

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΔΥΟ
ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΩΝ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΣΚΕΥΩΝ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ
ΝΕΡΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ – ΑΠΟΘΗΚΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ**



ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ: ΖΩΡΑΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ, ΤΖΙΩΤΗΣ ΠΕΤΡΟΣ

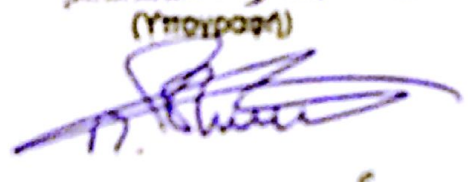
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΚΑΜΠΟΥΡΙΔΗΣ

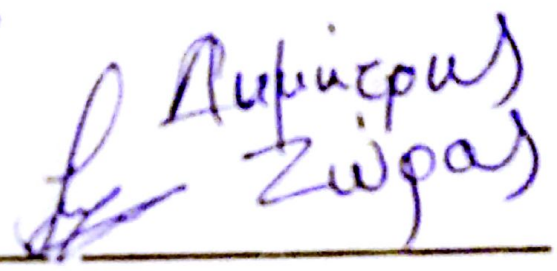
ΠΑΤΡΑ 2015

Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδαστών: Οι κάτωθι υπογεγραμμένοι σπουδαστές έχουμε επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνουμε υπεύθυνα ότι είμαστε συγγραφείς αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, αναλαμβάνοντας την ευθύνη επί ολοκλήρου του κειμένου εξ ίσου, έχουμε δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μας όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποιήσαμε και λάβαμε ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνουμε επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχουμε ενσωματώσει στην εργασία μας προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχουμε πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχουμε αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Οι σπουδαστές

(Όνοματεπώνυμο)
Τσιώτας Πέτρος

(Υπογραφή)


Αυμύρας
Σώρας


{ }

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία περιλαμβάνει τη μελέτη δύο ολοκληρωμένων ηλιακών θερμικών συσκευών που συνδυάζουν συλλέκτη και αποθήκη θερμότητας σε ενιαία μονάδα. Μελετήθηκαν δύο πειραματικά μοντέλα τα οποία κατασκευάστηκαν στο Εργαστήριο. Η μελέτη περιλαμβάνει αρχικά τη γεωμετρική ανάλυση της σύνθετης γεωμετρίας των κατοπτρικών διατάξεων που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των δύο συστημάτων καθώς και τη συγκριτική πειραματική τους μελέτη κάτω από πραγματικές συνθήκες λειτουργίας σε πεδίο δοκιμών.

Η επιτήρηση και η καθοδήγηση έγινε από τους κ.κ. Εμμανουήλ Σουλιώτη, Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας και τέως Επιστημονικό Συνεργάτη του ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας και Γεώργιο Καμπουρίδη, καθηγητή του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ του ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας. Τους ευχαριστούμε θερμά για το χρόνο που διέθεσαν, την πολύτιμη βοήθεια που μας προσέφεραν και τις γνώσεις που μας μετέδωσαν πάνω σε ένα πολύ ενδιαφέρον κομμάτι των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας.

Ζώρας Δημήτριος

Τζιώτης Πέτρος

Πάτρα 2015

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε η μελέτη ηλιακών συσκευών θέρμανσης νερού που συνδυάζουν συλλέκτη και αποθήκη θερμότητας σε ενιαία μονάδα. Στο πρώτο κεφάλαιο της πτυχιακής εργασίας που ουσιαστικά είναι η εισαγωγή γίνεται αναφορά στην σημασία που έχουν οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στον κόσμο και στον άνθρωπο και πως μπορούμε να εκμεταλλευτούμε διάφορους φυσικούς πόρους. Επίσης γίνεται αναφορά στις κατηγορίες των θερμικών ηλιακών συστημάτων. Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια εκτενής αναφορά στις ηλιακές συσκευές συλλέκτη αποθήκης θερμότητας, τα λειτουργικά τους στοιχεία και οι βασικές αρχές σχεδίασης. Επίσης παρουσιάζονται αναλυτικά η γεωμετρία η κατασκευή και η εγκατάσταση των προτεινόμενων πειραματικών μοντέλων. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη των ηλιακών συστημάτων και η μέθοδος πειραματικής μελέτης. Γίνεται αναφορά στα διάφορα όργανα μετρήσεων που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διαδικασία. Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα βασικότερα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών και καταγράφονται τα συμπεράσματα από την εκπόνηση της Εργασίας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	iii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	iv
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	vii
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	
ΗΛΙΑΚΕΣ ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΣΥΛΛΕΚΤΗ – ΑΠΟΘΗΚΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΣΥΣΚΕΥΩΝ ICS	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΤΩΝ ΣΥΣΚΕΥΩΝ ICS	57
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	69
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	73

1.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) είναι ενεργειακές πηγές τα αποθέματα των οποίων ανανεώνονται φυσικά, και θεωρούνται ότι είναι πρακτικά ανεξάντλητες. Στις ανανεώσιμες ενεργειακές πηγές θα βασιστεί η ενεργειακή βιωσιμότητα του πλανήτη για τον 21ο αιώνα και περιλαμβάνονται η ηλιακή ενέργεια, η αιολική ενέργεια, η ενέργεια του νερού, η βιομάζα και η γεωθερμία.

Μέχρι τις αρχές του 20ου αιώνα η ανθρωπότητα χρησιμοποιούσε κυρίως την ενέργεια του νερού, του ανέμου και την βιομάζα (ξύλο). Όμως με την ανακάλυψη των μεγάλων κοιτασμάτων κάρβουνου και πετρελαίου, ο κόσμος στράφηκε αποφασιστικά στη χρήση μη ανανεώσιμων πηγών, κυρίως άνθρακα και υδρογονανθράκων (κάρβουνο, πετρέλαιο, φυσικό αέριο) και μετά τα μέσα του 20ου αιώνα άρχισε να χρησιμοποιείται και η πυρηνική ενέργεια.

Δύο ήταν οι κρίσιμοι παράγοντες στην αναβίωση του ενδιαφέροντος για τις ΑΠΕ, ξεκινώντας από τα μέσα της δεκαετίας του 1970. Ο πρώτος ήταν το ζήτημα της ενεργειακής ασφάλειας, οι δύο πετρελαϊκές κρίσεις, του 1973 και του 1979-80, οδήγησαν τις βιομηχανικά ανεπτυγμένες χώρες να αναθεωρήσουν την απόλυτη εξάρτηση τους από τα ορυκτά καύσιμα, και ιδιαίτερα το πετρέλαιο.

Το δεύτερο στοιχείο που οδήγησε στην ολική επαναφορά των ΑΠΕ ήταν, το φαινόμενο του θερμοκηπίου, το οποίο, ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια, έχει αναχθεί σε προτεραιότητα της Διεθνούς Κοινότητας. Ο ενεργειακός τομέας είναι ο κύριος υπεύθυνος για τη ρύπανση του περιβάλλοντος, καθώς σχεδόν το 95 % της

ατμοσφαιρικής ρύπανσης που συμβάλει στο φαινόμενο θερμοκηπίου και που οδηγεί στην υπερθέρμανση του πλανήτη οφείλεται στην παραγωγή, τη μετατροπή και τη χρήση των συμβατικών καυσίμων.

Τα βασικά πλεονεκτήματα της χρήσης ΑΠΕ είναι τα εξής:

- Συμβολή στη μείωση της εξάρτησης από συμβατικούς, μη ανανεώσιμους ενεργειακούς πόρους.
- Συμβολή στην άμβλυνση του φαινομένου του θερμοκηπίου, καθώς συνεισφέρουν στον περιορισμό της εκπομπής των αερίων του θερμοκηπίου (CO₂, CH₄, N₂O, HFCs, PFCs, SF₆) στην ατμόσφαιρα.
- Συνεισφορά στην ενίσχυση της ενεργειακής ανεξαρτησίας και της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού σε εθνικό επίπεδο.
- Αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος, εξαιτίας της γεωγραφικής τους διασποράς, με αποτέλεσμα τη δυνατότητα κάλυψης των ενεργειακών αναγκών σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο και τη συνεπακόλουθη ανακούφιση των συστημάτων υποδομής και τον περιορισμό των απωλειών από τη μεταφορά ενέργειας.
- Δυνατότητα ορθολογικής αξιοποίησης των ενεργειακών πόρων, με διαφορετικές λύσεις για διαφορετικές ενεργειακές ανάγκες (για παράδειγμα χρήση ηλιακής ενέργειας για θερμότητα χαμηλών θερμοκρασιών, χρήση αιολικής ενέργειας για ηλεκτροπαραγωγή κ.ά.).
- Χαμηλό λειτουργικό κόστος που δεν επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις της διεθνούς οικονομίας και ειδικότερα των τιμών των συμβατικών καυσίμων.
- Συνεισφορά στην αναζωογόνηση οικονομικά και κοινωνικά υποβαθμισμένων περιοχών με τη δημιουργία θέσεων εργασίας και την προσέλκυση ανάλογων επενδύσεων (π.χ. καλλιέργειες θερμοκηπίου με τη χρήση γεωθερμικής ενέργειας).

1.2. Ηλιακή Ενέργεια

Ηλιακή ενέργεια χαρακτηρίζεται το σύνολο των διαφόρων μορφών ενέργειας που προέρχονται από τον Ήλιο. Τέτοιες είναι το φως ή φωτεινή ενέργεια, η θερμότητα ή θερμική ενέργεια καθώς και διάφορες ακτινοβολίες ή ενέργεια ακτινοβολίας.

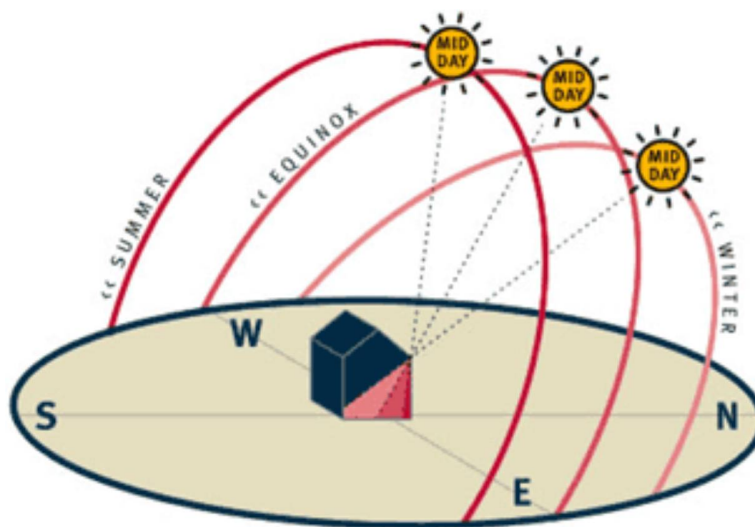
Η συνολική ενέργεια στη μονάδα του χρόνου (ισχύς) που προέρχεται από μια πηγή ακτινοβολίας και προσπίπτει σε μια μοναδιαία επιφάνεια, αποτελεί την πυκνότητα ισχύος ή ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και μετράται σε (W/m^2). Συμβολίζεται γενικά με το γράμμα G . Η τιμή της σε ορισμένη ώρα και σημείο στην επιφάνεια της γης εξαρτάται από την θέση του ήλιου στον ουρανό, το υψόμετρο του τόπου αλλά και τις μετεωρολογικές συνθήκες. Η θερμοκρασία στην επιφάνεια του ήλιου υπολογίζεται ότι είναι περίπου 6,000 K. Η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στο όριο της ατμόσφαιρας της γης είναι περί τα $1,370 \text{ W}/\text{m}^2$ και είναι μειωμένη στην επιφάνεια της γης ($\sim 1,000 \text{ W}/\text{m}^2$) λόγω απορρόφησης και σκέδασής της από την ατμόσφαιρα.

Η θερμοκρασία στην ατμόσφαιρα της Γης είναι περίπου 230 K κατά μέσο όρο και στην επιφάνεια της Γης είναι περίπου 260-300 K, η οποία παραμένει σταθερή εξαιτίας της ακτινοβολίας που αντανακλά πίσω στο διάστημα και αυτής που εκπέμπει. Η συνολικά απορροφούμενη ηλιακή ενέργεια από την ατμόσφαιρα της Γης, τους ωκεανούς και την επιφάνειά της, στη διάρκεια ενός έτους, είναι 3.85 εκατ. exajoules (EJ) (3.85×10^{18} joules).

1.2.1 Ηλιακή Γεωμετρία

Η ισχύς της ηλιακής ακτινοβολίας παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση συναρτήσει του χρόνου, της εποχής, των κλιματολογικών συνθηκών, της υγρασίας, κλπ. Επιπλέον, επηρεάζεται σημαντικά και από άλλους παράγοντες όπως από την ρύπανση του περιβάλλοντος και τις ηλιακές κηλίδες.

Ο πιο σημαντικός παράγοντας που διαμορφώνει την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας είναι η τοποθεσία που προσπίπτει η ακτινοβολία [1-2]. Κατά την διάρκεια ενός έτους, λόγω της περιφοράς της γης γύρω από τον ήλιο, η τοποθεσία λαμβάνει διάφορες θέσεις και έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή της απόκλισης δ , δηλαδή της γωνιακής θέσης του ήλιου κατά την ηλιακή μεσημβρία σε σχέση με το ισημερινό επίπεδο και λαμβάνεται θετική προς βορρά (σχήμα 1.1). Οι ακραίες τιμές για το Βόρειο ημισφαίριο είναι $+23.45^\circ$ στις 21 Ιουνίου και -23.45° στις 21 Δεκεμβρίου.



Σχήμα 1.1: Φαινόμενη Πορεία του Ήλιου

Η κλίση ενός θερμικού συστήματος ή μίας φωτοβολταϊκής διάταξης πρέπει να είναι εντός αυτών των ορίων και ο καλύτερος προσανατολισμός για τα συστήματα αυτά είναι ο νότιος για το βόρειο ημισφαίριο, και ο βόρειος για το νότιο ημισφαίριο. Η βέλτιστη γωνία κλίσης για τα συστήματα αυτά, ως προς την φαινόμενη θέση του ήλιου στον ουρανό μπορεί να υπολογιστεί από τις εξισώσεις:

$$(Γωνία κλίσης) \beta = (Γεωγραφικό πλάτος) \varphi - (Γωνία Απόκλισης) \delta ,$$

όπου

$$\delta = 23.45^\circ \sin\left(360 \frac{284 + n}{365}\right) \text{ (σε μοίρες)} \quad (1.1)$$

n : ο αριθμός της ημέρας του έτους, $n = 1$ για την 1η Ιανουαρίου.

Η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε μια επιφάνεια, συνίσταται στην άμεση, στη διάχυτη και στην ανακλώμενη ακτινοβολία. Με κατάλληλους δείκτες σε περίπτωση που αναφερόμαστε στη άμεση (b, beam), στη διάχυτη (d, diffuse) ή στην ανακλώμενη (r, reflected) ακτινοβολία συνοδεύουμε το γράμμα G.

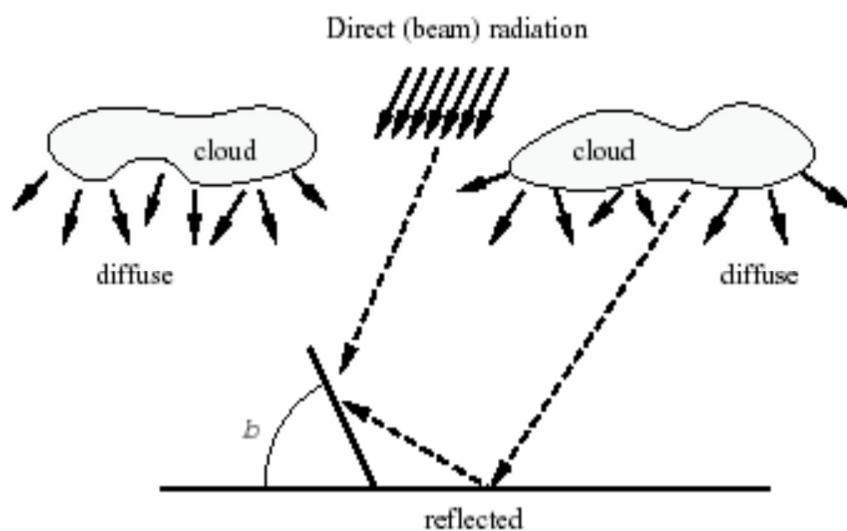
Άμεση ακτινοβολία (G_b), ορίζουμε την ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της Γης με ελάχιστη ή χωρίς σκέδαση στην ατμόσφαιρα. Η άμεση ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε μία επιφάνεια εξαρτάται από την απορρόφηση και διάχυση της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στην ατμόσφαιρα, το ύψος του ήλιου, το γεωγραφικό πλάτος του τόπου, το υψόμετρο του τόπου, την κλίση της επιφάνειας, την απόσταση ήλιου – Γης, την απόκλιση του ήλιου.

