

# ΗΛΙΟΒΟΗΘΟΥΜΕΝΗ ΑΝΤΛΙΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΑΜΕΣΗ-ΒΙΟΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΕΜΜΕΣΗ-ΕΝΕΡΓΗΤΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ ΑΕΡΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

**Μ. Καράγιωργας<sup>a</sup>, Μ. Τσαγκούρης, Κ. Γαλάτης Α. Μπότζιος-Βαλασκάκης<sup>b</sup>**

<sup>a</sup>BONAIR Μελετητική, e-mail: [bonair@teledomenet.gr](mailto:bonair@teledomenet.gr)

<sup>b</sup> ΚΑΠΕ-Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, 19009 Πικέρμι

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο βιοκλιματικό κτίριο του Κέντρου Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ) στο Πικέρμι Αττικής, ηλιακοί συλλέκτες αέρα συλλεκτικής επιφάνειας 25 m<sup>2</sup>, τροφοδοτούν με θερμό αέρα την αντλία θερμότητας αέρα-νερού (θερμικής ισχύος 16,7 kW).

Υπάρχει δυνατότητα για διπλή λειτουργία των εν λόγω συλλεκτών αέρα:

- σε υβριδική-ενεργητική λειτουργία, οπότε ο θερμαινόμενος αέρας, επειδή αδυνατεί να καλύψει άμεσα τις θερμικές απώλειες χώρων, οδηγείται στον εξατμιστή μιας αντλίας θερμότητας αέρα-νερού για να αποδώσει εκεί τη συλλεγόμενη ηλιακή θερμότητα σε αυξάνοντας έτσι την απόδοσή της.
- παθητική-βιοκλιματική λειτουργία οπότε ο θερμαινόμενος αέρας προσάγεται απευθείας στο χώρο για την κάλυψη των θερμικών απωλειών του.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εισήγηση θα παρουσιάσει τα αποτελέσματα λογισμικών εργαλείων προσομοίωσης (Tsagair) όσον αφορά τις θερμοκρασίες προσαγωγής αέρα, την ενεργειακή απόδοση και κάλυψη των ηλιακών συλλεκτών, του COP<sub>A/Θ</sub> της αντλίας θερμότητας, καθώς και του υπολογιστικού μοντέλου για το ολικό COP<sup>E</sup><sub>tot</sub> της εγκατάστασης.

Θα παρουσιασθούν έτσι τα όρια «μεταγωγής» από το βιοκλιματικό στον υβριδικό τρόπο λειτουργίας, με μεταβλητές την ηλιακή ακτινοβολία και τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, καθώς αυτές οι μεταβλητές βελτιώνουν την απόδοση των αεροσυλλεκτών και της αντλίας θερμότητας και υπάρχει έτσι ένα χαρακτηριστικό όριο πάνω από το οποίο συμφέρει ενεργειακά οι συλλέκτες να θερμαίνουν απευθείας το χώρο αντί να τροφοδοτούν την αντλία θερμότητας.

Η προσομοίωση διενεργήθηκε για να υπολογιστούν οι στιγμιαίες ενεργειακές αποδόσεις των συλλεκτών, της αντλίας θερμότητας καθώς και του θερμικού φορτίου του κτιρίου.

Η εισήγηση θα καταλήξει στον υπολογισμό και τη σύγκριση αυτών των τιμών με τις εκτελεσθείσες μετρήσεις των εποχικών COP<sub>A/Θ</sub> τόσο μεμονωμένα της αντλίας θερμότητας (COP<sub>A/Θ</sub> = 3,1) όσο και του COP<sup>E</sup><sub>tot</sub> της εγκατάστασης (COP<sup>E</sup><sub>tot</sub> = 4,9).

### 1.1 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η εργασία στηρίζεται σε αποτελέσματα μετρήσεων που έγιναν στο βιοκλιματικό κτίριο του ΚΑΠΕ καθώς και σε αποτελέσματα υπολογισμών επί συστήματος εξισώσεων που αναλύονται στα επόμενα. Οι ηλιακοί συλλέκτες αέρα εγκαταστάθηκαν για να θερμαίνουν το χώρο με δύο τρόπους: ή με τον άμεσο τρόπο (απ' ευθείας προσαγωγή στο χώρο φρέσκου νωπού αέρα θερμαινόμενου από τον ήλιο) ή με τον έμμεσο τρόπο (ο θερμαινόμενος αέρας περιβάλλοντος προσάγεται στον εξατμιστή μιας αντλίας θερμότητας αέρα-νερού και όχι πια απευθείας στο χώρο)

Συγκεκριμένα αυτή η εργασία περιλαμβάνει :

- Παρουσίαση των κατασκευαστικών και υπολογιστικών χαρακτηριστικών της ηλιοβοηθούμενης αντλίας θερμότητας εγκατεστημένης στο βιοκλιματικό κτίριο.
- Παρουσίαση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων επί της ηλιοβοηθούμενης αντλίας θερμότητας τόσο του τμήματος της αντλίας θερμότητας όσο και του τμήματος των ηλιακών συλλεκτών αέρα
- Παρουσίαση των αποτελεσμάτων της μελέτης του συστήματος αντλίας θερμότητας-ηλιακών συλλεκτών αέρα και σύγκρισή τους με τα αποτελέσματα των μετρήσεων

## 1.2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΤΟ ΚΤΙΡΙΟ ΤΟΥ ΚΑΠΕ

Για την πραγματοποίηση του ερευνητικού έργου έγινε ανάπτυξη εφαρμογής και σχεδιασμός της στρατηγικής ελέγχου συστήματος ηλιακών συλλεκτών αέρα σε σύζευξη με αντλία θερμότητας αέρα νερού με σκοπό τη θέρμανση χώρων.

