέπει λοιπόν να αυξηθεί η ενημέρωσή του όσον αφορά στη λειτουργία και συντήρηση των συστημάτων για διατήρηση της αποδοτικότητάς τους για μεγάλο χρονικό διάστημα μετά την εγκατάσταση. Τέτοιου είδους ενέργειες μπορούν να αποφέρουν σημαντικά αποτελέσματα, ενεργειακά και οικονομικά, για τον εκάστοτε ιδιοκτήτη της εγκατάστασης.

Η αξιολόγηση που παρουσιάζεται στην εργασία, αποτελεί μια προσπάθεια αποτίμησης της αποδοτικότητας ενός συστήματος, καθώς και του εντοπισμού πιθανών δυσλειτουργιών. Το σύστημα αυτό βρίσκεται στη στέγη του κτιρίου γραφείων της Δημοτικής Επιχείρησης Ύδρευσης και Αποχέτευσης Βέροιας (ΔΕΥΑΒ) και λειτουργεί τα τελευταία 5 χρόνια. Η στέγη του κτιρίου είναι τετράριχτη και δε σκιάζεται καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας.



Εικόνα 1: Φωτοβολταϊκό σύστημα στη στέγη της ΔΕΥΑΒ.

Το σύστημα αποτελείται από 40 φωτοβολταϊκά πλαίσια ισχύος 245 Watt έκαστο, με συνολική εγκατεστημένη ισχύ ίση με 9,8 kW<sub>p</sub>. Τα πλαίσια αυτά, είναι τοποθετημένα σε δύο συστοιχίες, στην ανατολική και τη δυτική πλευρά της στέγης. Στην ανατολική πλευρά με προσανατολισμό 78° βόρεια-βορειοανατολικά, βρίσκονται 17 πλαίσια τοποθετημένα σε σειρά. Στη δυτική πλευρά βρίσκονται τοποθετημένα 23 πλαίσια σε σειρά και με προσανατολισμό 258° νότια-νοτιοδυτικά. Έχουν γωνία κλίσης ίδια με της στέγης, ίση με 23°. Το σύστημα συνδέεται με έναν αντιστροφέα (inverter) υψηλής απόδοσης και ισχύος 10kW και είναι εφοδιασμένο με σύστημα τηλεμετρίας, που καταγράφει συνεχώς την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, που πωλείται στο δίκτυο.

## 2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Για την αξιολόγηση του εξεταζόμενου Φ/Β συστήματος, τα δεδομένα που αξιοποιήθηκαν, είναι η παραγόμενη από το σύστημα ενέργεια, καθώς και η ηλιακή ακτινοβολία. Στη συγκεκριμένη φωτοβολταϊκή εγκατάσταση, λόγω μη ύπαρξης συστήματος μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας χρειάστηκε να γίνουν μετρήσεις της ηλιακής ακτινοβολίας με φορητό όργανο, για ικανοποιητικό αριθμό επιλεγμένων ημερών.

Συνολικά έγιναν μετρήσεις κατά τη διάρκεια 12 επιλεγμένων ημερών, από τον Ιανουάριο έως και το Σεπτέμβριο του 2017. Κατά τις μετρήσεις αυτές, έλαβε χώρα η καταγραφή της ηλιακής ακτινοβολίας, με φορητό πυρανόμετρο και της θερμοκρασίας του ατμοσφαιρικού αέρα, με θερμόμετρο τύπου ακίδας, ανά 15 λεπτά, από την ανατολή έως και τη δύση του ήλιου. Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στην κλίση και στους δύο προσανατολισμούς, όπως δηλαδή είναι τοποθετημένα τα πλαίσια.

Οι επιδόσεις της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης εξετάζονται κυρίως μέσω του κανονισμού 61724, που ανέπτυξε η Διεθνής Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή, στον οποίο περιγράφονται οι παράμετροι αξιολόγησης της απόδοσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Οι σημαντικότερες από αυτές είναι [2,3,4]:

- **Συντελεστής Τελικής (ενεργειακής) Απολαβής (Final Yield,  $Y_F$ )**

Ο συντελεστής τελικής ενεργειακής απολαβής ορίζεται ως η ετήσια, μηνιαία ή και ημερήσια καθαρή ενέργεια που παράγεται από το Φ/Β σύστημα  $E_{AC}$  [kWh] διαιρεμένη με την ονομαστική εγκατεστημένη ισχύ  $P_p$  [kW<sub>p</sub>], σε συνθήκες αναφοράς (συνθήκες STC,  $G_o=1.000W/m^2$ ,  $T_{cell}=25^{\circ}C$ ).

$$Y_F = \frac{E_{AC}}{P_{pv}}, [kWh/kW_p]$$

Ο  $Y_F$  αναφέρεται στις kWh που παράγονται ανά έτος/μήνα/ημέρα, ανά kW<sub>p</sub> εγκατεστημένης ισχύος.