Διάχυτη ακτινοβολία (G_d) ορίζουμε την ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της Γης αφού έχει αλλάξει η διεύθυνσή της από ανάκλαση ή σκέδαση στην ατμόσφαιρα, και από ανάκλαση στην επιφάνεια της Γης. Η διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία εξαρτάται από το ύψος του ήλιου, το υψόμετρο του τόπου, τη

λευκαύγεια του εδάφους, το ποσό και το είδος των νεφών, το ποσό και το είδος των σωματιδίων και των αερίων της ατμόσφαιρας.

Ανακλώμενη ακτινοβολία (G_r) φτάνει στο επίπεδο αναφοράς μετά από ανάκλαση σε φυσικές ή τεχνικές επιφάνειες, που υπάρχουν στον περιβάλλοντα χώρο. Έτσι η γνώση της απαιτεί κάθε φορά καλή γνώση της τοπογραφίας του χώρου και του δείκτη ανακλαστικότητας των επιφανειών, που ανακλούν την ηλιακή ακτινοβολία.

Ολική ακτινοβολία (G) ορίζουμε το άθροισμα της άμεσης και διάχυτης ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της Γης.



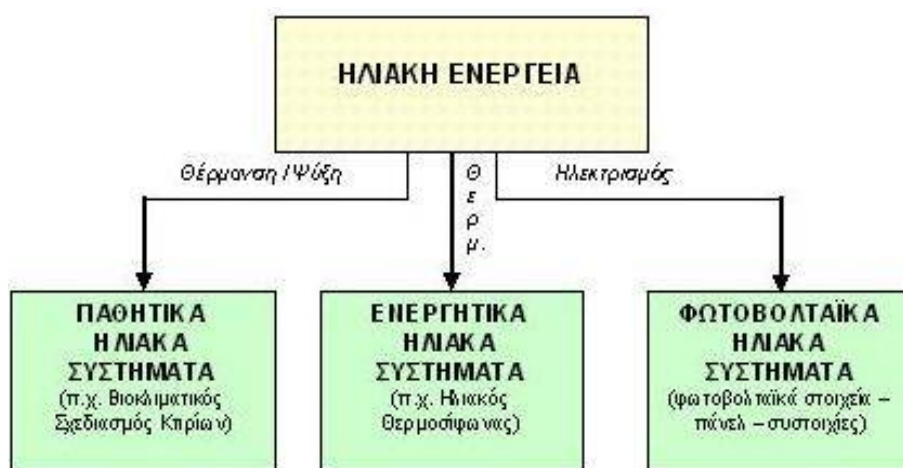
Σχήμα 1.2: Άμεση, διάχυτη και ανακλώμενη ακτινοβολία

Η ηλιακή ενέργεια στο σύνολό της είναι πρακτικά ανεξάντλητη, αφού προέρχεται από τον ήλιο, και ως εκ τούτου δεν υπάρχουν περιορισμοί χώρου και χρόνου για την εκμετάλλευσή της.

1.3 Ηλιακά Συστήματα

Όσον αφορά την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας, θα μπορούσαμε να πούμε ότι χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες εφαρμογών τα παθητικά ηλιακά συστήματα, τα θερμικά ηλιακά συστήματα και τα φωτοβολταϊκά συστήματα (Σχήμα 3).

Τα παθητικά και τα θερμικά ηλιακά συστήματα εκμεταλλεύονται τη θερμότητα που εκπέμπεται μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ τα φωτοβολταϊκά συστήματα στηρίζονται στη μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρικό ρεύμα μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου.



Σχήμα 1.3: Μετατροπή ηλιακής ενέργειας σε διάφορες μορφές.

1.3.1 Παθητικά Ηλιακά Συστήματα

Παθητικά ηλιακά συστήματα θέρμανσης ονομάζουμε τα δομικά στοιχεία του κτιρίου, που, αξιοποιώντας τις αρχές της φυσικής (τους νόμους μεταφοράς θερμότητας) συλλέγουν την ηλιακή ενέργεια, την αποθηκεύουν υπό μορφή θερμότητας και τη διανέμουν στο χώρο. Αναγκαία προϋπόθεση για τη σωστή

λειτουργία των παθητικών ηλιακών συστημάτων ώστε να αξιοποιήσουν όσο το δυνατό περισσότερο την ηλιακή ενέργεια, είναι ένας κατάλληλος σχεδιασμός του κτιρίου. Αυτό σημαίνει ότι το κέλυφος πρέπει να επιτρέπει:

- Τη μέγιστη ηλιακή συλλογή.
- Τη μέγιστη θερμοχωρητικότητα.
- Τις ελάχιστες θερμικές απώλειες.

Η λειτουργία των παθητικών συστημάτων βασίζεται σε 3 μηχανισμούς:

- Στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, κατά το οποίο γίνεται συλλογή της ηλιακής ακτινοβολίας και αυτή διατηρείται στο εσωτερικό του κτηρίου έτσι ώστε να θερμαίνει τον χώρο.
- Στη θερμική υστέρηση των υλικών (θερμοχωρητικότητα υλικών).
- Στις αρχές που διέπουν την μετάδοση θερμότητας.

Τα είδη των παθητικών συστημάτων είναι τα εξής:

- Συστήματα άμεσου κέρδους, το πιο απλό σύστημα που αξιοποιεί την ηλιακή ακτινοβολία για την θέρμανση του κτιρίου και το άμεσο κέρδος μέσω των νότια προσανατολισμένων ανοιγμάτων.
- Συστήματα έμμεσου κέρδους-Ηλιακοί τοίχοι, ανήκουν τα συστήματα που αξιοποιούν έμμεσα τα ηλιακά οφέλη για την θέρμανση κτιρίου. Αυτά τα συστήματα απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο κέλυφος και ύστερα επιτρέπουν στην θερμότητα να διεισδύσει στους χώρους διαβίωσης.
- Συστήματα απομονωμένου κέρδους-Θερμοσιφωνικό σύστημα, βρίσκονται εκτός του κτιριακού περιβλήματος. Στα συστήματα απομονωμένου κέρδους η επιφάνεια συλλογής της ηλιακής ακτινοβολίας δεν βρίσκεται σε επαφή με τον

χώρο που επιθυμούμε να θερμάνουμε. Μεταξύ αυτής της επιφάνειας και το χώρο διαβίωσης υπάρχει ένας μηχανισμός μετάδοσης της θερμότητας όπως για παράδειγμα ένας ανεμιστήρας.

Στα συστήματα έμμεσου κέρδους περιλαμβάνονται:

- Οι τοίχοι θερμικής αποθήκευσης, που είναι ένας συνδυασμός τοίχου νότιου προσανατολισμού και μια εξωτερική διάφανη επιφάνεια στην εξωτερική πλευρά του τοίχου σε απόσταση συνήθως 10 cm. Η εξωτερική επιφάνεια του τοίχου πρέπει να είναι σκουρόχρωμη ώστε να μεγιστοποιεί την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Ο τοίχος κατασκευάζεται από υλικά μεγάλης θερμοχωρητικότητας για να διασφαλίζει χρονική υστέρηση τουλάχιστον 6 h ώστε η εσωτερική του επιφάνεια να έχει τη μέγιστη θερμοκρασία στην αρχή της νύχτας.
- Οι απλοί τοίχοι μάζας είτε συμπαγείς, είτε αποτελούμενοι από δοχεία που περιέχουν νερό ή υλικά αλλαγής φάσης.
- Οι τοίχοι μάζας Trombe-Michel (θερμοσιφωνικής ροής, με θυρίδες στο πάνω και στο κάτω μέρος τους).

Η χρήση των παθητικών ηλιακών συστημάτων αξιοποιείται κυρίως για ενεργειακά οφέλη κατά τους χειμερινούς μήνες, ενώ για το καλοκαίρι χρησιμοποιούνται απλές τεχνικές δροσισμού όπως ηλιοπροστασία και φυσικός αερισμός.

1.3.2 Θερμικά Ηλιακά Συστήματα

Τα θερμικά ηλιακά συστήματα είναι ενεργητικές ηλιακές εγκαταστάσεις όπου η μεταφορά της συλλεγόμενης ηλιακής θερμότητας πραγματοποιείται με κυκλοφορία θερμικού ρευστού. Η «καρδιά» ενός θερμικού ηλιακού συστήματος

είναι ο θερμικός ηλιακός συλλέκτης. Η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει στη μαύρη, μεταλλική συνήθως, επίπεδη επιφάνεια του ηλιακού συλλέκτη, η οποία απορροφά την ακτινοβολία και θερμαίνεται. Πάνω από την απορροφητική επιφάνεια βρίσκεται ένα διαφανές κάλυμμα, συνήθως από γυαλί ή πλαστικό, που αφήνει τις ακτίνες του ήλιου να περάσουν, αλλά εμποδίζει τη θερμότητα να ξεφύγει (μηχανισμός συναγωγής). Αν κυκλοφορήσει ρευστό σε επαφή με την απορροφητική επιφάνεια, «αποσπάται» ενέργεια και αυτή μεταφέρεται με την μορφή θερμού ρευστού, σε μια θερμομονωμένη δεξαμενή αποθήκευσης, από όπου θα την πάρουμε όταν τη χρειαστούμε. Τα θερμικά ηλιακά συστήματα χωρίζονται σε διάφορες κατηγορίες, ανάλογα με την τεχνολογία που χρησιμοποιούν, το μέγεθός τους, την εφαρμογή για την οποία προορίζονται, το κλίμα της περιοχής κ.α. Τα συστήματα αυτά διαθέτουν μεγάλη ποικιλία στις διατάξεις τους λόγω των διαφορετικών τρόπων που αυτά τα συστήματα προστατεύονται από τον παγετό. Τα θερμικά ηλιακά συστήματα διακρίνονται ανάλογα με την θερμοκρασία αποδοτικής λειτουργίας σε χαμηλής θερμοκρασίας (μέχρι 100 °C), σε ενδιάμεσης θερμοκρασίας (60 °C - 180 °C), σε μέσης θερμοκρασίας (100 °C - 400 °C) και σε υψηλής θερμοκρασίας (πάνω από 400 °C). Στην κατηγορία των θερμικών ηλιακών συστημάτων χαμηλής θερμοκρασίας, το ρευστό απολαβής της θερμότητας είναι το νερό, ο αέρας ή άλλο υγρό. Τα συστήματα μέσω των θερμοκρασιών περιλαμβάνουν κάποιο μέσο συγκέντρωσης της ακτινοβολίας (φακούς ή κάτοπτρα). Επίσης, τα θερμικά ηλιακά συστήματα διακρίνονται σε δυο κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο που γίνεται η ροή στο σύστημα, στα συστήματα φυσικής κυκλοφορίας και στα συστήματα εξαναγκασμένης κυκλοφορίας.

1.3.2.1 Συστήματα φυσικής κυκλοφορίας

Στα συστήματα φυσικής κυκλοφορίας ο όρος «φυσική κυκλοφορία» χρησιμοποιείται γιατί το σύστημα αυτό δεν χρειάζεται κανένα μηχανισμό ώστε να

παρέχει την επιπλέον ενέργεια όταν αποθηκεύει και μεταφέρει ηλιακή ενέργεια στο δοχείο αποθήκευσης. Υπάρχουν δύο κατηγορίες τέτοιων συστημάτων:

- Η πρώτη κατηγορία είναι οι συμπαγείς θερμαντήρες νερού ή ολοκληρωμένα συστήματα συλλέκτη-αποθήκευσης τα οποία αποτελούνται από μία ή περισσότερες δεξαμενές αποθήκευσης και τοποθετούνται σε ένα θερμομονωμένο περίβλημα με τη διαφανή πλευρά να είναι προσανατολισμένη προς τον ήλιο. Τα συστήματα φυσικής κυκλοφορίας είναι καλύτερα και προτιμότερα από τα συστήματα εξαναγκασμένης κυκλοφορίας διότι έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, συντηρούνται εύκολα και οικονομικά και θεωρούνται πιο προσιτά.
- Η δεύτερη κατηγορία είναι τα θερμοσιφωνικά συστήματα, τα οποία είναι κυρίως συστήματα με συστήματα με ρευστό απολαβής της θερμότητας το νερό. Τα θερμοσιφωνικά συστήματα στηρίζονται στη φυσική κυκλοφορία του νερού στους συλλέκτες και τη δεξαμενή, η οποία είναι τοποθετημένη πάνω από το συλλέκτη. Το νερό θερμαίνεται στον ηλιακό συλλέκτη, γίνεται ελαφρύτερο (η πυκνότητά του ελαττώνεται) και ανέρχεται προς τη δεξαμενή αποθήκευσης. Το ψυχρότερο νερό της δεξαμενής, ρέει με τη βοήθεια σωληνώσεων στο κατώτερο σημείο του συλλέκτη προκαλώντας κυκλοφορία σε όλο το σύστημα.

1.3.2.2 Συστήματα βεβιασμένης κυκλοφορίας

Τα συστήματα εξαναγκασμένης κυκλοφορίας (ή Κεντρικά Θερμικά Ηλιακά Συστήματα) λειτουργούν χρησιμοποιώντας βαλβίδες, ηλεκτρικές αντλίες και συστήματα ελέγχου ώστε να μπορούν να κυκλοφορούν το νερό και τα άλλα ρευστά μεταφοράς θερμότητας που χρησιμοποιούνται μέσα στους συλλέκτες. Αυτό το σύστημα δεν έχει συγκεκριμένους περιορισμούς τοποθέτησης σχετικώς με την απόσταση μεταξύ δεξαμενής και του ηλιακού συστήματος. Τα συστήματα αυτά είναι πιο σύνθετα συστήματα, αλλά με καλύτερη αισθητική ένταξη, πλήρη έλεγχο

της εγκατάστασης με απλό τρόπο, πολλές δυνατότητες εφαρμογών και πολλές δυνατότητες εγκατάστασης σύμφωνα με την αρχιτεκτονική του κτιρίου.

Τα συστήματα εξαναγκασμένης κυκλοφορίας νερού ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες:

- Στα ανοιχτού κυκλώματος, στα οποία χρησιμοποιούνται κυκλοφορητές έτσι ώστε να κυκλοφορεί το νερό χρήσης στους συλλέκτες. Ο διαφορικός θερμοστάτης θέτει σε λειτουργία τον κυκλοφορητή όταν η θερμοκρασία του νερού στην κορυφή του συλλέκτη είναι υψηλότερη από την θερμοκρασία στο πυθμένα της δεξαμενής αποθήκευσης. Βαλβίδα αντεπιστροφής εμποδίζει την αντίστροφη ροή του νερού και την απώλεια θερμότητας από τον συλλέκτη κατά την νύχτα. Η βοηθητική πηγή ενέργειας μπορεί να βρίσκεται στο σωλήνα εξόδου από την δεξαμενή με την μορφή θερμαντήρα εν σειρά χωρίς αποθηκευτική ικανότητα.
- Στα συστήματα κλειστού κυκλώματος, τα οποία περιλαμβάνουν αντιπηκτικό υγρό κύκλωμα ώστε να αποφεύγεται ο κίνδυνος παγώματος του συλλέκτη κατά τον χειμώνα αλλά και να περιορίζεται η διάβρωση από την συνεχή ροή του νερού του δικτύου ύδρευσης. Οι εναλλάκτες θερμότητας μπορεί να βρίσκονται μέσα στην δεξαμενή.