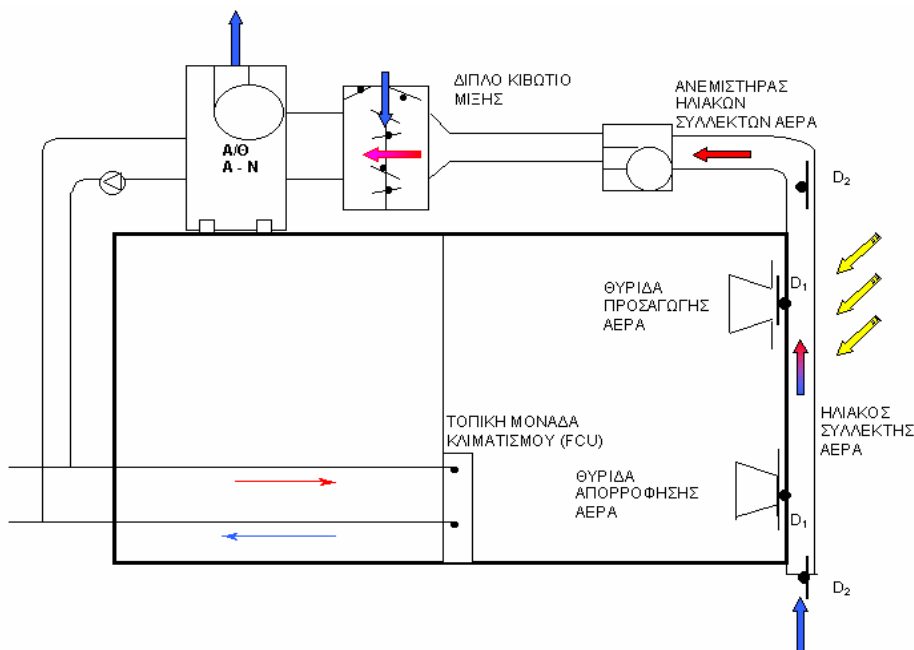
Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις επί πραγματικού κτιρίου, του βιοκλιματικού κτιρίου στο ΚΑΠΕ που εξοπλίστηκε με το σύστημα αυτό. Οι εν λόγω μετρήσεις έγιναν μέσω του δικτύου παρακολούθησης BEMS του κτιρίου. Πραγματοποιήθηκε επίσης προσομοίωση του συστήματος τόσο με το πρόγραμμα Transys (όσον αφορά τα φορτία του κτιρίου) όσο και με ένα μαθηματικό μοντέλο που αναπτύχθηκε για το σκοπό αυτό (όσον αφορά τη σύζευξη αεροσυλλεκτών και αντλίας θερμότητας).

## 1.3. ΤΡΟΠΟΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΧΩΡΩΝ

Το ενεργειακό σύστημα που εξετάζεται στην παρούσα εργασία είναι αυτό που θερμαίνει τον πρώτο όροφο του κτιρίου και προβλέπει δύο τρόπους λειτουργίας :

- Την υβριδική λειτουργία (ή έμμεση), κατά την οποία ο αέρας που θερμαίνεται από τους ηλιακούς συλλέκτες αέρα, τροφοδοτεί τον εξατμιστή της αντλίας θερμότητας αέρα – νερού. Από την αντλία θερμότητας παράγεται ζεστό νερό που προσάγεται στα fan coils για τη θέρμανση χώρων.
- Την παθητική λειτουργία (ή άμεση), κατά την οποία ο αέρας του χώρου αναρροφάται με φυσικό ελκυσμό και ρέει θερμοσιφωνικά μέσα στους ηλιακούς συλλέκτες αέρα, ενώ στην συνέχεια προσάγεται θερμός στο χώρο.

Για να είναι δυνατή η λειτουργία του ενεργειακού συστήματος με τον ένα ή τον άλλο τρόπο, υπάρχουν τοποθετημένα διαφράγματα αέρα (dampers), που ανοίγουν και κλείνουν, ώστε να καθορίζουν την λειτουργία στο σύστημα. Για παράδειγμα όταν τα εσωτερικά dampers D1 είναι κλειστά τότε τα εξωτερικά dampers D2 είναι ανοιχτά και το σύστημα λειτουργεί έμμεσα (υβριδικά) ενώ σε αντίθετη θέση το σύστημα λειτουργεί άμεσα (παθητικά). (σχ. 1)



Σχήμα 1: Σχηματική απεικόνιση του συστήματος θέρμανσης του κτιρίου του ΚΑΠΕ

## 1.4. Η ΗΛΙΟΒΟΗΘΟΥΜΕΝΗ ΑΝΤΛΙΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΑΕΡΑ – ΝΕΡΟΥ

Γενικά, το σημαντικότερο χαρακτηριστικό μιας συμβατικής αντλίας θερμότητας αέρα-νερού είναι ότι αντλεί θερμότητα από τον ατμοσφαιρικό αέρα.