- **Συντελεστής Απολαβής Αναφοράς (Reference Yield,  $Y_R$ )**

Ο συντελεστής απολαβής αναφοράς ορίζεται ως ο λόγος της ολικής προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας  $H_t$  [kWh/m<sup>2</sup>], προς την ακτινοβολία σε συνθήκες STC,  $G_o$  [kW/m<sup>2</sup>].

$$Y_R = \frac{H_t}{G_o}, [kWh/kW]$$

Ο  $Y_R$  αντιπροσωπεύει τον αριθμό των ωρών στη μέγιστη τιμή  $G_o$ . Είναι συνάρτηση της θέσης, του προσανατολισμού και της κλίσης του φωτοβολταϊκού καθώς και της μεταβλητότητας του καιρού.

- **Συντελεστής Λειτουργικής Απόδοσης (Performance Ratio, PR)**

Είναι ο λόγος της Τελικής Απολαβής προς την Απολαβή Αναφοράς. Αναφέρεται στην επίδραση των απωλειών στην απόδοση και την ισχύ εξόδου σε σχέση με την προσπίπτουσα ακτινοβολία. Οι απώλειες μπορεί να οφείλονται στην αυξημένη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, στον αντιστροφή, στις καλωδιώσεις, σε κακή συνδεσμολογία, κτλ.

$$PR = \frac{Y_F}{Y_R}, [\%]$$

Αντιπροσωπεύει την απόκλιση από τον ιδανικό βαθμό απόδοσης, εξαιτίας των απωλειών. Είναι μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους για σύγκριση Φ/Β συστημάτων, ανεξαρτήτως θέσης, εγκατεστημένης ισχύος, προσανατολισμού και κλίσης. Ο συντελεστής λειτουργίας είναι υψηλότερος το χειμώνα, λόγω της πιο χαμηλής θερμοκρασίας.

- **Συντελεστής Φόρτισης (Capacity Factor, CF)**

Ως συντελεστής φόρτισης ορίζεται ο λόγος της ετήσιας, μηνιαίας, ή και ημερήσιας παραγόμενης ενέργειας, προς την ενέργεια που θα μπορούσε να παραχθεί, αν το ΦΒ σύστημα λειτουργούσε στην ονομαστική του ισχύ, 24 ώρες την ημέρα, για τον αντίστοιχο αριθμό ημερών.

$$CF = \frac{Y_F}{24h/d * D} = \frac{E_{AC}}{P_{pv} * 24h/d * D}, [-]$$

Όπου D, ο αριθμός ημερών της εξεταζόμενης περιόδου.

- **Βαθμός Απόδοσης Συστήματος (System Efficiency,  $\eta_{sys}$ )**

Ως  $\eta_{sys}$  ορίζεται ο λόγος της παραγόμενης ενέργειας  $E_{AC}$  [kWh], προς το γινόμενο της προσπίπτουσας ακτινοβολίας  $H_t$ , [kWh/m<sup>2</sup>] επί την συνολική επιφάνεια των φωτοβολταϊκών πλαισίων  $A_m$  [m<sup>2</sup>].

$$\eta_{sys} = \frac{E_{AC}}{H_t * A_m}, [\%]$$

- **Αποφυγή εκπομπών CO<sub>2</sub> (Avoided CO<sub>2</sub> emissions, Em<sub>av</sub>).**

Ως αποφυγή CO<sub>2</sub> ορίζεται η ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα που θα παραγόταν από το Ηλεκτρικό Σύστημα της χώρας, για την παραγωγή ίδιου ποσού ενέργειας με τη χρήση συμβατικών πηγών κατά την εξεταζόμενη περίοδο.