2.1 Γενικά για τις Ηλιακές Συσκευές Συλλέκτη – Αποθήκης Θερμότητας

Στις μέχρι τώρα εφαρμογές για οικιακή χρήση, οι ηλιακές συσκευές που χρησιμοποιούνται είναι είτε θερμοσιφωνικά συστήματα επίπεδων ηλιακών συλλεκτών (Flat Plat Thermosiphonic Units ή συντομογραφικά συσκευές FPTU), είτε διατάξεις επίπεδων ηλιακών συλλεκτών βεβιασμένης κυκλοφορίας ρευστού. Ακόμα, χρησιμοποιούνται και διατάξεις συγκεντρωτικών ή μη συγκεντρωτικών ηλιακών συλλεκτών κενού αλλά η εφαρμογή τους περιορίζεται σε περιπτώσεις όπου η διαθέσιμη επιφάνεια εγκατάστασης είναι περιορισμένη. Η χρήση συσκευών FPTU προορίζεται για ανεξάρτητες μικρού αλλά και μέσου μεγέθους κατοικίες ή μικρά συγκροτήματα κατοικιών και μικρές ξενοδοχειακές μονάδες. Στη δεύτερη κατηγορία η χρήση του θερμού νερού αφορά κυρίως συγκροτήματα κατοικιών, ξενοδοχειακές μονάδες μέσου και μεγάλου μεγέθους, ενώ δεν αποκλείεται και η περίπτωση βιομηχανικής εφαρμογής με κύριο στόχο την προθέρμανση του νερού που προορίζεται για χρήση. Το κοινό χαρακτηριστικό και στις δύο αυτές κατηγορίες ηλιακών συσκευών και διατάξεων είναι η χρήση εναλλάκτη θερμότητας, που χρησιμεύει για τη θέρμανση του νερού της δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας.

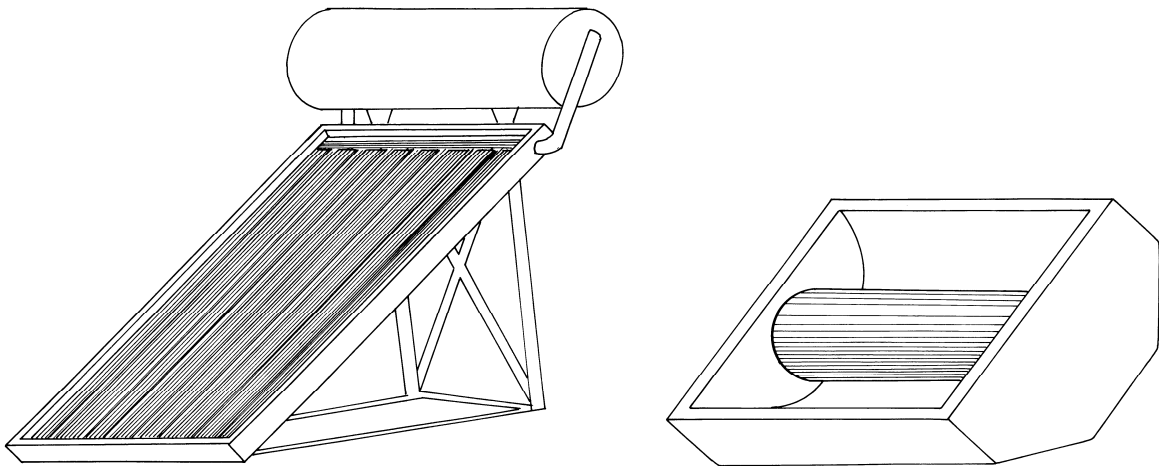
Εναλλακτικά προς τις δύο αυτές συνήθεις περιπτώσεις εγκατάστασης μονάδων για θέρμανση νερού, είναι δυνατή η εγκατάσταση μονάδων ηλιακών θερμαντήρων νερού, δηλαδή μονάδων που θερμαίνουν άμεσα το νερό χωρίς τη μεσολάβηση ρευστού απολαβής θερμότητας ή εναλλάκτη. Οι ηλιακοί θερμαντήρες νερού

αποτελούν την πιο οικονομικά αποδεκτή λύση στη θέρμανση νερού οικιακής χρήσης. Το κύριο χαρακτηριστικό τους είναι ότι περιέχουν ποσότητα νερού που βρίσκεται σε θερμική επαφή με την απορροφητική επιφάνεια και η λειτουργία τους επιτρέπει τη θέρμανση του νερού με τη χρήση του κατά τη διάρκεια της ημέρας, ή λίγο μετά τη δύση του ήλιου. Η θερμική αποθηκευτική ικανότητα των ηλιακών θερμαντήρων νερού εξαρτάται από την ποσότητα του νερού που αποθηκεύεται, αλλά συνήθως είναι πολύ μικρή, εξαιτίας της ανεπαρκούς θερμικής προστασίας του δοχείου που περιέχει το θερμό νερό. Χαρακτηριστικές περιπτώσεις συσκευών αυτού του είδους είναι τα οριζόντια ή κεκλιμένα μεταλλικά δοχεία με επίπεδες επιφάνειες, οι πλαστικοί σάκοι νερού, οι ενσωματωμένοι σε ενιαία συσκευή παράλληλοι πλαστικοί σωλήνες, τα κιβώτια με άμμο εντός των οποίων υπάρχει σωλήνας κυκλοφορίας νερού, διατάξεις κυλινδρικών μεταλλικών δοχείων κ.λ.π.

Σε αντίθεση με τους απλούς θερμαντήρες νερού, το δοχείο αποθήκευσης του νερού στις συσκευές FPTU είναι πολύ καλά θερμομονωμένο, επιτρέποντας τη διατήρηση της θερμότητας για μεγάλα χρονικά διαστήματα και κυρίως στη διάρκεια της νύκτας. Το δοχείο αποθήκευσης τοποθετείται είτε οριζόντια είτε κατακόρυφα λίγο ψηλότερα από τον επίπεδο ηλιακό συλλέκτη, όπου στη διάρκεια της ημερήσιας λειτουργίας της συσκευής το νερό θερμαίνεται στο συλλέκτη και μεταφέρεται στο δοχείο με φυσική κυκλοφορία μέσω ανεξάρτητου κυκλώματος ρευστού. Η απολαβή της θερμότητας πραγματοποιείται μέσω εναλλάκτη τύπου σερπαντίνας ή μανδύα. Τα πολλά λειτουργικά στοιχεία των θερμοσιφωνικών συσκευών: ο επίπεδος συλλέκτης, το θερμομονωμένο δοχείο αποθήκευσης, οι σωλήνες κυκλοφορίας του υγρού απολαβής της θερμότητας και ο εναλλάκτης θερμότητας, συντελούν στην αύξηση του κόστους κατασκευής, ενώ και η λειτουργία τους χαρακτηρίζεται πιο σύνθετη. Εξάλλου πολλές φορές είναι αναγκαία η συχνή συντήρησή τους, εξαιτίας διαφόρων προβλημάτων, κυρίως ροής του ρευστού απολαβής της θερμότητας,

παρόλο που έχουν προταθεί εναλλακτικές λύσεις. Παρόλα αυτά, οι συσκευές FPTU παρουσιάζουν υψηλή αξιοπιστία από πλευράς λειτουργίας, απόδοσης αλλά κυρίως της διατήρησης της θερμότητας και έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως σε πολλές χώρες μεταξύ των οποίων και στην Ελλάδα.

Τα τελευταία 20 χρόνια η βελτίωση των απλών τύπων ηλιακών θερμαντήρων νερού σε συνδυασμό με την ανάπτυξη της τεχνολογίας των υλικών (απορροφητικές επιφάνειες επιλεκτικής επίστρωσης, διαφανή μονωτικά υλικά, κατοπτρικές διατάξεις υψηλής ανακλαστικότητας κ.α.), οδήγησαν στη σχεδίαση και κατασκευή νέων τύπων ηλιακών θερμαντήρων νερού, ή συσκευών ολοκληρωμένου συλλέκτη – αποθήκης θερμότητας (Integrated Collector Storage Systems ή συντομογραφικά συσκευές ICS).



Σχήμα 2.1: Θερμοσιφωνικό σύστημα επίπεδου ηλιακού συλλέκτη (FPTU) και συσκευή ολοκληρωμένου συλλέκτη - αποθήκης θερμού νερού (ICS).

Οι ηλιακές συσκευές ICS παρουσιάζουν το βασικό χαρακτηριστικό των απλών θερμαντήρων νερού, όπου το δοχείο αποθήκευσης είναι ταυτόχρονα και η απορροφητική επιφάνεια της συσκευής. Εκτός της απλής κατασκευής και

λειτουργίας τους, οι συσκευές ICS έχουν ένα επιπλέον πλεονέκτημα σε σχέση με τις συσκευές FPTU. Οι ICS διαθέτουν χαμηλό ύψος με αποτέλεσμα να μπορούν να εναρμονίζονται καλύτερα με την αρχιτεκτονική του χώρου εγκατάστασης. Το στοιχείο αυτό θεωρείται σημαντικό για την αισθητική και λειτουργική ενσωμάτωση των ηλιακών συσκευών θέρμανσης νερού στα κτίρια. Ειδικά οι ICS μπορούν να εγκατασταθούν αρμονικά σε κτίρια με παραδοσιακή αρχιτεκτονική (Κυκλάδες, κ.α.). Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζεται η εμπρός-πλάγια όψη μιας συσκευής ICS και μιας συνήθους συσκευής FPTU, όπου διαθέτουν και οι δύο κυλινδρικά δοχεία με ίσο όγκο νερού αποθήκευσης και όπου φαίνεται η διαφορά ύψους μεταξύ τους. Για λόγους απόλυτης σύγκρισης η αναλογία όγκου νερού αποθήκευσης προς επιφάνεια ανοίγματος (διαθέσιμη επιφάνεια συλλογής της ηλιακής ακτινοβολίας) είναι ίση και για τις δύο τύπους συσκευών.

2.2 Σχεδίαση και Λειτουργία Τύπων Ηλιακών Συσκευών ICS.

Το βασικό στοιχείο των ηλιακών συσκευών ICS είναι το δοχείο συλλογής και αποθήκευσης της θερμότητας. Συνήθως η συσκευή ICS τοποθετείται ακίνητη με ορισμένη κλίση και προσανατολισμό ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου εγκατάστασης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το σχήμα του δοχείου συλλογής της ηλιακής ακτινοβολίας να παίζει ουσιαστικό ρόλο στη λειτουργία της συσκευής. Όταν αυτό έχει επίπεδες επιφάνειες, χρησιμοποιείται μια από αυτές ως απορροφητής, ενώ στις υπόλοιπες τοποθετείται εξωτερική θερμομόνωση. Στη διάρκεια της ημερήσιας λειτουργίας της συσκευής, η θερμοκρασία του νερού εντός του δοχείου χαρακτηρίζεται από μια διαστρωμάτωση, η οποία συχνά αποτελεί τη βάση για τη σχεδίαση συσκευών ICS με αποδοτική θερμική συμπεριφορά. Το θερμότερο νερό περιορίζεται στα ανώτερα στρώματα του συνολικού όγκου του δοχείου αποθήκευσης και με δεδομένο ότι στις περισσότερες περιπτώσεις η

ποσότητα του νερού που χρησιμοποιείται αποτελεί μέρος μόνο της συνολικής ποσότητας που αποθηκεύεται, τελικά η θερμοκρασία χρήσης του είναι η υψηλότερη δυνατή. Το στοιχείο αυτό αποτελεί μεταξύ άλλων βασική παράμετρο κατά τη σχεδίαση των συσκευών ICS που μελετούνται στην παρούσα εργασία. Ένα επιπρόσθετο χαρακτηριστικό του δοχείου αποθήκευσης στις συσκευές ICS είναι η αντοχή του στην πίεση του δικτύου ύδρευσης. Στις περισσότερες διατάξεις χρησιμοποιούνται παχύτερα και ανθεκτικότερα τοιχώματα με ταυτόχρονη προσθήκη εσωτερικά μεταλλικών στηριγμάτων στις επίπεδες δεξαμενές θερμού νερού για την αποφυγή της διόγκωσής τους, εξαιτίας διαφοράς πίεσης μεταξύ του νερού του δοχείου και του περιβάλλοντος χώρου. Τα στοιχεία αυτά αυξάνουν το κόστος κατασκευής των συσκευών ICS και για το λόγο αυτό προτιμάται συχνά η σύνδεσή τους με συστήματα μειωμένης υδραυλικής πίεσης.

Η διπλή λειτουργία της επιφάνειας του δοχείου αποθήκευσης επηρεάζει σημαντικά τη θερμική συμπεριφορά των συσκευών ICS στη διάρκεια της νύκτας ή των χρονικών διαστημάτων της ημέρας που η ηλιακή ακτινοβολία είναι ανεπαρκής, με αποτέλεσμα τις αυξημένες θερμικές απώλειες του δοχείου και τελικά τη μη επαρκή διατήρηση της θερμότητας. Στη διάρκεια της ημέρας, η απόδοση των συσκευών ICS δεν επηρεάζεται σημαντικά από το γεγονός αυτό, επειδή οι θερμικές απώλειες περιορίζονται λόγω συλλογής της ηλιακής ακτινοβολίας και είναι ανάλογες των θερμικών απωλειών των επίπεδων συλλεκτών στις συσκευές FPTU. Ο περιορισμός των θερμικών απωλειών των ηλιακών συσκευών ICS αποτελεί ένα από τα βασικότερα ζητήματα έρευνας, καθώς η αποτελεσματική διατήρηση της θερμότητας εξασφαλίζει την πρακτική εφαρμογή τους. Από την άλλη μεριά, επειδή η επιφάνεια συλλογής της ακτινοβολίας σε σχέση με την συνολική ποσότητα του νερού που θερμαίνεται είναι μικρή, η αύξηση της θερμοκρασίας του νερού στη διάρκεια της ημέρας είναι σχεδόν ανάλογη. Η αποδοτική θερμική συμπεριφορά των ηλιακών συσκευών ICS είναι λοιπόν ένας συνδυασμός σημαντικής ανύψωσης της

θερμοκρασίας του νερού στη διάρκεια της ημέρας και ταυτόχρονα της αποτελεσματικής διατήρησης της θερμότητας τη νύκτα. Προς την κατεύθυνση αυτή έχουν προταθεί διάφοροι τρόποι βελτίωσης της θερμικής συμπεριφοράς των συσκευών ICS με πρωταρχικό στόχο τον περιορισμό των θερμικών απωλειών. Η επιλεκτική επίστρωση της απορροφητικής επιφάνειας του δοχείου, χαμηλώνει σημαντικά τον συντελεστή θερμικών απωλειών. Το μέτρο αυτό ενίοτε σε συνδυασμό με την προσθήκη διπλού ή πολλαπλού διαφανούς καλύμματος ή/και την κάλυψη της συσκευής τη νύκτα με θερμομονωτικό σκέπαστρο ή/και την προσάρτηση εσωτερικά του δοχείου θερμομονωτικού διαφράγματος εξασφαλίζεται ο αποτελεσματικός περιορισμός των θερμικών απωλειών. Η τοποθέτηση του δοχείου αποθήκευσης εντός κενού είναι μια οικονομικά ακριβή λύση και περιορίζεται μόνο σε κυλινδρικά δοχεία μικρής διαμέτρου (~0.1 m). Η αποτελεσματική ανύψωση της θερμοκρασίας του νερού στη διάρκεια της ημέρας πραγματοποιείται είτε με την προσάρτηση ακίνητων καμπύλων κατόπτρων σε συνδυασμό με τη χρήση μονού ή διπλού διαφανούς καλύμματος, εξωτερικής θερμικής μόνωσης και επιλεκτικής επίστρωσης του απορροφητή, είτε με τη χρήση δοχείων μικρότερης διαμέτρου (0.15–0.20 m), όπου η αναλογία όγκου του νερού προς συλλεκτική επιφάνεια μειώνεται, με αποτέλεσμα την γρήγορη αύξηση της θερμοκρασίας του νερού την ημέρα. Στην περίπτωση αυτή απαιτείται η ενσωμάτωση σε ενιαία συσκευή περισσότερων του ενός δοχείων αποθήκευσης συνδεδεμένων σε σειρά ή παράλληλα ώστε να επιτευχθεί συνολική ποσότητα του νερού που θερμαίνεται τουλάχιστον ίση προς 100 l ανά μέτρο (m) μήκους της συσκευής.

2.3 Ηλιακές Συσκευές ICS με τη Χρήση Κατοπτρικών Διατάξεων.

Ένα σημαντικό βήμα στην εξελικτική πορεία της έρευνας σχετικά με τις συσκευές ολοκληρωμένου συλλέκτη – αποθήκης θερμότητας ήταν η σχεδίαση κατοπτρικών διατάξεων μέσω των οποίων επιζητείται η ενίσχυση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στην απορροφητική επιφάνεια των ηλιακών συσκευών. Στην περίπτωση αυτή οι κατοπτρικές διατάξεις έχουν συγκεκριμένη γεωμετρία και προσαρμόζονται κατάλληλα γύρω από τα δοχεία αποθήκευσης. Τις περισσότερες φορές είναι ακίνητες, με συγκεκριμένο προσανατολισμό και κλίση για την αποτελεσματική λειτουργία των ηλιακών συσκευών ICS στη διάρκεια όλου του έτους.