Το μειονέκτημα που έχει ο αέρας, σαν πηγή θερμότητας, είναι η χαμηλή θερμοκρασία τον χειμώνα, που μειώνει τον βαθμό συμπεριφοράς της αντλίας θερμότητας ( $COP_{A/Θ}$ ) ενώ ταυτόχρονα είναι αυξημένη η ανάγκη θέρμανσης των χώρων. Επίσης, άλλο ένα μειονέκτημα του αέρα είναι η υγρασία του που παγώνει στα πτερύγια του εξατμιστή, με αποτέλεσμα να μειωθεί έως και να μηδενιστεί η ταχύτητα κυκλοφορίας του αέρα και να αυξηθεί η θερμική αντίσταση του εξατμιστή λόγω του σχηματιζόμενου πάγου.

Τα παραπάνω δύο μειονεκτήματα του αέρα ακυρώνονται στην ηλιοβοηθούμενη αντλία θερμότητας αέρα-νερού, ισχύος 15 kW, όπου ο αέρας, αφού περάσει από το πίσω μέρος των απορροφητήρων των συστοιχιών των ηλιακών συλλεκτών αέρα, θερμαίνεται και προσάγεται στον εξατμιστή της αντλίας θερμότητας όπου η τελευταία αντλεί την θερμότητά του θερμαίνοντας το νερό του δικτύου FCU του κτιρίου .

## 1.5. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ ΑΕΡΑ

Κατά την περίοδο του χειμώνα, ο αέρας αφού διέλθει και προθερμανθεί από τους ηλιακούς συλλέκτες αέρα της νότιας όψης του κτιρίου συνολικής επιφάνειας 17,4 m<sup>2</sup> και παροχής σχεδιασμού 2×1575 m<sup>3</sup>/h, προσάγεται στον εξατμιστή της ηλιοβοηθούμενης αντλίας θερμότητας αέρα-νερού, υποβοηθούμενος από φυγοκεντρικούς ανεμιστήρες, και προσφέρει τη θερμότητά του στον θερμοδυναμικό (ψυκτικό) κύκλο.

Κατά την άνοιξη και το φθινόπωρο, το ηλιακό σύστημα λειτουργεί με άμεση θέρμανση του χώρου. Οι θερμοσιφωνικές παροχές του αέρα εντός του συλλέκτη κυμαίνονται τότε από 10-900 m<sup>3</sup>/h.

## 2. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Οι βασικές εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη του μοντέλου είναι:

**Συντελεστής συμπεριφοράς της αντλίας θερμότητας:**

$$\text{COP}_{A/\Theta} = \frac{Q_{A/\Theta}(T_a)}{Q_{elA/\Theta}(T_a)}$$

όπου:  $Q_{A/\Theta}(T_a) = \Omega$  φέλιμη θερμική ισχύς A/Θ (1)  
 $Q_{elA/\Theta}(T_a) =$  Απορροφούμενη ηλεκτρική ισχύς A/Θ  
 $T_a$  η θερμοκρασία του περιβάλλοντος αέρα (°C)

**Συντελεστής απολαβής θερμότητας συλλέκτη  $F_R$**

$$F_R = \frac{\overset{\circ}{m} \cdot c_p}{A_c \cdot U_L} \cdot \left[ 1 - e^{-\frac{A_c \cdot U_L \cdot F'}{\overset{\circ}{m} \cdot c_p}} \right]$$
 (2)

όπου:  $\overset{\circ}{m}$  : παροχή θερμικού μέσου μεταφοράς  
 $c_p$  : ειδική θερμότητα θερμικού μέσου μεταφοράς  
 $A_c$  : η επιφάνεια του συλλέκτη  
 $U_L$  : ο ολικός συντελεστής θερμικής μεταφοράς  
 $F'$  : ο συντελεστής απόδοσης συλλέκτη

**Στιγμιαίος βαθμός απόδοσης ηλιακού αεροσυλλέκτη:**

$$n = \frac{Q_u}{A_c \cdot I_\beta} = F_R \cdot (\tau\alpha) - F_R \cdot U_L \cdot \frac{(T_i - T_a)}{I_\beta}$$
 (3)

όπου  $Q_u(T_a)$ : η ωφέλιμη συλλεγόμενη θερμική ισχύς (W)  
 $F_R$  : ο συντελεστής απολαβής θερμότητας του συλλέκτη  
 $I_\beta$  : η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του συλλέκτη (W/m<sup>2</sup>)  
 $\tau$  : ο συντελεστής διαπερατότητας του διαφανούς καλύμματος στην ηλιακή ακτινοβολία  
 $\alpha$  : ο συντελεστής απορρόφησης του απορροφητήρα για την ηλιακή ακτινοβολία  
 $T_i$  : η θερμοκρασία στην είσοδο του συλλέκτη (°C)  
 $T_a$  : η θερμοκρασία του περιβάλλοντος (°C)