$$Em_{av} = E_{AC} * F_{CO_2}, \text{ [kg CO}_2\text{]}$$

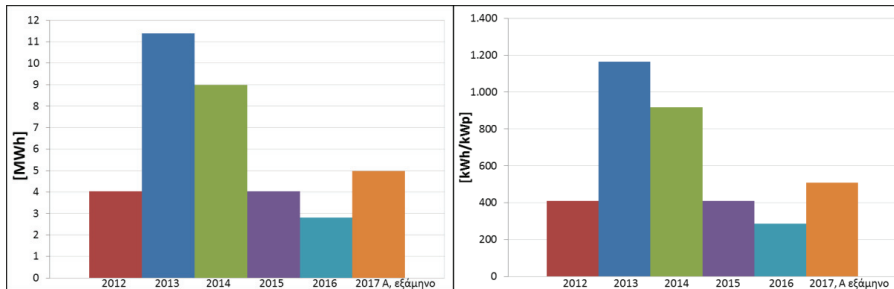
Όπου F<sub>CO<sub>2</sub></sub> είναι οι εκπομπές CO<sub>2</sub> ανά παραγόμενη kWh[kg/kWh] από συμβατικές πηγές (λιγνίτης, φυσικό αέριο, πετρέλαιο, υδροηλεκτρικά) για το συγκεκριμένο ενεργειακό μίγμα του ηλεκτρικού συστήματος της χώρας, αφαιρουμένων των ΑΠΕ. Ο συντελεστής αυτός υπολογίζεται από την αφαίρεση των εκπομπών CO<sub>2</sub> του κύκλου ζωής του φωτοβολταϊκού συστήματος (οι οποίες υπολογίζονται σε 53g CO<sub>2</sub>, eq/kWh για τα συστήματα Poly-Si (πολυκρυσταλλικού πυριτίου) και σε 61g CO<sub>2</sub>, eq/kWh για τα συστήματα Mono-Si (μονοκρυσταλλικού πυριτίου) [5,6], και από τον συντελεστή εκπομπών του εθνικού δικτύου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, που στα πλαίσια της εργασίας υπολογίσθηκε ότι την περίοδο 2013-2016 κυμάνθηκε από 935 έως 1.160g CO<sub>2</sub>/kWh [7,8].

### 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

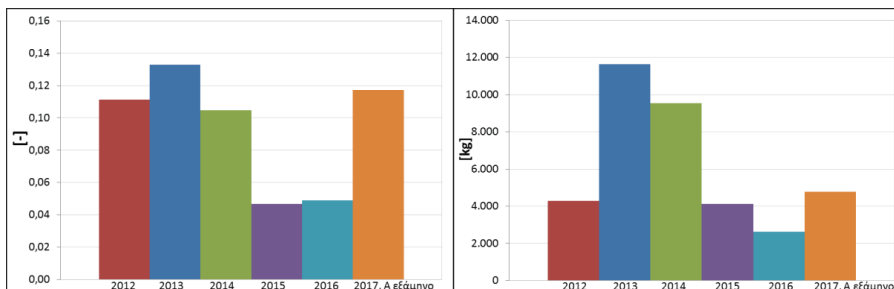
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων ηλιακής ακτινοβολίας, παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και των παραμέτρων αξιολόγησης που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Η παρουσίαση γίνεται σε ετήσια και μηνιαία βάση για την περίοδο λειτουργίας από τον Αύγουστο του 2013 έως τον Απρίλιο του 2017 και σε ημερήσια και ωριαία βάση για τις 12 επιλεγμένες ημέρες μετρήσεων Από Ιανουάριο έως τον Σεπτέμβριο 2017.

#### 3.1. Ετήσια Αποτελέσματα περιόδου Αύγουστος 2013 – Απρίλιος 2017

Στην εικόνα 2 παρατηρείται ότι για τα έτη 2015 και 2016 η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια του συστήματος είναι πολύ χαμηλή. Αυτό οφείλεται σε προβλήματα συνδεσμολογίας, που προέκυψαν εκείνη την περίοδο. Το γεγονός αυτό επηρεάζει επίσης και τους συντελεστές φόρτισης και τελικής ενεργειακής απολαβής, καθώς και την ποσότητα CO<sub>2</sub> που αποσοβήθηκε, οι τιμές των οποίων εξαρτώνται από την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (εικόνα 3, εικόνα 4, εικόνα 5).



Εικόνα 2: Ετήσια παραγωγή ενέργειας, E<sub>AC</sub>. Εικόνα 3: Ετήσιος συντελεστής τελικής απολαβής, Y<sub>f</sub>.

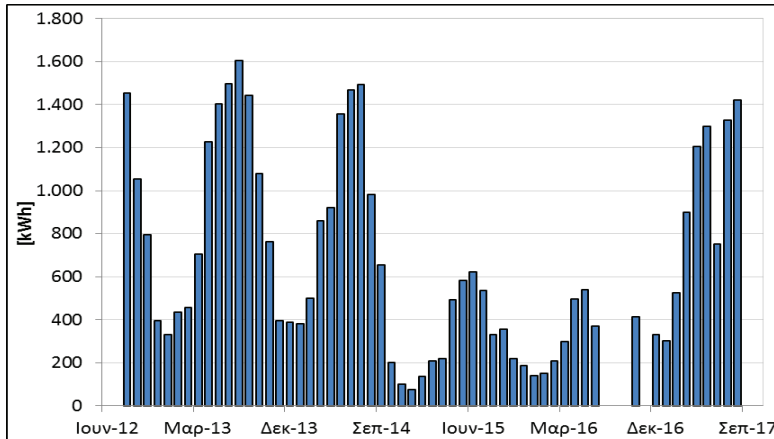


Εικόνα 4: Ετήσιος συντελεστής φόρτισης, CF.