Γενικά η προσάρτηση κατόπτρων στις ηλιακές συσκευές στοχεύει κυρίως στην συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας στην απορροφητική επιφάνεια, η οποία συχνά έχει μικρότερες διαστάσεις σε σχέση με την συνολική επιφάνεια μέσω της οποίας συλλέγεται η ηλιακή ακτινοβολία. Εξαιτίας της μικρής πυκνότητας της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης, οι συγκεντρωτικές ηλιακές διατάξεις ανάλογα με τη γεωμετρία τους, κατορθώνουν να αυξήσουν την πυκνότητά της έως και 10 φορές, στην περίπτωση που δεν απαιτούνται συνεχείς ρυθμίσεις προσανατολισμού, λόγω του σχετικά μεγάλου εύρους της γωνίας υποδοχής τους. Η παράμετρος του γεωμετρικού λόγου συγκέντρωσης (Concentration Ratio, *CR*) είναι μια χαρακτηριστική παράμετρος των συγκεντρωτικών διατάξεων και ορίζεται ως ο λόγος της επιφάνειας μέσω της οποίας διέρχεται η ηλιακή ακτινοβολία, η οποία είναι η επιφάνεια ανοίγματος της κατοπτρικής διάταξης, προς την επιφάνεια του δέκτη της ηλιακής ακτινοβολίας (απορροφητής). Πολλές φορές αντί του γεωμετρικού λόγου συγκέντρωσης χρησιμοποιείται η παράμετρος του λόγου συγκέντρωσης της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας, όπου κατ' αντιστοιχία ορίζεται ως ο λόγος της μέσης έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας που συλλέγεται από το δέκτη

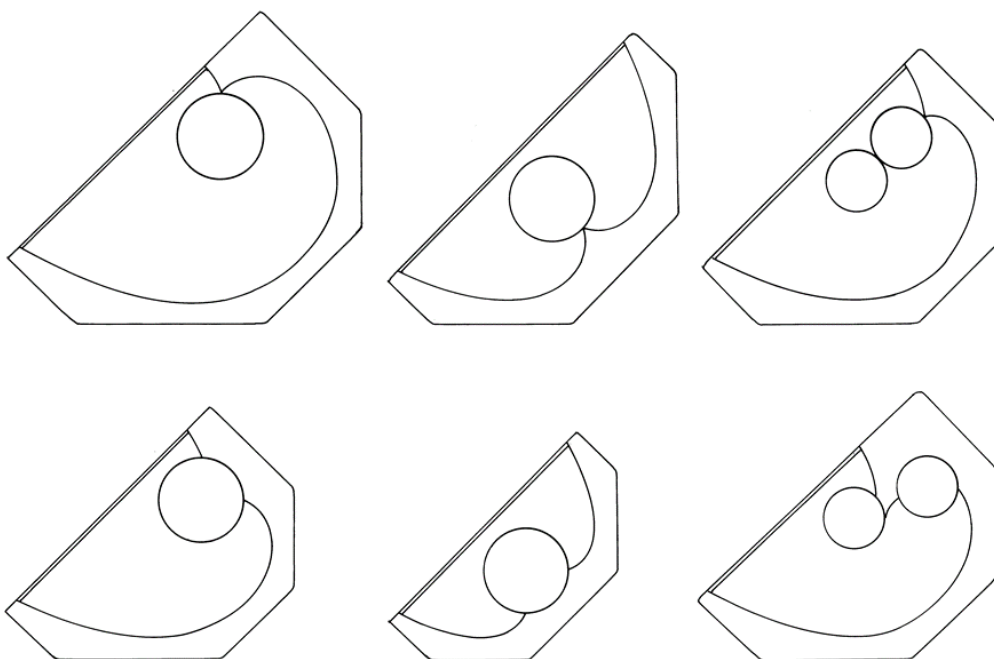
(απορροφητή), προς τη μέση ένταση της ακτινοβολίας που διέρχεται από την επιφάνεια ανοίγματος της συγκεντρωτικής συσκευής. Η γωνία υποδοχής της ηλιακής ακτινοβολίας (α ή 2θ) ισοδυναμεί με το εύρος της γωνίας μέσω της οποίας συλλέγεται η ηλιακή ακτινοβολία από τον απορροφητή άμεσα ή μέσω πολλαπλών ανακλάσεων στην επιφάνεια του κατόπτρου και η οποία δεν διέρχεται δευτερογενώς από την επιφάνεια ανοίγματος της συγκεντρωτικής συσκευής.

Οι κατοπτρικές διατάξεις που κατά κόρο χρησιμοποιούνται στις ηλιακές συσκευές ICS είναι τύπου CPC (Compound Parabolic Concentrators). Οι κατοπτρικές αυτές διατάξεις καλούνται συχνά ιδανικές (ideal concentrators), εξαιτίας του ότι έχουν τη δυνατότητα με κατάλληλη σχεδίαση να επιτύχουν τη θεωρητικά μέγιστη συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας που αντιστοιχεί στη γωνία υποδοχής τους. Η γεωμετρία CPC του συγκεντρωτικού μέσου δημιουργεί ανομοιόμορφη σύγκλιση των ηλιακών ακτίνων, δηλαδή εκτροπή ακτίνων που προέρχονται από διάφορες περιοχές του ηλιακού δίσκου, προκαλώντας μια συγκεχυμένη εικόνα στην περιοχή εστίασης. Για το λόγο αυτό τα συγκεντρωτικά αυτά μέσα χαρακτηρίζονται και ως μη ευκρινούς ειδώλου (non imaging concentrators).

2.4 Οι Προτεινόμενες Ηλιακές Συσκευές ICS.

Η έρευνα σχετικά με τις συγκεντρωτικές συσκευές μικρού λόγου συγκέντρωσης συνέβαλε ουσιαστικά στην ανάπτυξη διαφόρων τύπων ηλιακών συσκευών ICS, στοχεύοντας στην σχεδίαση συσκευών με αποδοτική ημερήσια και νυκτερινή λειτουργία [4]. Έχουν δοκιμαστεί συσκευές ICS με χρήση κυλινδρικών δοχείων μεγάλων διαμέτρων εντός συμμετρικών και ασύμμετρων κατοπτρικών διατάξεων CPC και τα αποτελέσματα των μελετών έχουν αναδείξει ιδιαίτερα θετικά

συμπεράσματα κυρίως ως προς τον περιορισμό των θερμικών απωλειών. Η έρευνα στρέφεται κυρίως στη σχεδίαση και κατασκευή συσκευών ICS χαμηλού κόστους με πρακτική εφαρμογή στη θέρμανση νερού σε θερμοκρασίες μεταξύ 40 και 70 °C με δυνατότητα ικανοποιητικής διατήρησης της θερμότητας. Η εμπειρία σχετικά με τη σχεδίαση ηλιακών συλλεκτών με ασύμμετρα κάτοπτρα CPC οδήγησε στη σχεδίαση συσκευών ICS με χρήση της ανάστροφης απορροφητικής επιφάνειας του κυλινδρικού δοχείου αποθήκευσης ώστε να περιοριστούν οι θερμικές απώλειες από μεταφορά. Η μέθοδος έχει δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα, ενώ και ως προς την ανύψωση της θερμοκρασίας του νερού έχει διαπιστωθεί μια ικανοποιητική θερμική συμπεριφορά στη διάρκεια της ημερήσιας λειτουργίας των συσκευών [15-21]. Στο σχήμα 2.2 παρουσιάζονται σε τομή συσκευές ICS που συνδυάζουν διατάξεις ασύμμετρων και συμμετρικών καμπύλων κατόπτρων εντός κυλινδρικών δοχείων αποθήκευσης.

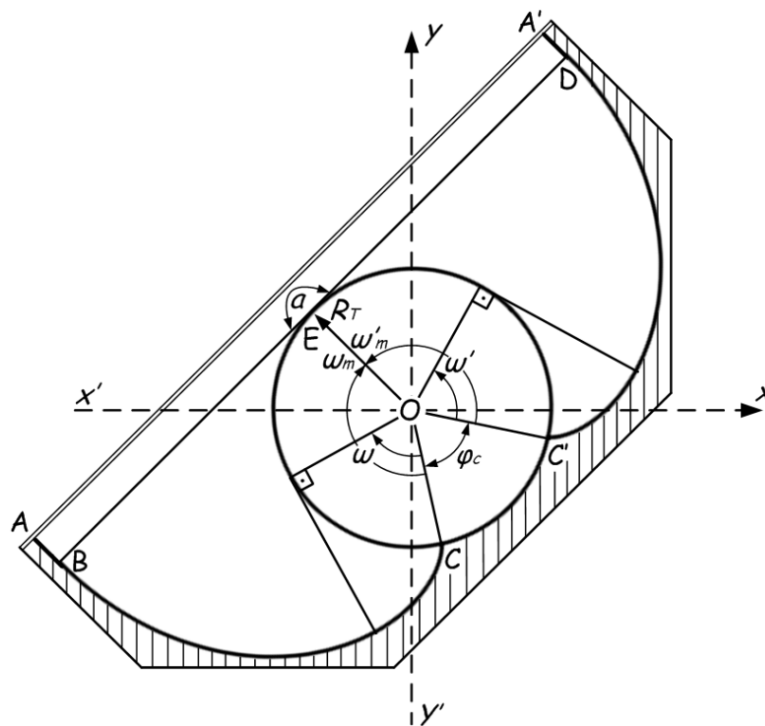


Σχήμα 2.2: Συσκευές ICS με καμπύλα κάτοπτρα και κυλινδρικά δοχεία αποθήκευσης.

Με την παρούσα πτυχιακή εργασία επιδιώκεται βασικά η σχεδίαση και κατασκευή δύο πειραματικών μοντέλων ICS, τα οποία να παρουσιάζουν βέλτιστη θερμική συμπεριφορά τόσο στη διάρκεια της ημέρας, κατά την οποία επιδιώκεται μια σημαντική ανύψωση της θερμοκρασίας του νερού, όσο και στη διάρκεια της νύκτας, με κύριο στόχο την ικανοποιητική διατήρηση της θερμότητας. Η σχεδίαση των συσκευών ICS βασίζεται στη μέθοδο αξιοποίησης της ανομοιόμορφης κατανομής της ηλιακής ακτινοβολίας που απορροφάται από τον κυλινδρικό απορροφητή. Τα καμπύλα κάτοπτρα στη διάρκεια της ετήσιας λειτουργίας τους, συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία σε περιοχές της απορροφητικής επιφάνειας οι οποίες βρίσκονται στα ανώτερα τμήματα του απορροφητή, λαμβανομένης της κλίσης των 45° των συσκευών ICS ως προς το οριζόντιο επίπεδο. Με τον τρόπο αυτό επιδιώκεται η έντονη θερμοκρασιακή διαστρωμάτωση του νερού που βρίσκεται εντός των κυλινδρικών δοχείων αποθήκευσης, ώστε κατά την απομάστευση ποσότητας νερού (κυρίως στη διάρκεια της ημέρας), η θερμοκρασία του να είναι η υψηλότερη δυνατή. Η στρωμάτωση της θερμοκρασίας του νερού εντός του δοχείου αποθήκευσης οφείλεται στη φυσική κυκλοφορία θερμότερων μαζών νερού προς τα ανώτερα στρώματα του στο κυλινδρικό δοχείο λόγω διαφοράς πυκνότητας. Η κατάλληλη προσάρτηση κατοπτρικών διατάξεων στο δοχείο αποθήκευσης μπορεί να οδηγήσει σε εντονότερη θερμοκρασιακή διαστρωμάτωση του νερού, καθώς ο φωτισμός του πάνω τμήματος της απορροφητικής επιφάνειας μπορεί να είναι μεγαλύτερος λόγω της ανομοιόμορφης κατανομής της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στην απορροφητική επιφάνεια της συσκευής. Ο συσχετισμός της θερμοκρασιακής διαστρωμάτωσης του νερού και του φωτισμού τμημάτων της απορροφητικής επιφάνειας μπορεί να αποδειχθεί ένας ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας για τη σχεδίαση συσκευών ICS με αποδοτική ημερήσια λειτουργία. Το κοινό χαρακτηριστικό των κατοπτρικών διατάξεων που χρησιμοποιούνται είναι ότι παρουσιάζουν σημαντικό ποσοστό αποκοπής (deep

truncation) σε συνδυασμό με μεγάλη γωνία υποδοχής της ηλιακής ακτινοβολίας. Αυτό οδηγεί στην σχεδίαση και κατασκευή πειραματικών συσκευών μικρών σχετικά διαστάσεων, περιορίζοντας το κόστος κατασκευής, τις θερμικές απώλειες (καθώς αυτές εξαρτώνται από τις συνολικές διαστάσεις των μοντέλων) αλλά και την συλλογή σημαντικού ποσοστού της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας. Οι βασικές αρχές σχεδίασης και οι παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη αναλύονται παρακάτω.

2.5 Σχεδίαση των Προτεινόμενων Ηλιακών Συσκευών ICS.



Σχήμα 2.3: Τομή των πειραματικών μοντέλων ICS A και ICS B.

Στο Σχήμα 2.3 παρουσιάζεται η τομή των συσκευών ICS A και ICS B. Το κυλινδρικό δοχείο αποθήκευσης είναι θερμομονωμένο στην πίσω πλευρά του κατά 18.17 % $((\varphi_c / 2\pi) \equiv ((\pi - 2) / 2\pi))$. Τα συμμετρικά κάτοπτρα συνδυάζουν δύο τμήματα γεωμετρίας involute ((BC) και (C'D)) και δύο επίπεδα κατοπτρικά τμήματα ((AB) and (DA')). Η μέγιστες γωνίες ω και ω' καθορίζονται μέσω των τμημάτων

(EC) και (EC') και ισούνται προς $\omega_m = \omega'_m = (\pi+2)/2$ (rad) $\approx 147.3^\circ$. Το άνοιγμα W_α ισούται προς $[AA'] = [BD] = (\pi+2) \cdot R_T \approx 0.72$ m και το θεωρητική τιμή του γεωμετρικού λόγου συγκέντρωσης είναι $CR=1$. Η επιφάνεια ανοίγματος A_a , η συνολική επιφάνεια συλλογής A_s (συμπεριλαμβανομένης της A_a) και οι λόγοι V_T/A_a , V_T/A_s καθορίζονται από τους κατασκευαστικούς περιορισμούς των συσκευών και οι οποίοι παρουσιάζονται παρακάτω. Η γεωμετρία των καμπύλων κατοπτρικών τμημάτων σε σχέση με το καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων O, x', y' του παραπάνω σχήματος αναλύεται με βάση τις παραμέτρους R_T , ω και ω' ως εξής:

Επίπεδο Τμήμα (AB):

$$y = -x - \sqrt{2} \cdot \left(\frac{\pi}{2} + 1\right) \cdot R_T \quad \text{με} \quad -\sqrt{2} \cdot \left(\frac{\pi}{4} + \frac{31}{28}\right) \cdot R_T \leq x \leq -\sqrt{2} \cdot \left(\frac{\pi}{4} + 1\right) \cdot R_T \quad (1)$$

Involute Τμήμα (BC):

$$\left. \begin{aligned} x &= -R_T \cdot \left[\sin\left(\omega + \frac{\pi}{4} - 1\right) - \omega \cdot \cos\left(\omega + \frac{\pi}{4} - 1\right) \right] \\ y &= -R_T \cdot \left[\cos\left(\omega + \frac{\pi}{4} - 1\right) + \omega \cdot \sin\left(\omega + \frac{\pi}{4} - 1\right) \right] \end{aligned} \right\} \quad \text{με} \quad 0 \leq \omega \leq \omega_m \equiv \frac{\pi}{2} + 1 \text{ (rad)} \quad (2)$$

Involute Τμήμα (C'D):

$$\left. \begin{aligned} x &= R_T \cdot \left[\cos\left(\omega' + \frac{\pi}{4} - 1\right) + \omega' \cdot \sin\left(\omega' + \frac{\pi}{4} - 1\right) \right] \\ y &= R_T \cdot \left[\sin\left(\omega' + \frac{\pi}{4} - 1\right) - \omega' \cdot \cos\left(\omega' + \frac{\pi}{4} - 1\right) \right] \end{aligned} \right\} \quad \text{με} \quad 0 \leq \omega' \leq \omega'_m \equiv \frac{\pi}{2} + 1 \text{ (rad)} \quad (3)$$

Επίπεδο Τμήμα (DA'):

$$y = -x + \sqrt{2} \cdot \left(\frac{\pi}{2} + 1\right) \cdot R_T \quad \text{με} \quad \sqrt{2} \cdot \left(\frac{\pi}{4} - \frac{3}{28}\right) \cdot R_T \leq x \leq \sqrt{2} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot R_T \quad (4)$$

2.6 Κατασκευή των Προτεινόμενων Ηλιακών Συσκευών ICS.