**Θερμότητα προσαγωγής του αέρα στον εξατμιστή της A/Θ στην έμμεση θέρμανση:**

$$Q_u(T_a) = \rho V_a C_p (T_{a,out} - T_a)$$
 (4)

Όπου:  $\rho$  : η πυκνότητα του αέρα  
 $C_p$  η ειδική θερμότητα του αέρα  
 $V_a$  η παροχή του αέρα

**Φορτία κτιρίου:**

$$Q_n(T_a) = G \cdot V \cdot (T_{set} - T_a) + Q_\kappa$$
 (5)

όπου :  $Q_n(T_a) =$  Φορτίο απωλειών κτιρίου (W)  
 $G$  ο συντελεστής απωλειών όγκου (W/m<sup>3</sup>K)  
 $V$  ο όγκος του κτιρίου (m<sup>3</sup>)  
 $T_{set}$  η θερμοκρασία επιθυμητής λειτουργίας του εσωτερικού χώρου (°C)  
 $T_a$  η θερμοκρασία του περιβάλλοντος (°C)  
 $Q_\kappa$  τα εσωτερικά θερμικά κέρδη στο κτίριο (W)

### Επαλληλία αποδόσεων συλλέκτη και Α/Θ:

$$\left. \begin{aligned} Q_n &= Q_{A/\Theta}(T_a) + Q_u && \text{στην άμεση} \\ Q_n &= Q_{A/\Theta}(T_{a,out}) && \text{στην έμμεση} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

### Μοντέλο αποδόσεων κτιρίου-συστήματος θέρμανσης:

Το σύστημα των εξισώσεων (1), (2), (3), (4), (5) και (6) με βάση τις παραμέτρους  $T_a$  και  $I_\beta$  υπολογίζει έναν αριθμό κριτηρίων απόδοσης όπως την  $Q_{A/\Theta}(T_a)$  ή  $Q_{A/\Theta}(T_{a,out})$ , την  $Q_{elA/\Theta}(T_a)$  ή  $Q_{elA/\Theta}(T_{a,out})$ , την  $Q_u(T_a, I_\beta)$  και το  $Q_n(T_a, Q_c)$  ή  $Q_o(T_a)$  τα οποία στη συνέχεια οδηγούν στον υπολογισμό κριτηρίων αποδοτικότητας, όπως:

$$COP_{A/\Theta} = \frac{Q_{A/\Theta}}{Q_{elA/\Theta}}, \quad \text{ο συντελεστής συμπεριφοράς της αντλίας θερμότητας}$$

$$COP_{tot}^A = \frac{Q_u + Q_{A/\Theta}}{Q_{elA/\Theta}}, \quad \text{ο συντελεστής συμπεριφοράς της εγκατάστασης κατά την άμεση θέρμανση του κτιρίου}$$

$$COP_{tot}^E = \frac{Q_{A/\Theta}}{Q_{elA/\Theta}}, \quad \text{ο συντελεστής συμπεριφοράς της εγκατάστασης κατά την έμμεση θέρμανση του κτιρίου}$$

Το σημείο όπου προσδίδεται η ωφέλιμη ενέργεια  $Q_u(T_a, I_\beta)$  καθορίζει τον τρόπο λειτουργίας (άμεση ή έμμεση θέρμανση) καθώς και διαχωρίζει τους αντίστοιχους συντελεστές απόδοσης, αντίστοιχα σε  $COP_{tot}^A$  και  $COP_{tot}^E$ .

## 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 3.1. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Σε κάθε ώρα, αφού ορισθούν (μετρηθούν ή υπολογισθούν) οι παράμετροι  $T_a$  και  $I_\beta$ , τότε επιλέγεται ο τρόπος λειτουργίας με το βέλτιστο  $COP_{tot}^{A,E}$  ( $A$ = άμεση θέρμανση,  $E$ = έμμεση θέρμανση).

Έτσι, πρακτικά, μια χειμερινή ημέρα με αραιή νέφωση (υψηλό  $I_\beta$ ) και σχετικά υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος (υψηλό  $T_a$ ) η άμεση λειτουργία αναμένεται πιο αποδοτική. Αντίθετα, τις ημέρες με αρκετή νέφωση και άρα μικρή ηλιακή ακτινοβολία και χαμηλές θερμοκρασίες είναι προτιμότερη η έμμεση θέρμανση του κτιρίου καθώς έχει καλύτερο συντελεστή απόδοσης. Επίσης σε ημέρες με χαμηλές θερμοκρασίες και μικρή ηλιακή ακτινοβολία υπάρχει ο κίνδυνος στην άμεση λειτουργία αντί να καλύπτονται οι θερμικές ανάγκες του κτιρίου, να κρυώνει το κτίριο σε περίπτωση που η άμεση λειτουργεί κάτω από το “κάτω όριο”.

Με το μοντέλο προσομοίωσης (1), (2), (3), (4), (5), (6), “Tsagair”, έγινε προσπάθεια πρόβλεψης της ενεργειακά βέλτιστης λειτουργίας των ηλιακών συλλεκτών αέρα στο κτίριο του ΚΑΠΕ σε ωριαία βάση για μια μέρα – τύπο, την 15<sup>η</sup> Ιανουαρίου.