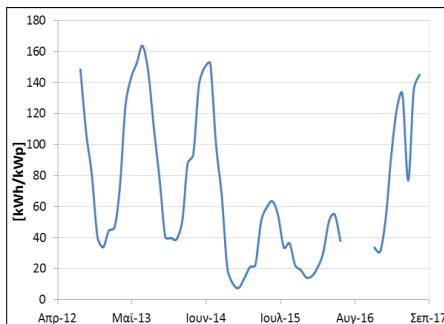
Εικόνα 5: Ετήσια αποσώβηση, CO<sub>2</sub>.

### 3.2. Μηνιαία αποτελέσματα περιόδου Αύγουστος 2013 – Απρίλιος 2017

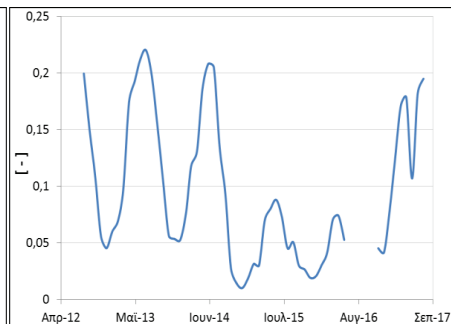
Στις εικόνες 6, 7, 8 και 9 φαίνονται πιο αναλυτικά οι επιπτώσεις στην ηλεκτροπαραγωγή των προβλημάτων συνδεσμολογίας, που προέκυψαν κατά την διάρκεια των ετών 2015 και 2016. Επίσης παρατηρείται η (φυσιολογική) διακύμανση των μεγεθών μεταξύ καλοκαιρινών και χειμερινών μηνών, που οφείλεται στη διακύμανση της διάρκειας ηλιοφάνειας και προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.



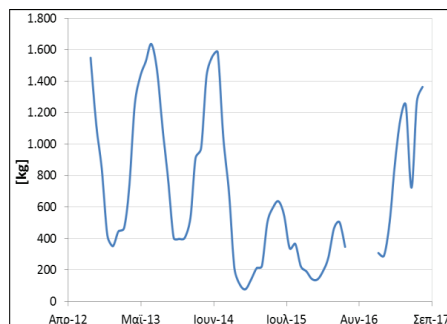
Εικόνα 6: Μηνιαία παραγωγή ενέργειας.



Εικόνα 7: Μηνιαία διακύμανση συντελεστή  $Y_F$ .



Εικόνα 8: Μηνιαία διακύμανση συντελεστή  $CF$ .



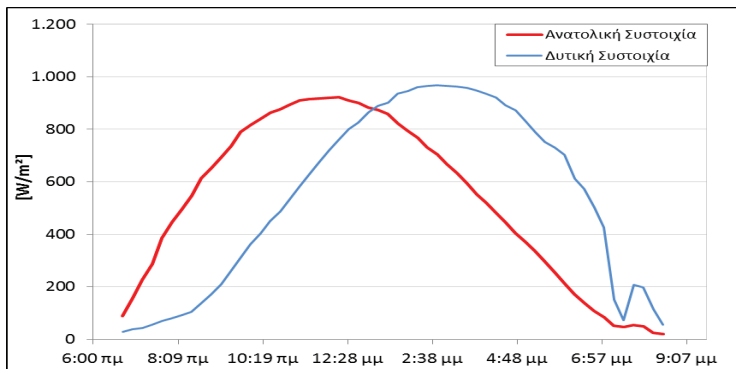
Εικόνα 9: Αποφυγή  $CO_2$  σε μηνιαία βάση.

### 3.3. Αποτελέσματα κατά τις επιλεγμένες ημέρες μετρήσεων, Ιανουάριος– Σεπτέμβριος 2017

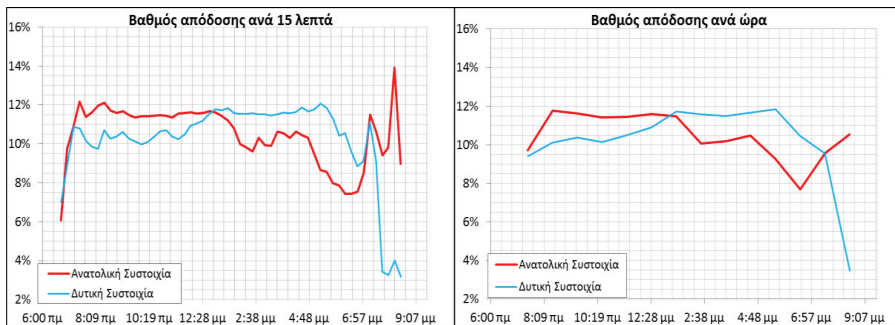
Στη συνέχεια παρουσιάζονται ενδεικτικά διαγράμματα της διακύμανσης της ηλιακής ακτινοβολίας καθώς και του βαθμού απόδοσης για μία από τις ημέρες των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν και συγκεκριμένα την 11<sup>η</sup> Ιουλίου 2017.