Η επίτευξη έντονης θερμοκρασιακής διαστρωμάτωσης του νερού εντός των δοχείων αποθήκευσης αλλά και ο περιορισμός των θερμικών απωλειών είναι οι δύο βασικοί παράγοντες που λήφθηκαν υπόψη κατά τον σχεδιασμό, ενώ η επιλογή των διαστάσεων κάθε συσκευής (μήκος κατοπτρικής διάταξης, μήκος και διάμετρος κυλινδρικών δοχείων, ύψος, κ.α) προέκυψαν κατόπιν μελέτης σχετικών κριτηρίων. Τα κριτήρια επιλογής για τις διαστάσεις, το μέγεθος και τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στις συσκευές σχετίζονται με την κατασκευή των πειραματικών μοντέλων και είναι τα εξής:

1. Οι ηλιακές συσκευές ICS είναι αυτόνομες μονάδες συλλογής και μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε θερμότητα και ο όγκος του αποθηκευμένου νερού χρήσης πρέπει να βρίσκεται στα όρια των 100–150 l για ένα εύλογο μήκος (1.0–2.0 m), όπως άλλωστε συμβαίνει και με τις θερμοσιφωνικές συσκευές των επίπεδων συλλεκτών, καθορίζοντας την ελάχιστη κάλυψη αναγκών μιας οικίας. Στις συσκευές ICS που μελετούνται ο όγκος του νερού αποθήκευσης είναι 101.6 l και το δοχείο αποθήκευσης έχει μήκος 1.65 m.
2. Ο περιορισμός των θερμικών απωλειών με τη μέθοδο απευθείας μόνωσης τμήματος των κυλινδρικών απορροφητικών επιφανειών υποδεικνύουν το μέγεθος των υπό μελέτη συσκευών.
3. Η συγκέντρωση της ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας από τις κατοπτρικές διατάξεις είναι βασικός παράγοντας που επιδρά στο μέγεθος των συσκευών που προτείνονται στην παρούσα εργασία. Η ανοχή στη μικρή διασπορά της

ηλιακής ακτινοβολίας και οι πιθανές ατέλειες της κατοπτρικής διάταξης οδήγησαν την κατασκευή των καμπύλων κατόπτρων, λαμβάνοντας ως διάμετρο των κυλινδρικών δοχείων μικρότερη αυτής που υποδεικνύεται από την σχεδιάσή τους. Συγκεκριμένα η διάμετρος σύμφωνα με την οποία κατασκευάστηκαν οι κατοπτρικές διατάξεις όλων των συσκευών ήταν 0.27 m, δηλαδή 1 εκατοστό του μέτρου μικρότερη της πραγματικής διαμέτρου των κυλινδρικών δοχείων.

4. Η αποδοτική θέρμανση του περιεχομένου νερού χρήσης στη διάρκεια όλου του έτους είναι βασικό κριτήριο επιλογής για τις διαστάσεις των υπό μελέτη συσκευών. Αυτό το κριτήριο αφορά κυρίως το μέγεθος των κυλινδρικών απορροφητών – δοχείων αποθήκευσης σε σχέση με την επιφάνεια ανοίγματος. Αυτό πρακτικά καθορίζεται από τον παράγοντα V_T / A_α και επιδιώκεται η τιμή του να είναι πλησίον της αντίστοιχης τιμής που παρουσιάζουν οι θερμοσιφωνικές συσκευές των επίπεδων ηλιακών συλλεκτών (55–75 lm^{-2}).
5. Η πρακτικότητα είναι ένα βασικό κριτήριο για τις διαστάσεις των συσκευών και αφορά τη μεταφορά και την εγκατάστασή τους σε κατάλληλους χώρους (οριζόντιες και επικλινείς οροφές κατοικιών, κτιρίων, ξενοδοχείων κ.α.) χωρίς να είναι απαραίτητη η χρήση ειδικών συνεργείων εγκατάστασης και ειδικών ανυψωτικών μηχανημάτων.
6. Τέλος, τα υλικά κατασκευής των προτεινόμενων συσκευών ICS θα πρέπει να είναι διαθέσιμα ευρέως στην αγορά και με χαμηλό κόστος, προκειμένου οι συσκευές ICS να θεωρηθούν οικονομικά συμφέρουσες.

Σύμφωνα με τα κριτήρια αυτά ακολούθησε η κατασκευή των προτεινόμενων συσκευών ICS κατά στάδια τα οποία σε γενικές γραμμές περιλάμβαναν την κατασκευή των κυλινδρικών δοχείων, τη σχεδίαση σε πραγματικές διαστάσεις των κατόπτρων και την κατασκευή τους, την κατασκευή του σκελετού, τη τοποθέτηση

θερμικής μόνωσης είτε στα τμήματα των κυλινδρικών δοχείων είτε στις μη φωτιζόμενες επιφάνειες των συσκευών καθώς και την κατασκευή και τοποθέτηση εξωτερικών προστατευτικών μεταλλικών επιφανειών.

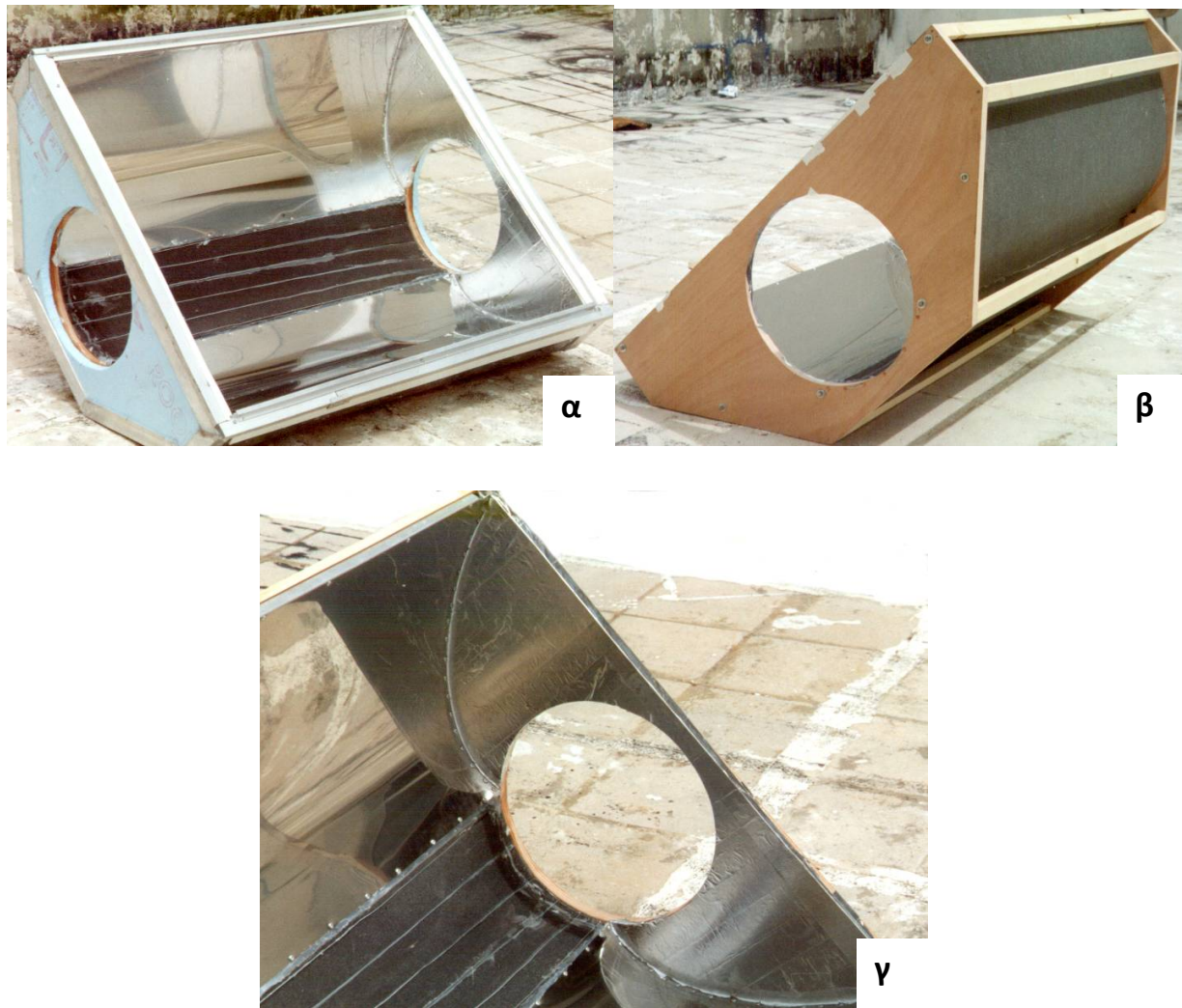
Η κατασκευή του κυλινδρικού δοχείου αποθήκευσης κάθε συσκευής πραγματοποιήθηκε εκτός του εργαστηριακού χώρου γιατί δεν υπήρχαν τα απαραίτητα μέσα για την κατασκευή του. Χρησιμοποιήθηκε γαλβανισμένη λαμαρίνα μικρού πάχους (2 mm), η οποία μπορεί εύκολα να διαμορφωθεί σε κυλινδρική επιφάνεια. Η επιλογή αυτού του τύπου και διάστασης κυλινδρικού δοχείου δεν είναι δεσμευτική αλλά εξυπηρετεί, λόγω χαμηλού κόστους, ευκολίας στην κατασκευή και ανθεκτικότητας στις συνθήκες και στη διάρκεια λειτουργίας των υπό μελέτη συσκευών. Το μήκος σε όλα τα κυλινδρικά δοχεία ήταν 1.80 m. Κατά την κατασκευή του κυλινδρικού δοχείου έγινε συγκόλληση σωλήνων μικρού μήκους και διαμέτρου 1/2'' στα δύο καπάκια, για την είσοδο και την έξοδο του νερού και τη τοποθέτηση αισθητήρων θερμοκρασίας. Κατόπιν αυτού το δοχείο καθαρίστηκε και με τη βαφή μαύρου ματ χρώματος ανθεκτικού σε υψηλές θερμοκρασίες δημιουργήθηκε η απορροφητική επιφάνεια της συσκευής όπου ο συντελεστής απορρόφησης και εκπομπής της μαύρης επιφάνειας ήταν $\alpha_r = 0.92$ και $\varepsilon_r = 0.90$ αντίστοιχα.

Γνωρίζοντας τις εξισώσεις των καμπύλων κατοπτρικών τμημάτων στις συσκευές ICS, έγινε η σχεδίαση της τομής της διάταξης κάτοπτρο – κυλινδρικό δοχείο σε πραγματικές διαστάσεις πάνω σε χαρτί. Ο υπολογισμός του μήκους των κατόπτρων έγινε όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, λαμβάνοντας υπόψη μικρότερη διάμετρο κυλινδρικών δοχείων για αποφυγή οπτικών απωλειών λόγω διασποράς του

ειδώλου και ατελειών της κατασκευής τους. Έτσι στις συσκευές λήφθηκε εσωτερική διάμετρος κυλινδρικού δοχείου 0.27 m αντί της πραγματικής 0.28 m. Επιπλέον θεωρήθηκε απαραίτητο να υπάρχει μια μικρή απόσταση του κυλινδρικού δοχείου από το κατοπτρικό τμήμα πλησίον του προκειμένου να διευκολύνεται η τοποθέτηση του κυλινδρικού δοχείου και να μην υπάρχει άμεση θερμική επαφή μεταξύ τους. Για την κατασκευή της κατοπτρικής διάταξης κάθε συσκευής χρησιμοποιήθηκε λεπτό γυαλισμένο φύλλο ανοξείδωτου χάλυβα πάχους 0.5 mm. Το υλικό αυτό είναι κατάλληλο (σκληρό και ανθεκτικό) για σταθερές κατασκευές. Επιπλέον έχει λεία επιφάνεια, η οποία επιτρέπει την απευθείας χρήση του σαν κάτοπτρο, παρουσιάζοντας συντελεστή ανακλαστικότητας της ηλιακής ακτινοβολίας $\rho_r = 0.68$, αλλά μπορεί να αποτελέσει και υπόστρωμα για επίστρωση άλλου ανακλαστικού υλικού, όπως φιλμ αλουμινίου (Aluminized foil 3M) ανακλαστικότητας $\rho_r = 0.85$. Μειονεκτήματα του ανοξείδωτου χάλυβα μπορούν να θεωρηθούν το βάρος του και το υψηλό κόστος αγοράς, αλλά εκτιμήθηκε πως η χρήση του ως δομικό και ανακλαστικό υλικό το κάνουν να υπερέχει σε σχέση με άλλα υλικά, όπως π.χ. το λεπτό φύλλο γυαλισμένου αλουμινίου. Η κατασκευή του σκελετού στήριξης του κατόπτρου βασίστηκε στη χρήση ράβδων διαμορφωμένου προφίλ αλουμινίου σε σχήμα “ Π ”, οι οποίες καμπυλώθηκαν με βάση την προηγηθείσα σχεδίαση σχηματίζοντας την καμπύλη της τομής των μοντέλων ICS. Επίσης πραγματοποιήθηκαν παρόμοιες καμπυλώσεις για τη διαμόρφωση του συνολικού σκελετού. Στη συνέχεια έγινε κατάλληλη προσάρτηση του ανοξείδωτου φύλλου ακολουθώντας παράλληλα τις δύο σχηματισθείσες καμπύλες – οδηγούς, για να διαμορφωθεί έτσι το ασύμμετρο ή συμμετρικό καμπύλο κάτοπτρο.

Με βάση τη σχεδίαση των συσκευών, έγινε κοπή δύο κομματιών ξύλου (κόντρα πλακέ θαλάσσης) πάχους 4 cm με σχήμα που είναι ίδιο με την τομή της

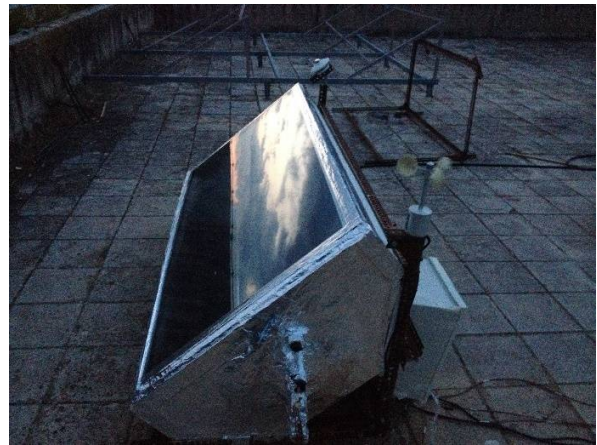
κάθε συσκευής ICS. Στα ξύλα αυτά προσαρτήθηκαν σταθερά τα καμπύλα κάτοπτρα. Έτσι ολοκληρώθηκε ο βασικός σκελετός κάθε συσκευής, η οποία ενισχύθηκε με ξύλινα τμήματα σχήματος παραλληλεπίπεδου ώστε να αποκτήσει πλήρη σταθερότητα. Μετά τη σφράγιση με κόλλα σιλικόνης των διάκενων που υπήρχαν στις επαφές προσάρτησης των κατόπτρων, τοποθετήθηκε στην εξωτερική επιφάνειά του υαλοβάμβακας για τη θερμομόνωση της συσκευής. Η στήριξη και η προστασία του υαλοβάμβακα από την επίδραση του περιβάλλοντος έγινε με χρήση εξωτερικού μεταλλικού καλύμματος γαλβανισμένης λαμαρίνας πάχους 0.5 mm. Η τοποθέτηση του δοχείου στην κατάλληλη θέση εντός της κατοπτρικής διάταξης ήταν εύκολη, καθώς υπήρχαν τα δύο κυκλικά ανοίγματα εκατέρωθεν των πλευρικών επίπεδων κατόπτρων και δύο ελαστικοί δακτύλιοι στήριξης. Μετά την είσοδο στη συσκευή, το διάκενο που υπήρχε μεταξύ του δοχείου και των δακτυλίων στήριξης συμπληρώθηκε με κόλλα σιλικόνης. Τοποθετήθηκε θερμομόνωση τύπου roof mate και πολυουρεθάνης και βάφτηκε εξωτερικά για προστασία από τις καιρικές συνθήκες. Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται τα στάδια κατασκευής των συσκευών ICS A και ICS B.