- Οι ακτινοβολίες της εν λόγω ημέρας υπολογίσθηκαν βάσει του μοντέλου του ‘Hottel’ για κάθε ώρα.[2]
- Οι θερμοκρασίες περιβάλλοντος υπολογίσθηκαν για κάθε ώρα βάσει του κώδικα Κουρεμένου – Αντωνόπουλου [9].

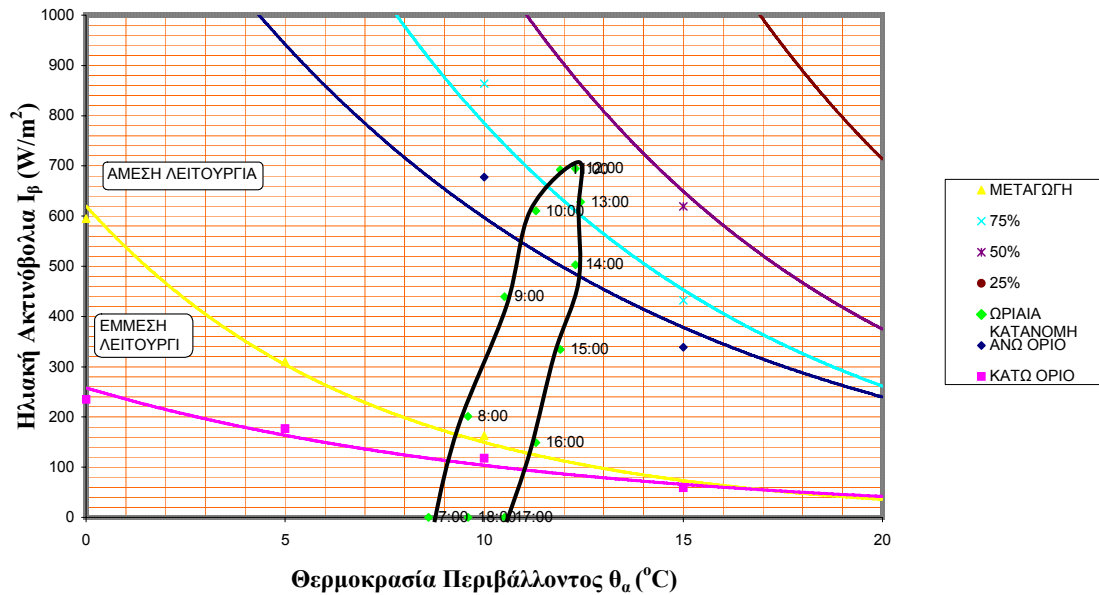
Έτσι, στο παρακάτω διάγραμμα, εμφανίζεται:

- η καμπύλη μεταγωγής από έμμεση σε άμεση λειτουργία σαν η χαρακτηριστική επίλυση του μοντέλου για  $COP_{tot}^A = COP_{tot}^E$ .
- η καμπύλη του κάτω ορίου-ανάψυξης του χώρου για  $Q_u < Q_n$
- η καμπύλη του άνω ορίου-υπερθέρμανσης του χώρου για  $Q_u > Q_n$
- ο ημερήσιος χαρακτηριστικός βρόγχος της 15<sup>ης</sup> Ιανουαρίου που αποτελείται από 12 σημεία (είναι οι ώρες που μπορεί κάποια στιγμή του έτους να έχουν θετική ηλιακή ακτινοβολία  $I_\beta$ ).

Παρατηρούμε ότι στο διάστημα 7:00 έως 8:00 και 16:00 έως 18:00 προτείνεται η έμμεση λειτουργία ως ενεργειακά βέλτιστη, ενώ στο διάστημα 8:00 έως 16:00 προτείνεται η άμεση λειτουργία της εγκατάστασης.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ : Από τις 10:00 έως τις 14:00 παρατηρούμε ότι η λειτουργία περνά στην περιοχή υπερθέρμανσης του χώρου όπου χρειάζεται η ρύθμιση των ντάμπερ από 87% στις 10:00 έως 62% στις 12:00 και 98% στις 14:00.

"ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΚΑΤΑΝΟΜΗ"



**Διάγραμμα1.** Χαρακτηριστική καμπύλη μεταγωγής από έμμεση σε άμεση λειτουργία αεροσυλλεκτών,  $COP_{tot}^A = COP_{tot}^E$  (ευρίσκεται μεταξύ των καμπυλών του κάτω ορίου-ανάψυξης και του άνω ορίου-υπερθέρμανσης)

### 3.2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΣΤΟ ΒΙΟΚΛΙΜΑΤΙΚΟ ΚΤΙΡΙΟ

Με την χρήση συστήματος ενεργειακής διαχείρισης κτιρίου (BEMS), πραγματοποιήθηκαν στο κτίριο ΚΑΠΕ, μετρήσεις που αφορούσαν την λειτουργία του συστήματος (άμεση και έμμεση) και την απόδοση των ηλιακών συλλεκτών.