Στην εικόνα 10 φαίνεται ότι η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία είναι μεγαλύτερη τις πρωινές ώρες για την ανατολική συστοιχία, ενώ για τη δυτική συστοιχία οι μέγιστες τιμές εμφανίζονται μετά τις μεσημβρινές ώρες, όπως αναμενόταν. Απότομες αυξομειώσεις μικρής χρονικής διάρκειας οφείλονται σε παροδικές νεφώσεις.

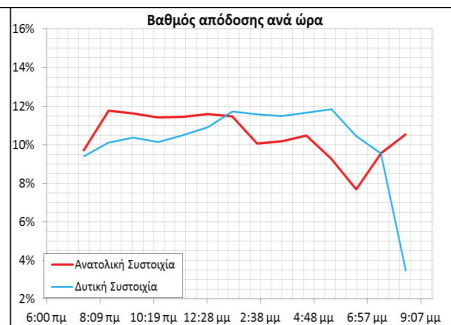
Στην εικόνα 11 παρουσιάζεται ο βαθμός απόδοσης των δύο συστοιχιών του ΦΒ συστήματος υπολογισμένος από μετρήσεις της ηλιακής ακτινοβολίας [ $W/m^2$ ] και της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας [ $W$ ] ανά 15', γεγονός που οδηγεί σε έντονες διακυμάνσεις λόγω της μη ταύτισης των στιγμιαίων τιμών και σε μεγάλες αποκλίσεις από τις μέσες ημερήσιες τιμές. Στην εικόνα 12 ο βαθμός απόδοσης είναι υπολογισμένος με μέσες ωριαίες τιμές, γεγονός που οδηγεί σε εξομάλυνση των καμπυλών.



Εικόνα 10: Προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία για τις δύο συστοιχίες κατά τη διάρκεια της ημέρας (11-7-2017).

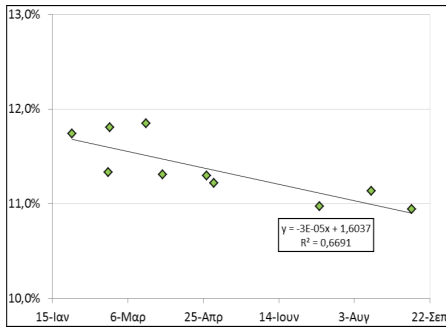


Εικόνα 11: Βαθμός απόδοσης υπολογισμένος ανά 15' (11-7-2017).

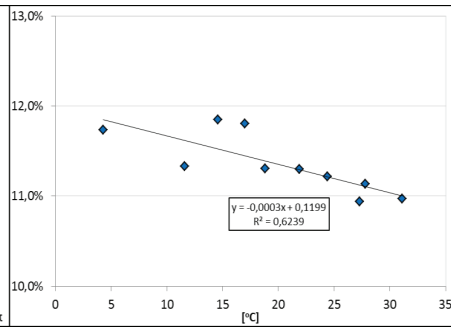


Εικόνα 12: Βαθμός απόδοσης υπολογισμένος ανά 60' (11-7-2017).

Στην εικόνα 13 φαίνεται η απόδοση τις 10 ημέρες των μετρήσεων, ενώ στην εικόνα 14 φαίνεται η απόδοση σε σχέση με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Το εύρος τιμών του βαθμού απόδοσης κρίνεται λογικό, καθώς η τιμή του βαθμού απόδοσης του κατασκευαστή σε STC συνθήκες είναι 15%. Παρατηρείται η επίδραση της θερμοκρασίας στο βαθμό απόδοσης, καθώς τους χειμερινούς μήνες η απόδοση εμφανίζει μεγαλύτερες τιμές, όπως αναμενόταν.

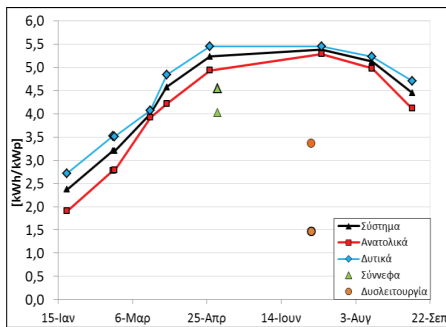


Εικόνα 13: Βαθμός απόδοσης κατά την περίοδο των μετρήσεων.