Εικόνα 2.1: *Στάδια κατασκευής πειραματικού μοντέλου: εμπρός – πλάγια όψη (α) και πίσω – πλάγια όψη (β) του σκελετού των συσκευών ICS. Τοποθέτηση μόνωσης στην πίσω πλευρά των συσκευών, τομή και κάτοπτρο CPC (γ).*



Εικόνα 2.2: *Στάδια κατασκευής και εγκατάστασης των πειραματικών μοντέλων.*

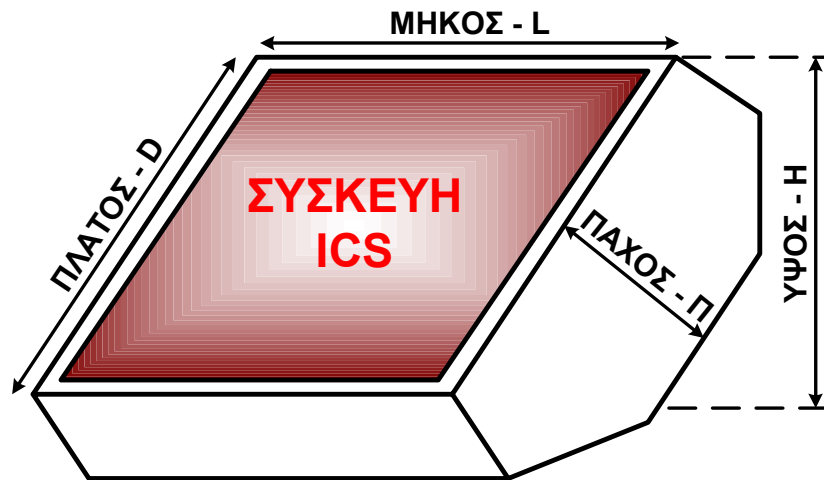


Εικόνα 2.3: *Στάδια κατασκευής και εγκατάστασης των πειραματικών μοντέλων.*

Η κατασκευή των συσκευών ICS ολοκληρώθηκε με τη τοποθέτηση γωνιών αλουμινίου εξωτερικά του εξωτερικού περιβλήματος της συσκευής και κατάλληλου σχήματος αλουμινίου ώστε να είναι εύκολη η τοποθέτηση του διαφανούς γυάλινου καλύμματος, πάχους 3 mm, το οποίο στηρίχθηκε επιπλέον στις υπόλοιπες τρεις πλευρές του ανοίγματος και σταθεροποιήθηκε και πάλι με γωνιές αλουμινίου ώστε να είναι εύκολη η αφαίρεσή του όταν κρίνεται αναγκαίο. Η τοποθέτηση των συσκευών για πειραματικές δοκιμές έγινε στην ταράτσα του κτιρίου Φυσικής. Στις

ακόλουθες εικόνες παρουσιάζονται τα τελικά στάδια κατασκευής και εγκατάστασης των συσκευών ICS.

Η κατασκευή των προτεινόμενων συσκευών ICS όπως περιεγράφηκε παραπάνω τροποποίησε τις διαστάσεις τους σε σχέση με τους αρχικούς υπολογισμούς που βασίζονταν στην γεωμετρική ανάλυση. Η τροποποίηση αυτή δεν διαφοροποιεί σημαντικά τη γεωμετρία που υιοθετείται για κάθε συσκευή και οφείλεται κυρίως στη θεώρηση της μικρότερης διαμέτρου των κυλινδρικών δοχείων για την κατασκευή των κατοπτρικών διατάξεων. Οι παράμετροι που χαρακτηρίζουν τη γεωμετρία είναι το εύρος ανοίγματος W και κατ' επέκταση η επιφάνεια ανοίγματος A_α , ο λόγος συγκέντρωσης CR και οι παράμετροι V_T / A_α , V_T / A_S . Οι τιμές των παραμέτρων αυτών αλλά και των διαστάσεων κάθε συσκευής μήκος L , πλάτος D , ύψος H και πάχος Π (Σχ. 2.5) παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1. Συμπληρωματικά των παραμέτρων αυτών στον ίδιο πίνακα καταγράφονται και οι τιμές των παραμέτρων V_T και A_r για κάθε συσκευή.



Σχήμα 2.5: Σχηματική παράσταση των προτεινόμενων συσκευών ICS. Παράμετροι κατασκευής των συσκευών: μήκος L , πλάτος D , ύψος H και πάχος Π .

ΠΙΝΑΚΑΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΩΝ ΣΥΣΚΕΥΩΝ

ΣΥΣΚΕΥΗ	V_T (l)	A_α (m ²)	A_S (m ²)	CR	V_T / A_α (lm ⁻²)	V_T / A_S (lm ⁻²)	L (m)	D (m)	Π (m)	H (m)
ICS A	101.6	1.17	4.28	1	86.84	23.74	1.72	0.82	0.38	0.71
ICS B	101.6	1.17	4.28	1	86.84	23.74	1.72	0.82	0.38	0.71

Πίνακας 2.1: Κατασκευαστικοί παράμετροι των πειραματικών μοντέλων ICS

3.1 Μέθοδοι Πειραματικής Μελέτης των Συσκευών ICS.

Η πειραματική μελέτη των συσκευών ICS αποσκοπεί στην αξιολόγηση της λειτουργίας τους και τον καθορισμό της αποδοτικότητάς τους στις ηλιακές εγκαταστάσεις θέρμανσης νερού. Η αποδοτικότητα των ηλιακών συσκευών ICS σχετίζεται με τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά και τις κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν κάθε εποχή του έτους, καθορίζοντας το θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας τους.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι μέθοδοι πειραματικής μελέτης των προτεινόμενων ηλιακών συσκευών ICS με στόχο τον προσδιορισμό της απόδοσης ημερήσιας λειτουργίας και τον υπολογισμό των ημερήσιων και νυκτερινών θερμικών απωλειών. Επιπλέον εξετάζονται διαγράμματα μεταβολής της θερμοκρασίας του νερού εντός του δοχείου αποθήκευσης για 24ωρη και τετραήμερη λειτουργία των συσκευών ICS χωρίς απομάστευση του νερού, με σκοπό τον καθορισμό της μέγιστης μέσης θερμοκρασίας του νερού, τον προσδιορισμό της θερμοκρασιακής διαστρωμάτωσής του αλλά και εκτίμηση της διατήρησης της θερμότητας στη διάρκεια της νύκτας [3]. Τέλος, γίνεται περιγραφή της πειραματικής διάταξης των συσκευών ICS που εγκαταστάθηκε στο χώρο δοκιμών.

3.1.1 Πειραματικός Προσδιορισμός της Ημερήσιας Απόδοσης των ICS.

Ο πιο συνηθισμένος τρόπος σύγκρισης διαφόρων τύπων ηλιακών συλλεκτών είναι ο προσδιορισμός της απόδοσης ημερήσιας λειτουργίας τους. Με το τρόπο αυτό γίνεται εξακρίβωση της λειτουργίας των συσκευών σε εξωτερικές συνθήκες και εκτιμάται η επιτυχία της σχεδίασής τους. Στην περίπτωση των ηλιακών συσκευών που λειτουργούν μόνο σαν συλλέκτες, εφαρμόζεται με διάφορες παραλλαγές η μέθοδος του προσδιορισμού της στιγμιαίας απόδοσης. Στην περίπτωση των ολοκληρωμένων συσκευών ICS, όπου συλλέκτης και αποθήκη θερμού νερού αποτελούν ενιαία συσκευή, η μέθοδος αυτή δεν μπορεί να εφαρμοστεί εύκολα λόγω της μεγάλης μάζας του περιεχομένου νερού σε σχέση με τη συλλεγόμενη ηλιακή ακτινοβολία, με αποτέλεσμα να απαιτείται αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα προκειμένου οι συσκευές να φτάσουν σε κατάσταση θερμικής ισορροπίας [5-14].

Εφαρμόζεται μια πειραματική μέθοδος κατά την οποία η ημερήσια απόδοση προσεγγίζεται ικανοποιητικά, υπολογίζοντας τη θερμότητα που προσέλαβε το νερό από τις τιμές της μέσης αρχικής και μέσης τελικής θερμοκρασίας του κατά τη διάρκεια της 12ωρης πειραματικής λειτουργίας της συσκευής. Στην πειραματική αυτή μέθοδο προσδιορίζεται η μέση ημερήσια απόδοση της συσκευής που συντομογραφικά θα αναφέρεται και ως MDE (Mean Daily Efficiency). Το χρονικό διάστημα των 12 ωρών καθορίζεται από τις 6:30 έως και τις 18:30 ηλιακή ώρα, δηλαδή 6 ώρες πριν το μεσημέρι και 6 ώρες μετά το μεσημέρι του τόπου που πραγματοποιείται η πειραματική διαδικασία (για την Πάτρα το ηλιακό μεσημέρι καθορίζεται περίπου στις 12:30). Συγκεκριμένα, το πρωί της ημέρας ενός πειράματος, η συσκευή περιέχει νερό με τοπική μέση αρχική θερμοκρασία $T_{i,m}$ και ξεκινά η καταγραφή των μετρήσεων της θερμοκρασίας του νερού T_w εντός του δοχείου, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος T_a καθώς και της ηλιακής ακτινοβολίας

G που προσπίπτει στην επιφάνεια ανοίγματος της συσκευής. Κατά τη διάρκεια του πειράματος η συσκευή λειτουργεί χωρίς απομάστευση του νερού ή άλλη παρέμβαση και η καταγραφή των τιμών των μεγεθών διαρκεί μέχρι την ολοκλήρωσή του. Η πειραματική αυτή λειτουργία επαναλαμβάνεται πολλές ημέρες και κάθε φορά η θερμοκρασία εκκίνησης είναι διαφορετική ώστε να περιλαμβάνεται ένα όσο το δυνατό μεγάλο εύρος θερμοκρασιών. Η πειραματική διαδικασία πραγματοποιείται με λειτουργία της συσκευής ICS για τέσσερις συνεχόμενες μέρες χωρίς απομάστευση του νερού αποθήκευσης ώστε η θερμοκρασία εκκίνησης για κάθε ημερήσια λειτουργία να είναι διαφορετική και αυξανόμενη μέχρι την τέταρτη μέρα λειτουργίας όπου πλέον η συσκευή φτάνει σε θερμοκρασιακό κόρο, 2 ώρες περίπου μετά το ηλιακό μεσημέρι και ανάλογα με τη θερμική αδράνειά της. Η πειραματική διαδικασία συνεχίζεται με σκοπό τη συλλογή αρκετών πειραματικών στοιχείων για τον προσδιορισμό της μέσης ημερήσιας απόδοσης και τη γραφική απεικόνισή της συναρτήσει της ποσότητας $\Delta T_m / G_m$.

Τα μετρούμενα μεγέθη που απαιτούνται για τον υπολογισμό της μέσης ημερήσιας απόδοσης η_d είναι η τοπική μέση θερμοκρασία του νερού $T_{i,m}$ τη χρονική στιγμή της έναρξης του πειράματος t_i (6:30), η τοπική μέση θερμοκρασία του νερού $T_{f,m}$ τη χρονική στιγμή τέλους της ημερήσιας λειτουργίας της συσκευής t_f (18:30), καθώς και η θερμοκρασία περιβάλλοντος T_α και η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας G που προσπίπτει στο άνοιγμα της συσκευής καθ' όλη τη διάρκεια του 12ωρου πειράματος, προκειμένου να υπολογιστούν οι αντίστοιχες χρονικές μέσες τιμές $T_{\alpha,m}$ και G_m . Η συνεχής καταγραφή της θερμοκρασίας του νερού T_w , της θερμοκρασίας περιβάλλοντος T_α και της ηλιακής ακτινοβολίας G κατά τη διάρκεια όλου του πειράματος, μας δίνει τη δυνατότητα να παρακολουθούμε την

απόκριση της συσκευής στις μεταβολές των εξωτερικών συνθηκών και την εξαγωγή συμπερασμάτων για τη λειτουργία της. Επίδραση στη διακύμανση των πειραματικών μετρήσεων των συστημάτων ICS, έχει ο πνέων άνεμος καθώς και το ποσοστό νέφωσης. Για μεγάλες τιμές της ταχύτητας του πνέοντος ανέμου ($v_w > 5 \text{ ms}^{-1}$), οι θερμικές απώλειες αυξάνουν, ενώ το υψηλό ποσοστό νέφωσης μειώνει την οπτική απόδοση των συσκευών ICS λόγω αδυναμίας συγκέντρωσης όλης της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας από τις κατοπτρικές διατάξεις των συσκευών ICS. Για τον υπολογισμό της μέσης ημερήσιας απόδοσης η_d στη διάρκεια της 12ωρης ημερήσιας λειτουργίας, λαμβάνονται οι τιμές της αρχικής ($T_{i,m}$) και τελικής ($T_{f,m}$) τοπικής μέσης θερμοκρασίας του νερού και υπολογίζεται η θερμότητα Q_w (J) του νερού μάζας M_w (kg) και ειδικής θερμότητας $C_{p,w}$ ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$) στο χρονικό διάστημα $\Delta t = t_f - t_i = 12 \text{ h} = 43200 \text{ s}$:

$$Q_w = M_w C_{p,w} (T_{f,m} - T_{i,m}) \quad (3.1)$$

όπου $C_{p,w} = 41860 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ και $V_T = 101.6 \text{ l}$.

Η μέση ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας G_m , στο ίδιο χρονικό διάστημα Δt υπολογίζεται από την ολοκλήρωσή της στο χρονικό διάστημα Δt και διαιρώντας προς αυτό:

$$G_m = \frac{\int_{t_i}^{t_f} [G(t) dt]}{t_f - t_i} \quad (3.2)$$

Η συνολική προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια Q_R στην επιφάνεια ανοίγματος της συσκευής, στο ίδιο χρονικό διάστημα Δt , προσδιορίζεται από την ολοκλήρωση της μετρούμενης έντασης $G(t)$:

$$Q_R = A_\alpha \int_{t_i}^{t_f} G(t) dt = A_\alpha G_m \Delta t \quad (3.3)$$

Η μέση ημερήσια απόδοση η_d της συσκευής για τη θέρμανση του νερού που περιέχεται στο δοχείο της σύμφωνα με τον ορισμό, υπολογίζεται από την σχέση:

$$\eta_d = \frac{Q_w}{Q_R} = \frac{M_w \cdot C_{p,w} \cdot (T_{f,m} - T_{i,m})}{G_m A_a \Delta t} \quad (3.4)$$

Κάθε πειραματική τιμή της μέσης ημερησίας απόδοσης η_d της συσκευής καθορίζεται από τις μέσες τιμές της θερμοκρασίας του νερού τις χρονικές στιγμές t_i και t_f και τη μέση τιμή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας G_m κατά τη διάρκεια της 12ωρης ημερήσιας λειτουργίας της συσκευής. Ορίζεται έτσι ένα πειραματικό ζεύγος τιμών η_d και $\Delta T_{m,D} / G_m$ όπου το η_d καθορίζεται από την σχέση (3.5) ενώ η παράμετρος $\Delta T_{m,D} / G_m$ ($W^{-1}m^2K$) από τη σχέση:

$$\Delta T_{m,D} / G_m = [(T_{i,m} + T_{f,m}) / 2 - T_{a,m}] / G_m \quad (3.5)$$

Από τα πειραματικά ζεύγη τιμών η_d και $\Delta T_{m,D} / G_m$, η μέση ημερήσια απόδοση η_d μπορεί να ληφθεί σε συνάρτηση του $\Delta T_{m,D} / G_m$ με γραμμική προσέγγιση από τη σχέση:

$$\eta_d = A + B \cdot (\Delta T_{m,D} / G_m) \quad (3.6)$$

Ο συντελεστής A εκφράζει τη μέγιστη μέση ημερήσια απόδοση της συσκευής όταν η μέση θερμοκρασία του νερού στο 12ωρο, $T_{w,m}$, είναι ίση προς τη μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος για το ίδιο χρονικό διάστημα. Στην περίπτωση αυτή ισχύει:

$$T_{w,m} = T_{\alpha,m} = (T_{i,m} + T_{f,m}) / 2 \Rightarrow \Delta T_{m,D} / G_m = 0 \text{ W}^{-1}\text{m}^2\text{K} \quad (3.7)$$

Η μέγιστη μέση ημερήσια απόδοση στην περίπτωση αυτή εκφράζεται μέσω του συντελεστή A , και διαιρεμένη με την μέση τιμή μιας παραμέτρου $\bar{K}(\theta)$, όπου $K(\theta) = \cos\theta \cdot (1 + \sin^3\theta)$, εξαρτώμενης της γωνίας πρόσπτωσης στη διάρκεια της 12ωρης ημερήσιας λειτουργίας, αντιστοιχεί στην οπτική απόδοση n_o της συσκευής. Ο συντελεστής B (WK^{-1}m^2) εκφράζει τις θερμικές απώλειες της συσκευής ανά επιφάνεια ανοίγματος (A_a) κατά τη διάρκεια της ημερήσιας λειτουργίας της και αντιστοιχεί σε μια κατά προσέγγιση τιμή τους στο θερμοκρασιακό εύρος των δοκιμών.