#### 3.2.1. Μέτρηση απόδοσης συλλέκτη αέρα

Στην παθητική λειτουργία, η ημερήσια τιμή της απολαβής  $Q_u$  του αέρα προσαγωγής στον χώρο καθώς και η μέση ημερήσια τιμή απόδοσης  $\eta$  της δεξιάς συστοιχίας συλλεκτών δίδονται στον Πίνακα1. Στην υβριδική-έμμεση λειτουργία, η ημερήσια τιμή της απολαβής  $Q_u$  του αέρα προσαγωγής στον εξατμιστή της αντλίας θερμότητας, καθώς και η μέση ημερήσια τιμή απόδοσης  $\eta$  της δεξιάς συστοιχίας συλλεκτών δίδονται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2: Ποσοτικά αποτελέσματα για τους αεροσυλλέκτες σε υβριδική λειτουργία			
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	$I_{\beta}$ , ΗΛ. ΑΚΤΙΝ (Wh/m <sup>2</sup> )	$Q_u$ (Wh)	$\eta$
ΗΜΕΡΗΣΙΕΣ ΤΙΜΕΣ	3094,78	12703,91	52,0%

#### 3.2.2. Μέτρηση απόδοσης αντλίας θερμότητας αέρα-νερού

Στην παθητική λειτουργία, η ημερήσια τιμή της στιγμιαίας ενέργειας  $Q_{A/\theta}$  του νερού, η στιγμιαία απορροφούμενη ισχύς  $Q_{elA/\theta}$  εΙ και ο μέσος ημερήσιος συντελεστής συμπεριφοράς της A/θ  $COP_{A/\theta}^A$  δίδονται στον πίνακα 3.

Πίνακας 3: Ποσοτικά αποτελέσματα για την A/θ-αντλία θερμότητας όταν οι συλλέκτες είναι σε παθητική λειτουργία (η A/θ λειτουργεί με ατμοσφαιρικό αέρα)				
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	Ta (oC)	$Q_{A/\theta}$ (Wh)	$Q_{elA/\theta}$ (Wh)	$COP_{A/\theta}^A$
ΗΜΕΡΗΣΙΕΣ ΤΙΜΕΣ (4/2/03)	10.2	79851.39	23987.20	3.33
ΗΜΕΡΗΣΙΕΣ ΤΙΜΕΣ (5/3/03)	5.5	21092.82	7976.67	2.64

Στην υβριδική λειτουργία, η ημερήσια τιμή της στιγμιαίας ενέργειας  $Q_{A/\theta}$  του νερού, η στιγμιαία απορροφούμενη ισχύς  $Q_{elA/\theta}$  και ο μέσος ημερήσιος συντελεστής συμπεριφοράς της A/θ  $COP_{A/\theta}^E$  δίδονται στον πίνακα 4.

Πίνακας 4: Ποσοτικά αποτελέσματα για την Α/Θ-αντλία θερμότητας, όταν οι συλλέκτες είναι σε υβριδική λειτουργία (η Α/Θ λειτουργεί με ηλιακό αέρα)				
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	T <sub>a</sub> (oC)	Q <sub>A/Θ</sub> (Wh)	Q <sub>elA/Θ</sub> (Wh)	COP <sup>E</sup> <sub>A/Θ</sub>
ΗΜΕΡΗΣΙΕΣ ΤΙΜΕΣ (21/2/03)	4.2	48546.96	14092.53	3.44
ΗΜΕΡΗΣΙΕΣ ΤΙΜΕΣ (11/3/03)	9.3	24775.71	5012.41	4.94

#### 4. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ – ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ

##### 4.1. Ως προς τα συνολικά εποχικά αποτελέσματα της περιόδου θέρμανσης

Δεν είναι εφικτή η σύγκριση μεταξύ μετρήσεων και υπολογισμών με κριτήριο την ολοκλήρωση των διαφόρων ποσών ενέργειας συνολικά σε όλη την περίοδο θέρμανσης, επειδή στις μετρήσεις δεν υπήρξαν ποτέ συνολικά εποχικά αποτελέσματα. Για λόγους πειραματισμού σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας, δεν έγιναν μετρήσεις με σταθερές παραμέτρους για όλη τη διάρκεια της θερμοκρασιακής περιόδου, παρά μόνο για πεπερασμένα χρονικά διαστήματα της τάξης των δύο συνεχιζόμενων εβδομάδων (π.χ. κάναμε συχνά μεταγωγή από άμεση σε έμμεση θέρμανση ανάλογα με τον καιρό). Παρόλα αυτά έγινε εφικτή η σύγκριση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης τόσο του πρόγραμματος TRANSYS όσο και του απλουστευμένου μοντέλου. Η σύγκριση γίνεται σε φάση άμεσης θέρμανσης (μόνο) και για όλη την περίοδο θέρμανσης. Τα σχετικά αποτελέσματα υπολογισμών καθώς και οι προκύπτουσες αποκλίσεις από το TRANSYS (θεωρήθηκε σα βάση αναφοράς) περιέχονται στον πίνακα 5.