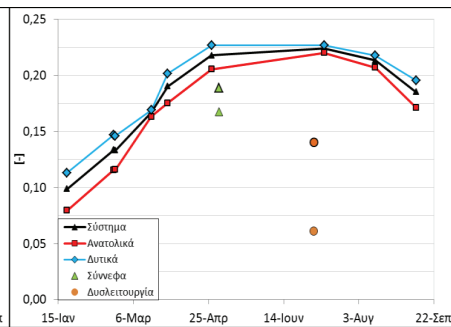


Εικόνα 14: Εξάρτηση του βαθμού απόδοσης από την θερμοκρασία.

Στην εικόνα 15 παρουσιάζεται ο συντελεστής  $Y_F$  ενώ στην εικόνα 16 ο CF. Όπως είναι αναμενόμενο οι συντελεστές  $Y_F$  και CF παίρνουν τις μέγιστες τιμές τους κατά τους θερινούς μήνες με τη μεγαλύτερη διάρκεια ηλιοφάνειας. Λόγω νέφωσης και δυσλειτουργιών, που αναφέρθηκαν παραπάνω, υπάρχουν για δύο ημέρες τιμές που αποκλίνουν από την αναμενόμενη εξέλιξη των συντελεστών και για τον λόγο αυτό εμφανίζονται ανεξάρτητα.

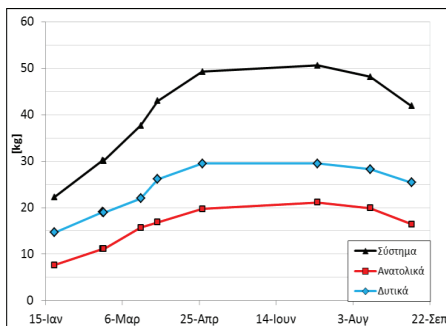


Εικόνα 15: Συντελεστής τελικής απολαβής κατά την περίοδο των μετρήσεων,  $Y_F$ .

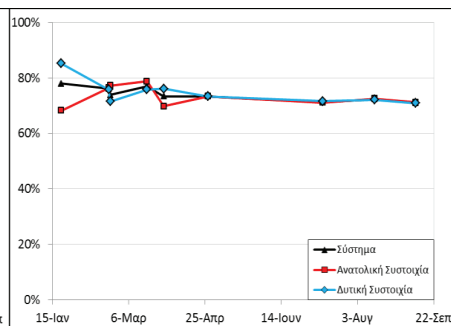


Εικόνα 16: Συντελεστής φόρτισης κατά την περίοδο των μετρήσεων, CF.

Στην εικόνα 17 παρατηρείται ότι η αποφυγή CO<sub>2</sub> αυξάνεται τους μήνες με τη μεγαλύτερη ηλιοφάνεια, καθώς αυξάνεται και η παραγόμενη ενέργεια.



Εικόνα 17: Αποσόβηση CO<sub>2</sub> κατά την περίοδο των μετρήσεων.



Εικόνα 18: Συντελεστής λειτουργικής απόδοσης κατά την περίοδο των μετρήσεων, PR.

Όσον αφορά τον PR παρατηρείται (εικόνα 18) μείωσή του από τους χειμερινούς προς τους καλοκαιρινούς μήνες, λόγω της επίδρασης της αύξησης της θερμοκρασίας περιβάλλοντος στην απόδοση του συστήματος. Καθώς για τον υπολογισμό του PR απαιτούνται δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας, αυτός δεν μπορεί να εκτιμηθεί, παρά μόνο κατά τις ημέρες των μετρήσεων.

#### 4. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΔΕΥΑΒ ΜΕ ΆΛΛΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Για την αξιολόγηση της λειτουργίας του εξεταζόμενου ΦΒ πάρκου έγινε σύγκριση με τις επιδόσεις άλλων συστημάτων συγκρίσιμης ισχύος από τη βιβλιογραφία. Για τη σύγκριση χρησιμοποιήθηκαν οι συντελεστές/δείκτες  $Y_F$ ,  $n_{sys}$ , PR και CF. Για το σύστημα της ΔΕΥΑΒ οι παράμετροι αυτοί υπολογίστηκαν αφενός με βάση τα ιστορικά δεδομένα της εξεταζόμενης περιόδου και αφετέρου με βάση τις μετρήσεις κατά τη διάρκεια των 10 επιλεγμένων ημερών. Στα ιστορικά δεδομένα δε συμπεριλήφθηκαν τα έτη 2015-2016, κατά τη διάρκεια των οποίων το σύστημα υπολειποργούσε, λόγω προβλημάτων συνδεσμολογίας (βλ. εικόνα 6). Από τον Πίνακα 1 φαίνεται ότι οι τιμές των συντελεστών του εξεταζόμενου συστήματος κυμαίνονται μέσα στα όρια που εμφανίζουν τα άλλα συστήματα.