Μια πιο ακριβής προσέγγιση της μέσης ημερήσιας απόδοσης η_d σε συνάρτηση με την ποσότητα $\Delta T_{m,D} / G_m$, μπορεί να επιτευχθεί με πολυώνυμο δευτέρου βαθμού:

$$\eta_d = A + B \cdot (\Delta T_{m,D} / G_m) + C \cdot (\Delta T_{m,D} / G_m)^2 \quad (3.8)$$

Ο συντελεστής A εκφράζει και πάλι τη μέγιστη απόδοση της συσκευής, ο συντελεστής B δίνει μια προσεγγιστική τιμή για το μέσο συντελεστή θερμικών απωλειών ανά επιφάνεια ανοίγματος της συσκευής (A_a) ενώ ο συντελεστής C εκφράζει τη μεταβολή του συντελεστή αυτού. Χαρακτηριστικά, σε υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας της συσκευής η κλίση της καμπύλης μέσης ημερήσιας απόδοσης αυξάνει. Η διαφοροποίηση αυτή οφείλεται στο ότι ο παράγοντας της θερμικής ακτινοβολίας είναι ανάλογος της 4ης δύναμης της μέσης θερμοκρασίας του νερού–δοχείου της συσκευής με αποτέλεσμα να παρατηρείται εντονότερη εξάρτηση των θερμικών απωλειών μέσω του συγκεκριμένου τρόπου μετάδοσης της θερμότητας όταν η απορροφητική επιφάνεια βρίσκεται σε υψηλότερη θερμοκρασία. Με τη χρήση είτε της γραμμικής προσέγγισης (3.7) είτε της δευτεροβάθμιας προσέγγισης (3.9), η καμπύλη που προκύπτει είναι μια καμπύλη χαρακτηριστική για

κάθε συσκευή ICS. Τα δύο ακραία σημεία, $\Delta T_{m,D} / G_m = 0 \text{ W}^{-1}\text{m}^2\text{K}$ και $\eta_d = 0$, χαρακτηρίζουν την σχεδίαση της συσκευής (αντιστοιχία με την οπτική απόδοση, n_o και τη μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας της συσκευής) ενώ η κλίση της καμπύλης (συντελεστές B και C) καθορίζουν την κατασκευή της (είδος και πάχος θερμικής μόνωσης, υλικό κατοπτρικής διάταξης, διαφανές κάλυμμα κ.α).

3.1.2 Πειραματικός Προσδιορισμός των Θερμικών Απωλειών των ICS.

Στις ολοκληρωμένες συσκευές συλλέκτη – αποθήκης θερμού νερού, έχει ιδιαίτερη σημασία η διατήρηση της θερμοκρασίας του νερού τόσο κατά τη διάρκεια της ημερήσιας λειτουργίας τους, όσο και κατά τη διάρκεια της νύκτας. Αυτό εξάλλου είναι ένας βασικός παράγοντας που λαμβάνεται υπόψη κατά τη σχεδίαση και κατασκευή των ολοκληρωμένων συσκευών ICS (αρχές σχεδίασης, χρήση κατάλληλων υλικών κατασκευής, κ.α.). Οι θερμικές απώλειες των συσκευών ICS εξαρτώνται από τη χρονική διάρκεια λειτουργίας τους και δεν είναι ίδιες όταν πρόκειται για ημερήσια ή νυκτερινή λειτουργία. Στις δύο αυτές χρονικές περιόδους οι συσκευές είναι εκτεθειμένες σε διαφορετικό περιβάλλον με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν διαφορετική θερμική συμπεριφορά. Στην προηγούμενη παράγραφο παρουσιάστηκε ο πειραματικός προσδιορισμός των ημερήσιων θερμικών απωλειών των συσκευών ICS μέσω των συντελεστών B και C των σχέσεων γραμμικής ή πολυωνυμικής προσέγγισης της μέσης ημερήσιας απόδοσης η_d (Εξ. 3.7 και 3.9). Μια αντίστοιχη πειραματική μέθοδος προτείνεται μέσω της γραμμικής προσέγγισης της μέγιστης ημερήσιας απόδοσης σε σχέση με την ποσότητα $\Delta T_m = T_{max,w} - T_{a,m}$ ($T_{max,w}$ είναι η μέση μέγιστη θερμοκρασία του νερού και $T_{a,m}$ η μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος).

Κατά τη διάρκεια της νύκτας, λόγω απουσίας ηλιακής ακτινοβολίας η συσκευή είναι εκτεθειμένη άμεσα σε ένα περιβάλλον με χαμηλότερη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι θερμικές απώλειες να είναι υψηλότερες και να διαφοροποιείται η θερμική συμπεριφορά της συσκευής.

Το νερό της συσκευής θερμαίνεται σε θερμοκρασία η οποία κυμαίνεται μεταξύ 40 °C και 90 °C και εν συνεχεία η συσκευή αφήνεται να λειτουργήσει από το απόγευμα (18:30) μέχρι το πρωί (6:30) της επόμενης ημέρας χωρίς απομάστευση του νερού, ανταλλάσσοντας ενέργεια με το περιβάλλον. Οι δύο αυτές χρονικές στιγμές t_i και t_f αντίστοιχα βρίσκονται σε συμφωνία με τις χρονικές στιγμές που λαμβάνονται υπόψη κατά τον υπολογισμό της μέσης ημερήσιας απόδοσης των συσκευών και συγκεκριμένα η χρονική στιγμή t_i αντιστοιχεί με τη χρονική στιγμή τέλους της ημερήσιας λειτουργίας και η χρονική στιγμή t_f με την αρχή της επόμενης ημερήσιας λειτουργίας. Η πειραματική διαδικασία επαναλαμβάνεται πολλές μέρες και κάθε φορά με διαφορετική μέση θερμοκρασία εκκίνησης ($T_{i,m}$) του περιεχομένου νερού του δοχείου της συσκευής. Η πειραματική διαδικασία προσδιορισμού των νυκτερινών θερμικών απωλειών συνδέεται άμεσα με αυτή που παρουσιάστηκε κατά τον υπολογισμό της μέσης ημερήσιας απόδοσης. Κατά τη διάρκεια του τετραημέρου για τον υπολογισμό της μέσης ημερήσιας απόδοσης της συσκευής, υπολογίζεται και ο μέσος συντελεστής θερμικών απωλειών τη νύκτα για το ίδιο χρονικό διάστημα. Η θερμοκρασία εκκίνησης ($T_{i,m}$) το απόγευμα κάθε μέρας συμπίπτει με τη τελική θερμοκρασία ($T_{f,m}$).

Αν θεωρήσουμε $T_{i,m}$ τη τοπική μέση αρχική θερμοκρασία του νερού την χρονική στιγμή t_i (απόγευμα 18:30), $T_{f,m}$ τη τοπική μέση τελική θερμοκρασία του

νερού την χρονική στιγμή t_f (6:30 πρωινή της επόμενης ημέρας) και $T_{\alpha,m}$ τη μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια του 12ωρου πειράματος, τότε ο συντελεστής νυκτερινών θερμικών απωλειών U_s (WK^{-1}) προσδιορίζεται με βάση την ακόλουθη σχέση:

$$U_s = \frac{M_w C_{p,w}}{\Delta t} \cdot \ln \left[\frac{T_{i,m} - T_{\alpha,m}}{T_{f,m} - T_{\alpha,m}} \right] \quad (3.9)$$

όπου M_w είναι η μάζα του περιεχόμενου νερού στο δοχείο, Δt το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί κατά τη διάρκεια του πειράματος ($\Delta t = t_f - t_i = 43.200 \text{ sec}$) και $C_{p,w}$ η ειδική θερμότητα του νερού. Από τη σχέση (3.9) προκύπτει ότι η τιμή του συντελεστή των θερμικών απωλειών U_s δεν είναι σταθερή, αλλά αυξάνει λογαριθμικά με το λόγο της διαφοράς της τοπικής μέσης θερμοκρασίας $T_{i,m}$ εκκίνησης του νερού τη χρονική στιγμή t_i (18:30) μείον τη μέση τιμή της θερμοκρασίας περιβάλλοντος $T_{\alpha,m}$ κατά τη διάρκεια του 12ωρου πειράματος προς τη διαφορά της τοπικής μέσης τελικής θερμοκρασίας $T_{f,m}$ του νερού τη χρονική στιγμή t_f (6:30) μείον τη μέση τιμή της θερμοκρασίας περιβάλλοντος $T_{\alpha,m}$ κατά τη διάρκεια του ίδιου χρονικού διαστήματος. Κατά τον υπολογισμό του συντελεστή των νυκτερινών θερμικών απωλειών των συσκευών θεωρείται ότι η μέση θερμοκρασία του δοχείου αποθήκευσης ταυτίζεται με τη θερμοκρασία του νερού στο μέσον του δοχείου, όπως θεωρήθηκε και στην περίπτωση του πειραματικού προσδιορισμού της μέσης ημερήσιας απόδοσης και των ημερήσιων θερμικών απωλειών.

Τα ζεύγη τιμών $(U_s, T_{i,m} - T_{a,m})$ κατά τη διάρκεια της πολυήμερης πειραματικής διαδικασίας αποτελούν τα πειραματικά δεδομένα υπολογισμού των νυκτερινών θερμικών απωλειών κάθε συσκευής. Στην πράξη, το U_s μεταβάλλεται βραδύτατα συναρτήσει του $T_{i,m} - T_{a,m}$ και συνηθίζεται να προσεγγίζουμε τη μεταβολή αυτή με μια εμπειρική γραμμική σχέση:

$$U_s = A + B \cdot (T_{i,m} - T_{a,m}) \quad (3.10)$$

Στη σχέση αυτή ο συντελεστής A εκφράζει τις θερμικές απώλειες της συσκευής όταν η θερμοκρασία του νερού ισούται με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και ο συντελεστής B εκφράζει το ρυθμό μεταβολής των νυκτερινών θερμικών απωλειών συναρτήσει της διαφοράς $\Delta T_{m,N} = T_{i,m} - T_{a,m}$. Η γραφική παράσταση της μεταβολής του U_s συναρτήσει της διαφοράς θερμοκρασίας $\Delta T_{m,N}$ μας δίνει τη δυνατότητα σύγκρισης διαφόρων συσκευών ICS όσο αναφορά τις νυκτερινές θερμικές τους απώλειες.

Ακριβέστερη σύγκριση διαφόρων τύπων και γεωμετρίας συσκευών ICS, μπορεί να γίνει με την αναγωγή των τιμών U_s και των γραμμικών εξισώσεων που τις εκφράζουν ως προς την απορροφητική επιφάνεια και την επιφάνεια ανοίγματος. Λαμβάνονται οι λόγοι $U_{s,r} = U_s / A_r$ και $U_{s,\alpha} = U_s / A_\alpha$ ως συντελεστές θερμικών απωλειών ανά μονάδα επιφάνειας απορρόφησης και ανά μονάδα επιφάνειας ανοίγματος των συσκευών αντίστοιχα. Με το συντελεστή $U_{s,r}$ εκτιμάται καλύτερα η θερμική συμπεριφορά των δοχείων κατά τη διάρκεια της νύχτας, η οποία εξαρτάται άμεσα από το ποσοστό θερμικής μόνωσης που χρησιμοποιείται. Με το συντελεστή $U_{s,\alpha}$ προσδιορίζονται οι θερμικές απώλειες και η εξάρτηση αυτών από τη γεωμετρία της συσκευής.

3.1.3 Διαγράμματα Μεταβολής της Θερμοκρασίας του Νερού στη Διάρκεια 24ωρης και Τριήμερης ή Τετραήμερης Λειτουργίας των Συσκευών ICS.

Ο πειραματικός προσδιορισμός της μέσης ημερήσιας απόδοσης και των συντελεστών ημερήσιων και νυκτερινών θερμικών απωλειών αποσκοπεί στην αξιολόγηση της λειτουργίας των συσκευών ICS στα αντίστοιχα χρονικά διαστήματα. Οι τιμές των μεγεθών λαμβάνονται συναρτήσει της παραμέτρου $\Delta T_m / G_m$ όταν πρόκειται για τη μέση ημερήσια απόδοση και το συντελεστή ημερήσιων θερμικών απωλειών, και της παραμέτρου $\Delta T_{m,N}$ όταν πρόκειται για το συντελεστή νυκτερινών θερμικών απωλειών. Οι τιμές των μεγεθών η_d (Εξ. 3.4), B , C (Εξ. 3.8) και U_s (Εξ. 3.9) εξαρτώνται από τις τιμές της μέσης αρχικής και τελικής θερμοκρασίας του νερού, τη μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος και της μέσης έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας. Τα αποτελέσματα αυτά είναι αξιοποιήσιμα στην περίπτωση όπου επιχειρείται σύγκριση συσκευών ICS αφού οι καμπύλες που προκύπτουν είναι χαρακτηριστικές για κάθε συσκευή.

Όμως η σύγκριση συσκευών ICS με τη βοήθεια αυτών των μεγεθών δε μας δίνει πληροφορίες σχετικά με τη μέγιστη θερμοκρασία του νερού εντός των δοχείων και τη θερμοκρασιακή διαστρωμάτωσή του κατά την ημερήσια λειτουργία τους. Επιπλέον, η σύγκριση συσκευών ICS που διαθέτουν διαφορετικό όγκο νερού δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο με τη βοήθεια των μεγεθών η_d , B , C και U_s . Η αδυναμία σύγκρισης μέσω αυτών των μεγεθών οφείλεται περισσότερο στις νυκτερινές θερμικές απώλειες, καθώς για μεγαλύτερο μήκος και διάμετρο κυλινδρικών δοχείων μας δίνει ευνοϊκότερα αποτελέσματα, γιατί η αναλογία όγκου νερού προς την συνολική εξωτερική επιφάνειά τους (V_T / A_S) είναι μεγαλύτερη.

Εξαίρεση αποτελεί η μέση ημερήσια απόδοση, η τιμή της οποίας είναι σχεδόν ανεξάρτητη των διαστάσεων του κυλινδρικού δοχείου (κυρίως της διαμέτρου) όταν όμως διατηρείται η αναλογία μήκους κατόπτρου προς επιφάνεια ανοίγματος.

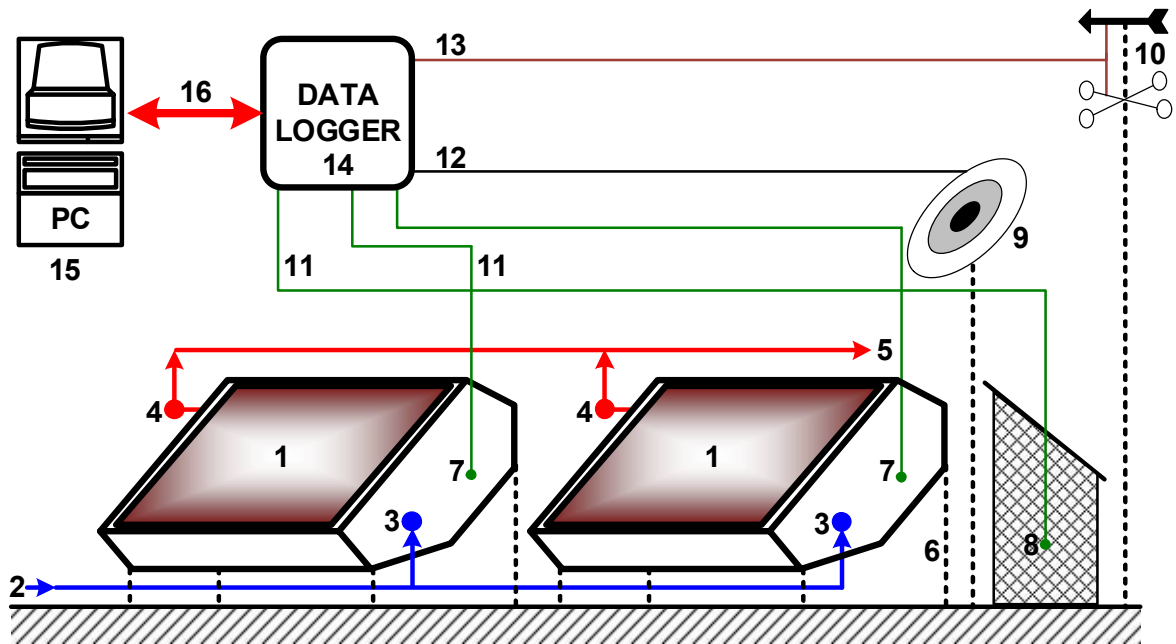
Η πειραματική μελέτη των συσκευών ICS ολοκληρώνεται με την παρουσίαση διαγραμμάτων μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας του νερού εντός των δοχείων καθώς και τη μεταβολή της θερμοκρασίας του νερού καθ' ύψος του κυλινδρικού δοχείου αποθήκευσης και αφορούν την 24ωρη και τη τετραήμερη λειτουργία τους χωρίς απομάστευση του νερού. Με το τρόπο αυτό πραγματοποιείται μελέτη ως προς τη θερμοκρασιακή αύξηση του νερού κατά την ημερήσια λειτουργία των συσκευών αλλά και τη διατήρηση της θερμότητας κατά τα χρονικά διαστήματα απουσίας της ηλιακής ακτινοβολίας.