Παρατηρούμε ότι, με εξαίρεση την ειδική εποχική απολαβή του συλλέκτη αέρα, οι αποκλίσεις βρίσκονται σε ένα φάσμα  $\pm 10\%$ , πράγμα που μπορεί να οδηγήσει σε μια αξιόπιστη εφαρμογή του εν λόγω απλουστευμένου μοντέλου T<sub>sagair</sub>

Πίνακας 5: Υπολογισμοί παραμέτρων και αποκλίσεις μεταξύ δύο μεθόδων προσομοίωσης για ολόκληρη τη θερμοκρασιακή περίοδο (άμεση θέρμανση) στο βιοκλιματικό κτίριο του ΚΑΠΕ την 15 <sup>η</sup> Ιανουαρίου 2003			
Παράμετρος σύγκρισης	Αποτελέσματα με το TRANSYS 15	Αποτελέσματα με το μοντέλο T <sub>sagair</sub>	Απόκλιση
Εποχιακή ηλ. ακτινοβολία	430 kWh/m <sup>2</sup>	455 kWh/m <sup>2</sup>	+5,81%
Εποχιακή απολαβή συλλέκτη	93 kWh/m <sup>2</sup>	105 kWh/m <sup>2</sup>	+12,90%
Συνολικό φορτίο δύο γραφείων (με θερμ. κέρδη)	1878 kWh	1935 kWh	+3,04%
Συντελεστής κάλυψης φορτίου	86 %	94,4 %	+9,58%

Ενδεικτικά επίσης αναφέρουμε ότι η προσομοίωση με TRANSYS 15 έδωσε μέσο **εποχιακό** βαθμό απόδοσης συλλεκτών:

<b>21,6 %</b> (άμεση)	<b>47,1 %</b> (έμμεση)
-----------------------	------------------------

Ενώ οι μετρήσεις έδωσαν μέσο **ημερήσιο** βαθμό απόδοσης συλλεκτών:

<b>39,2 %</b> (άμεση-25-04-02)	<b>52 %</b> (έμμεση-05-03-02)
--------------------------------	-------------------------------

##### 4.2. Ως προς τα ημερήσια αποτελέσματα της περιόδου θέρμανσης

Η σύγκριση μετρήσεων-υπολογισμών γίνεται σε τέσσερα πεδία:

- Απόκλιση στον υπολογισμό του βαθμού απόδοσης του ηλιακού συλλέκτη αέρα (δεξιάς συστοιχίας) όταν αυτός λειτουργεί σε παθητική (άμεση) θέρμανση. Ελήφθη η μέτρηση της 25<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου, ενώ οι υπολογισμοί έγιναν με το μοντέλο για τις μέσες ημερήσιες τιμές των θερμοκρασιών και τη ηλιακή ακτινοβολία.

Η απόκλιση Δ<sub>η</sub> λογίζεται με βάση αναφοράς τη μέτρηση.

Τα σχετικά αποτελέσματα υπολογισμών δίδονται στον Πίνακα 6:

Πίνακας 6: Απόκλιση συλλέκτη σε παθητική (άμεση) θέρμανση				
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	I <sub>β</sub> , ΗΛ.ΑΚΤ. (Wh/m <sup>2</sup> )	Q <sub>u</sub> (Wh)	η	Δ <sub>η</sub>
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ (25/4/03)	1569,37	4864,16	39,2%	
ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ	1719	6111	45%	<b>14,8%</b>

- Απόκλιση στον υπολογισμό του βαθμού απόδοσης του ηλιακού συλλέκτη αέρα (δεξιάς συστοιχίας) όταν αυτός λειτουργεί σε υβριδική (έμμεση) θέρμανση. Ελήφθη η μέτρηση της 5<sup>ης</sup> Μαρτίου, ενώ οι υπολογισμοί έγιναν με το μοντέλο για τις μέσες ημερήσιες τιμές των θερμοκρασιών και τη ηλιακή ακτινοβολία.

Η απόκλιση Δη λογίζεται με βάση αναφοράς τη μέτρηση.

Τα σχετικά αποτελέσματα υπολογισμών δίδονται στον Πίνακα 7:

Πίνακας 7: Απόκλιση συλλέκτη σε υβριδική (έμμεση) θέρμανση				
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	$I_b$ , ΗΛ.ΑΚΤ.(Wh/m <sup>2</sup> )	$Q_u$ (Wh)	$\eta$	$\Delta\eta$
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ (5/3/02)	3094,78	12703,91	52,0%	
ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ	24151,72	14008	58,0%	<b>11,5%</b>

- Απόκλιση στον υπολογισμό του συντελεστή συμπεριφοράς της αντλίας θερμότητας αέρα-νερού όταν ο συλλέκτης λειτουργεί σε παθητική (άμεση) θέρμανση. Ελήφθη η μέτρηση τόσο της 4<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου (με θερμοκρασία 10,2 oC) όσο και της 5<sup>ης</sup> Μαρτίου (με χαμηλότερη θερμοκρασία 5,5 oC) ενώ οι υπολογισμοί έγιναν με το μοντέλο για τις μέσες ημερήσιες τιμές των θερμοκρασιών.

Η απόκλιση Δ(COP) λογίζεται με βάση αναφοράς τη μέτρηση.