Πίνακας 1: Σύγκριση του συστήματος της ΔΕΥΑΒ με άλλα συστήματα από τη βιβλιογραφία [9,10,11,12,13,14,15].

	$P_{PV}$ [kW <sub>p</sub> ]	$Y_{F,an}$ [kWh/kW <sub>p</sub> .yr]	$Y_{F,d}$ [kWh/kW <sub>p</sub> .d]	$n_{sys}$ [%]	PR [%]	CF [-]
Eastern India	11,20	-	3,67	12,1	78,0	-
Karnataka State, South India	3,06	1.387,8	-	-	70,0	-
Eastern Cape, South Africa	3,22	1.788,5	4,90	-	84,0	0,20
Ceara, Brazil	2,20	1.679,0	4,60	12,6	82,9	0,19
Dublin, Ireland	1,72	876,0	2,40	12,6	81,5	-
Dublin, Ireland	3,06	-	1,69	5,7	60,0-62,0	-
Meknes, Morocco	2,04	-	4,98	12,3	81,7	-
Malaga, Spain	2,00	1.339,6	-	-	64,5	-
Crete, Greece	171,00	1.335,9	2,00-5,10	-	67,4	0,15
Kavala, Greece	9,84	1.314,0	-	-	84,0	-
Chania, Greece	2,18	1.533,0	4,20	7,3	85,1	-
Trieste, Italy	2,99	1.398,0	-	-	89,1	-
<b>ΔΕΥΑΒ:</b>						
Βάσει των καταγραφών της περιόδου λειτουργίας	9,80	1.020,1	2,51-3,19 (2,79)	-	-	0,12
Βάσει μετρήσεων επιλεγμένων ημερών (Μ.Ο.)			1,9- 5,5 (4,0)	10,9-11,9 (11,4)	72,3-74,3 (73,5)	0,15-0,18 (0,17)

Οι παράμετροι των διαφόρων προς σύγκριση συστημάτων αναφέρονται σε διάρκεια λειτουργίας ενός έτους. Καθώς οι μετρήσεις στο εξεταζόμενο σύστημα της ΔΕΥΑΒ διήρκεσαν από το μήνα Ιανουάριο μέχρι και τον Σεπτέμβριο, παρατηρείται σημαντική διαφορά στις τιμές των συντελεστών CF και  $Y_F$  στα αποτελέσματα που προέκυψαν, σε σχέση με τα ετήσια δεδομένα. Αυτό οφείλεται στο ότι δεν έχουν ληφθεί υπόψη οι μήνες από Οκτώβριο μέχρι και Δεκέμβριο. Μαζί με αυτούς τους μήνες αναμένονταν επίσης μεγαλύτερες τιμές  $Y_F$ , λόγω της μεγαλύτερης διάρκειας λειτουργίας (ένα έτος, σε σχέση με τους 9 μήνες που έχουν ληφθεί υπόψη) και μικρότερες τιμές CF, λόγω μειωμένης παραγωγικότητας του συστήματος τους μήνες Οκτ.- Δεκ. σε σχέση με τους καλοκαιρινούς μήνες.

Ο συντελεστής PR, για το σύστημα της ΔΕΥΑΒ, είναι μικρότερος απ' ό,τι στα περισσότερα άλλα συστήματα. Η διαφορά αυτή θεωρείται εντός λογικών πλαισίων. Αυτό δείχνει ότι έχουμε μεγαλύτερη επίδραση των απωλειών στον βαθμό απόδοσης, όποτε και μειωμένη παραγόμενη ενέργεια.

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ανάλυση που έγινε στην παρούσα εργασία, ως σκοπό είχε την αξιολόγηση του Φ/Β συστήματος της ΔΕΥΑ Βέροιας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το σύστημα λειτουργεί ικανοποιητικά, με τιμές δεικτών απόδοσης συγκρίσιμους με τις τιμές άλλων συστημάτων, αλλά προς τα κατώτερα όρια. Ωστόσο, παρατηρήθηκαν κάποιες «αδυναμίες» στη λειτουργία του συστήματος, οι οποίες επιδρούν αρνητικά στη συνολική παραγωγή ενέργειας.

Οι περιορισμοί της θέσης εγκατάστασης των Φ/Β πλαισίων (στέγη, προσανατολισμός, κλίση) επηρεάζουν αρνητικά την παραγωγικότητα και την εν γένει αποδοτικότητα του συστήματος τόσο άμεσα όσο και έμμεσα λόγω δυσκολίας πρόσβασης σε αυτό (αδυναμία καθαρισμού πλαισίων, επεμβάσεων, συντήρησης, κτλ).

Η σχετικά χαμηλή τιμή του συντελεστή λειτουργίας PR, μπορεί να οφείλεται, εκτός από τους λόγους που έχουν ήδη αναφερθεί, σε προβλήματα συνδεσμολογίας και συντήρησης των επιμέρους εξαρτημάτων του συστήματος. Τέτοιου είδους πρόβλημα συνδεσμολογίας, προέκυψε τα έτη 2015-2016, κατά την διάρκεια των οποίων δούλευε άλλοτε η μία και άλλοτε καμία από τις δύο συστοιχίες.

Επιβάλλεται να ληφθούν μέτρα, για την καλύτερη επιτήρηση του συστήματος. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων στην περίοδο Ιουνίου 2017, το σύστημα λόγω βλάβης σταμάτησε να λειτουργεί. Η βλάβη αυτή έγινε αντιληπτή με καθυστέρηση, με αποτέλεσμα να χαθούν παραγωγικές ημέρες σε μια περίοδο υψηλής ακτινοβολίας. Ενδείκνυται η τοποθέτηση ειδικού συστήματος αυτόματης ενημέρωσης/ειδοποίησης σε περιπτώσεις διακοπής λειτουργίας ή εν γένει δυσλειτουργίας.

#### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] «ΥΠΕΚΑ: Ενεργειακή Πολιτική» Available: <http://www.ypeka.gr/Default.aspx2> Accessed 9 2017].
- [2] International standard IEC 61724, Photovoltaic system performance monitoring – Guidelines for measurements, data exchange and analysis.
- [3] D. Okello et al (2015), Analysis of measured and simulated performance data of 3.2kWp grid-connected PV system in Port Elizabeth, South Africa, Energy Conversion and Management 100, 10-15.
- [4] A. Allohi et al, 2016, Grid-connected PV systems installed on institutional buildings: Technology comparison, energy analysis and economic performance, Energy and Buildings 130, 188-201.
- [5] J. Peng et al, 2013, Review on life cycle assessment of energy payback and greenhouse gas emission of solar photovoltaic systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews 19, 255-274.
- [6] G. Hou et al, 2016, Life Cycle assessment of grid-connected photovoltaic power generation from crystalline silicon solar modules in China, Appl. Energ. 164, 82-890.
- [7] Λ.ΑΓ.Η.Ε., Μηνιαίο Δελτίο Ειδικού Λογαριασμού ΑΠΕ & ΣΗΘΥΑ Διασυνδεδεμένου Συστήματος και Δικτύου, Δεκέμβριος 2017, <http://www.lagie.gr/systima-egqyimenon-timon/ape-sithya/miniaia-deltia-eidikoy-logarismoy-ape-sithya/>
- [8] U.N. National Inventory Submissions 2017, [http://unfccc.int/national\\_reports/annex\\_i\\_ghg\\_inventories/national\\_inventories\\_submissions/items/10116.php](http://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/items/10116.php)
- [9] Kymakis E, Kalykakis S, Papazoglou T. Performance analysis of a grid connected photovoltaic park on the island of Crete. Energy Convers. Manage. 50 (3) (2009) 433-438.
- [10] D. Okello, E.E. van Dyk, F.J. Vorster, Analysis of measured and simulated performance data of a 3.2 kWp grid-connected PV system in Port Elizabeth, South Africa, Energy Convers. Manage. 100 (2015) 10–15.

- [11] L.M. Ayompe, A. Duffy, S.J. McCormack, M. Conlon, Measured performance of a 1.72 kW rooftop grid connected photovoltaic system in Ireland, *Energy Convers. Manage.* 52 (2) (2011) 816–825.
- [12] A. Allouhi, R. Saadani, T. Kousksou, R. Saidur, A. Jamil, M. Rahmoune, Grid-connected PV systems installed on institutional buildings: Technology comparison, energy analysis and economic performance, *Energy Convers. Manage.* 130 (2016) 188-201.
- [13] Mondol J.D., Yohanis Y., Smyth M., Norton B., Long term performance analysis of a grid-connected PV system in Northern Ireland. *Energy Convers. Manage.* 47 (18) (2006) 2925-2947.
- [14] L. C. de Lima , L. de Araújo Ferreira, F.Hedler Barreto de Lima Morais. Performance analysis of a grid connected photovoltaic system in northeastern Brazil. *En.forSust. Dev.* 37(2017)79–85.
- [15] Renu Sharma, Sonali Goel. Performance analysis of a 11,2kW<sub>p</sub> roof top grid-connected PV system in Eastern India. *Energy rep.* 3 (2017) 76-84.