Τα σχετικά αποτελέσματα υπολογισμών δίδονται στον Πίνακα 8:

Πίνακας 8: Απόκλιση αντλίας θερμότητας σε παθητική (άμεση) θέρμανση					
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	Ta(oC)	$Q_{A/\theta}$ (Wh)	$Q_{elA/\theta}$ (Wh)	$COP^A_{A/\theta}$	$\Delta(COP)$
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ (4/2/03)	10.2	79851.39	23987.20	3.33	
ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ	10.2	84323,07	23553,93	3,68	<b>7,5%</b>
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ (5/3/03)	5.5	21092.82	7976.67	2.64	
ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ	5.5	23181,01	7857,97	2,95	<b>11,74%</b>

- Απόκλιση στον υπολογισμό του συντελεστή συμπεριφοράς της αντλίας θερμότητας αέρα-νερού όταν ο συλλέκτης λειτουργεί σε υβριδική (έμμεση) θέρμανση. Ελήφθη η μέτρηση τόσο της 21<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου (με θερμοκρασία 4,2 oC) όσο και της 11<sup>ης</sup> Μαρτίου (με υψηλότερη θερμοκρασία 9,3 oC) ενώ οι υπολογισμοί έγιναν με το μοντέλο για τις μέσες ημερήσιες τιμές των θερμοκρασιών.

Η απόκλιση Δ(COP) λογίζεται με βάση αναφοράς τη μέτρηση.

Τα σχετικά αποτελέσματα υπολογισμών δίδονται στον Πίνακα 9:

Πίνακας 9: Απόκλιση αντλίας θερμότητας σε υβριδική (έμμεση) θέρμανση					
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	Ta (oC)	$Q_{A/\theta}$ (Wh)	$Q_{elA/\theta}$ (Wh)	$COP^E_{A/\theta}$	$\Delta(COP)$
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ (21/2/03)	4.2	48546.96	14092.53	3.44	
ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ	4.2	51779,61	12885,47	4,02	<b>16,8%</b>
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ (11/3/03)	9.3	24775.71	5012.41	4.94	
ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ	9.3	26757	5029	5,32	<b>7,7%</b>

Παρατηρούμε ότι το απλουστευμένο μοντέλο υπολογισμού ηλιοβοηθούμενων αντλιών θερμότητας στο κτίριο παρουσιάζει αποδεκτή απόκλιση από τις υλοποιημένες μετρήσεις της τάξης του 16,8%. Ήδη το πρόγραμμα TRANSYS 15 παρουσιάζει αποκλίσεις της τάξης του 11%

**Συμπεραίνεται ότι η χρήση του μοντέλου “TSAGAIR” θεωρείται αξιόπιστη.**

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Τόσο οι μετρήσεις που έγιναν στο βιοκλιματικό κτίριο του ΚΑΠΕ όσο και οι υπολογισμοί επί συστήματος εξισώσεων ήταν αντικείμενο του ερευνητικού προγράμματος ΠΑΒΕ 063 της εταιρείας SOLE SA με επιστημονικό υπεύθυνο τον Δρα Μ. Καράγιωργα και με τίτλο «Σχεδιασμός και ανάπτυξη ηλιακών συλλεκτών αέρα για κτιριακές εφαρμογές»

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Balaras, C.A., Kallos G., Stathi A., Kritikou S., 'On the Relationship of Beam Transmittance on Clearness Index for Athens, Greece', Int J. Solar Energy, Vol.7, p.171, 1989.
2. Gueymard C., 'An Isotropic Solar Irradiance Model for Tilted Surfaces and its Comparison with Selected Engineering Algorithms', Solar Energy Vol. 40, pp.175, 1998.
3. Καράγιωργας Μ., 'Αντλίες θερμότητας: Διεποχικός συντελεστής συμπεριφοράς και η σχέση του με την οικονομικότητα', 4<sup>ο</sup> Εθνικό Συνέδριο για τις Ήπιες Μορφές Ενέργειας, Πρακτικά Τομ. Β', Ξάνθη, 1992.
4. IEA . Report on Solar Air Systems-A Design Handbook, 2002.
5. Βασιλική Ν. Δρόσου, "Βέλτιστος Σχεδιασμός Επίπεδου Ηλιακού Συλλέκτη Αέρα Για Χρήση Σε Ξηραντήριο Γεωργικών Προϊόντων", ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ, ΤΕΙ ΑΘΗΝΑΣ, 1998.
6. Μπολολιά Μαρία-Βασιλική, 'Αξιολόγηση Ηλιακών Συλλεκτών Αέρα σε Βιοκλιματικό Κτίριο', Πτυχιακή Εργασία, ΑΣΕΤΕΜ-ΣΕΛΕΤΕ, 2002.
7. ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΣΥΛΛΕΚΤΗ ΑΕΡΑ AIRSOL-300, SOLE A.E, 2003.
8. «Συλλέκτες Ηλιακής Ενέργειας», Θεωρία-κατασκευή συστημάτων θερμάνσεως νερού, Φ. Κωτσιανά-Δ.Χούντας 2<sup>η</sup> Έκδοση, 1989.
9. Δ.Α.Κουρεμένος-Κ.Α.Αντωνόπουλος, ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ 35 ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΠΟΛΕΩΝ, ΕΜΠ, 1984.
10. ASHRAE, Handbook of Fundamentals, American Society of Heating, Refrigeration and Air-conditioning Engineers, 1997.