Ένα κριτήριο που χαρακτηρίζει τις ηλιακές συσκευές αξιοποιήσιμες είναι η καθ' ύψος θερμοκρασιακή διαστρωμάτωση του νερού εντός των δοχείων αποθήκευσης, η οποία επιτυγχάνεται κατά τη διάρκεια της ημερήσιας λειτουργίας και ομαλοποιείται στη διάρκεια της νύχτας [15-18]. Αυτό οφείλεται κυρίως στους μηχανισμούς μετάδοσης της θερμότητας του νερού εντός των δοχείων αποθήκευσης με μεταφορά και αγωγή και ενισχύεται με την ανομοιόμορφη κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας επί της κυλινδρικής απορροφητικής επιφάνειας της συσκευής. Η ανομοιομορφία της απορροφούμενης ηλιακής ακτινοβολίας γίνεται εντονότερη με την προσάρτηση των καμπύλων κατοπτρικών διατάξεων και διαμορφώνεται ανάλογα με την εποχή του έτους αλλά και της έντασης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Με την παρουσίαση διαγραμμάτων μεταβολής της θερμοκρασίας του νερού κατά τη διάρκεια τριήμερης ή τετραήμερης πειραματικής λειτουργίας τους,

διαπιστώνεται κατά πόσο οι προτεινόμενες συσκευές ικανοποιούν την απαίτηση για να επιτευχθεί και να διατηρηθεί η θερμοκρασία του νερού. Η επιλογή των τριών ή τεσσάρων ημερών έγινε αφού πρώτα εκτιμήθηκε ότι δεν παρουσιάζεται περαιτέρω αύξηση της τοπικής μέσης θερμοκρασίας του νερού εντός των δοχείων πέραν του τριημέρου ή τετραημέρου αντίστοιχα κατά μέσο όρο σε όλες τις συσκευές που μελετήθηκαν. Στις συσκευές ICS της πρώτης κατηγορίας εκτιμήθηκε ότι διαγράμματα τεσσάρων ημερών αποκρίνονται ικανοποιητικά στη μέγιστη αύξηση της τοπικής μέσης θερμοκρασίας του νερού, ενώ στις συμμετρικές συσκευές της δεύτερης κατηγορίας παρουσιάζονται διαγράμματα τριών ημερών, καθώς ο συνολικός όγκος του νερού είναι μικρότερος. Τα αποτελέσματα εξετάζονται συγκριτικά για δεδομένες ημέρες λειτουργίας με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων.

3.2 Πειραματική Διάταξη Δοκιμών των Συσκευών ICS.

Η πειραματική μελέτη των συσκευών ICS πραγματοποιήθηκε στην οροφή του κτιρίου του Φυσικής, όπου τοποθετήθηκαν σε σταθερές βάσεις στραμμένες προς το νότο και σε κλίση 45° προς το οριζόντιο επίπεδο. Στη Φωτ. 3.2.1 φαίνονται μερικές από τις συσκευές ICS, εγκατεστημένες στον πειραματικό χώρο δοκιμών. Στο Σχ. 3.1 παρουσιάζεται σχηματικά η συνολική πειραματική διάταξη του χώρου δοκιμών. Περιλαμβάνει τις συσκευές ICS, τη τροφοδοσία τους με νερό από το δίκτυο ύδρευσης, τα όργανα μέτρησης της ακτινοβολίας (πυρανόμετρο) και ταχύτητας πνέοντος ανέμου (ανεμόμετρο), τους αισθητήρες θερμοκρασίας TC's (Cu-CuNi) καθώς και τα καλώδια σύνδεσης με τη μονάδα συλλογής και καταχώρησης δεδομένων (Data Logger). Τα επιμέρους στοιχεία της πειραματικής διάταξης δοκιμών των συσκευών ICS είναι τα εξής:

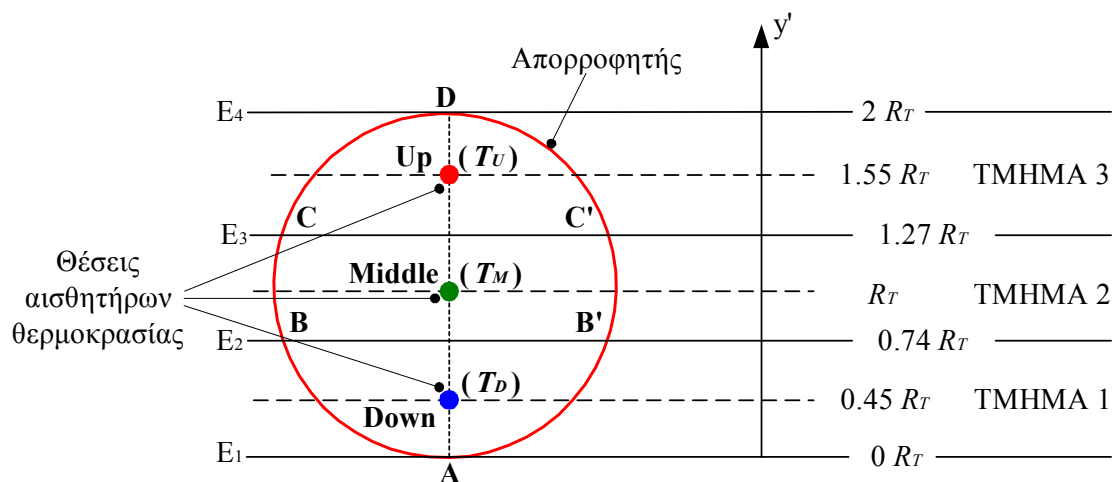


Σχήμα 3.1: Σχηματικό διάγραμμα εγκατάστασης συσκευών στον πειραματικό χώρο δοκιμών. Όργανα μέτρησης, συλλογής και καταγραφής, συνδεσμολογία:
1: Συσκευές ICS, **2:** Είσοδος νερού δικτύου ύδρευσης, **3:** Είσοδος και διακόπτης εισόδου νερού δικτύου ύδρευσης στις συσκευές, **4:** Έξοδος θερμού νερού χρήσης από τις συσκευές, **5:** Τελική έξοδος θερμού νερού χρήσης από όλες τις συσκευές, **6:** Βάσεις στήριξης συσκευών ICS και οργάνων μέτρησης (πυρανόμετρο, ανεμόμετρο), **7:** Αισθητήρες μέτρησης θερμοκρασίας αποθηκευμένου νερού T_w εντός των δοχείων των συσκευών ICS, **8:** Αισθητήρας μέτρησης θερμοκρασίας περιβάλλοντος T_a , **9:** Πυρανόμετρο, **10:** Ανεμόμετρο, **11:** Καλώδια θερμοζευγών (Cu-CuNi), **12:** Καλώδιο μεταφοράς δεδομένων από το πυρανόμετρο στη συσκευή συλλογής και καταχώρησης δεδομένων μέτρησης της έντασης ηλιακής ακτινοβολίας, **13:** Καλώδιο μεταφοράς δεδομένων από το ανεμόμετρο στη συσκευή συλλογής και καταχώρησης δεδομένων μέτρησης της ταχύτητας του πνέοντος ανέμου, **14:** Συσκευή συλλογής και καταχώρησης δεδομένων - Data Logger, **15:** Φορητή υπολογιστική μονάδα (PC) για έλεγχο, και συλλογή δεδομένων από το Data Logger, **16:** Καλώδιο σειριακής επικοινωνίας PC – Data Logger.

1. Τροφοδοσία των συσκευών ICS με νερό – Ρύθμιση θερμοκρασίας:

Για την παροχή του νερού στις συσκευές ICS, έγινε σύνδεσή τους με το δίκτυο ύδρευσης του εργαστηριακού χώρου και χρησιμοποιήθηκαν γαλβανισμένοι σιδηροσωλήνες και πλαστικοί σωλήνες, όπου με απαραίτητες διακλαδώσεις και εύκαμπτους σωλήνες έφταναν στην είσοδο των δοχείων των συσκευών. Η παροχή των συσκευών ρυθμίζονταν με στρόφιγγες στις εισόδους των δοχείων των συσκευών ή/και ενδιάμεσα στις απαραίτητες διακλαδώσεις. Ο έλεγχος της θερμοκρασίας εκκίνησης της ημερήσιας και νυκτερινής λειτουργίας των συσκευών πραγματοποιήθηκε με χρήση φορητού Η/Υ και κατάλληλου λογισμικού προγράμματος μέσω της μονάδας συλλογής και καταχώρησης δεδομένων.

2. Μέτρηση της θερμοκρασίας:



Σχήμα 3.2: Σχηματικό διάγραμμα των συντεταγμένων θέσεων των αισθητήρων μέτρησης της θερμοκρασίας του νερού εντός του κυλινδρικού δοχείου αποθήκευσης των συσκευών.



Σχήμα 3.3: Σχηματικό διάγραμμα των θέσεων των αισθητήρων μέτρησης της θερμοκρασίας του νερού εντός του κυλινδρικού δοχείου αποθήκευσης των συσκευών.

Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του νερού εντός των δοχείων και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος χρησιμοποιήθηκαν θερμοζεύγη χαλκού – κωνσταντάνης (Cu–CuNi), τα οποία προσαρτήθηκαν κατάλληλα εντός των δοχείων και σε κατάλληλες θέσεις γύρω από την πειραματική διάταξη, αντίστοιχα. Για την καταγραφή της θερμοκρασίας του νερού εντός των κυλινδρικών δοχείων χρησιμοποιήθηκαν για τις συσκευές τρία θερμοζεύγη (Cu–CuNi) κατά μήκος της κατακόρυφης διαμέτρου των κυλινδρικών δοχείων αποθήκευσης. Οι θέσεις των θερμοζευγών εντός των δοχείων αποθήκευσης καθορίστηκαν από την απαίτηση καθένα από αυτά να καταγράφει τη θερμοκρασία του 1/3 του όγκου του νερού που βρίσκεται εντός κάθε δοχείου [19-21]. Κατά μήκος της διαμέτρου του δοχείου οι συντεταγμένες των θέσεων των θερμοζευγών παρουσιάζονται στα Σχ. 3.2 και Σχ. 3.3, ενώ το πλευρικό βάθος στο οποίο τοποθετήθηκαν τα θερμοζεύγη εντός των δοχείων επιλέχθηκε να είναι περίπου 30 cm. Κατά τη μέτρηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, τα τρία θερμοζεύγη τύπου T (Cu–CuNi) που χρησιμοποιήθηκαν, τοποθετήθηκαν στο πίσω μέρος των πειραματικών διατάξεων και σε σημεία όπου δεν προσέπιπτε η ηλιακή ακτινοβολία. Με τη σύνδεσή τους σε μονάδα συλλογής και καταχώρησης δεδομένων (Data Logger) γινόταν καταγραφή των θερμοκρασιών

σε 24ωρη βάση κάθε ένα λεπτό ενώ κάθε 30 λεπτά της ώρας υπολογιζόταν η μέση τιμή τους οι οποίες αποθηκευόταν στην ίδια μονάδα.

3. Μέτρηση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας και της ταχύτητας του πνέοντος ανέμου:

Στην ίδια μονάδα Data Logger γινόταν και η καταγραφή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας μέσω πυρανομέτρου αλλά και της ταχύτητας του πνέοντος ανέμου με ανεμόμετρο για την ίδια συχνότητα και για τον ίδιο χρόνο. Το πυρανόμετρο που χρησιμοποιήθηκε ήταν τύπου Kipp & Zonnen το οποίο ήταν βαθμονομημένο και η καταγραφή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας γινόταν με απευθείας μετατροπή της τιμής τάσης (V) σε μονάδες έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας (Wm^{-2}) μέσω κατάλληλου συντελεστή. Το ανεμόμετρο που χρησιμοποιήθηκε ήταν τύπου A100R, το οποίο συνδέθηκε με την ίδια μονάδα καταγραφής και συλλογής πειραματικών δεδομένων σε κατάλληλη θέση αφού αρχικά βαθμονομήθηκε ανάλογα. Η απευθείας μετατροπής της συχνότητας ηλεκτρικών παλμών σε ταχύτητα πνέοντος ανέμου έγινε μέσω κατάλληλου συντελεστή μετατροπής.

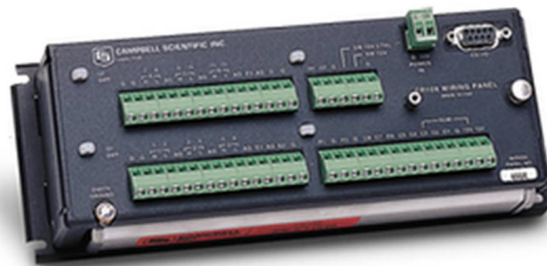
4. Μονάδα συλλογής και καταχώρησης δεδομένων (Data Logger) – Επεξεργασία δεδομένων:

Για την καταγραφή και αποθήκευση των μετρήσεων των διαφόρων παραμέτρων χρησιμοποιήθηκε ένα αυτόματο καταγραφικό (data logger) της

εταιρίας Campbell Scientific Instrument με την εμπορική ονομασία CR 10X (εικόνα 3.1). Το μοντέλο αυτό διαθέτει 12 αναλογικές εισόδους (ή 6 διαφορικές) με resolution 16 bit, δύο παλμικές εισόδους, τρεις εξόδους διέγερσης αισθητήρων (για αισθητήρες που απαιτούν κάποια τάση για να παράγουν σήμα) και οκτώ ψηφιακές θύρες I/O.

Ο CR 10X μπορεί να προγραμματιστεί ώστε να μετρά τόσο μετεωρολογικές παραμέτρους όσο ηλεκτρονικές παραμέτρους με περίοδο από δέκατα του δευτερολέπτου έως μέχρι πολλές ώρες. Παράλληλα ο καταγραφέας δεδομένων έχει την δυνατότητα να πραγματοποιεί μέσω ενσωματωμένων συναρτήσεων στατιστική ανάλυση από τα μετρούμενα μεγέθη όπως μέσες τιμές κάποιας χρονικής περιόδου, μέσες ωριαίες τιμές, τυπικές αποκλίσεις κ.α. Εκτός από τις μετρήσεις των αισθητήρων το καταγραφικό αποθηκεύει τις τιμές πέντε ακόμα παραμέτρων. Αυτές είναι ο κώδικας διαχωρισμού των τιμών, η κωδική ονομασία του συστήματος, το έτος, την Ιουλιανή ημερομηνία και την ώρα.

Η μνήμη του CR 10X είναι τύπου EEPROM για το λειτουργικό σύστημα και SRAM για την αποθήκευση των δεδομένων. Το αυτόματο καταγραφικό διαθέτει εσωτερική μνήμη 128 KB SRAM και 128 KB FLASH CR 10X (EEPROM) με δυνατότητα επέκτασης της μνήμης από μονάδες FLASH με χωρητικότητες 2 MB 4 MB 16 MB. Σε περίπτωση διακοπής της τροφοδοσίας οι μνήμες EEPROM και SRAM δεν χάνουν τις αποθηκευμένες τιμές καθώς αντλούν την απαιτούμενη ενέργεια από ανεξάρτητη μπαταρία λιθίου, η οποία έχει διάρκεια ζωής τεσσάρων ετών. Ο CR 10X υποστηρίζει κάθε είδους επικοινωνία συμπεριλαμβανόμενης της δορυφορικής ζεύξης και της ζεύξης μέσω ραδιοδικτύου. Ο πιο κοινός τρόπος επικοινωνίας είναι η σύνδεση του με έναν υπολογιστή μέσω της θύρας RS 232 και του interface SC929 της Campbell Scientific.



Εικόνα 3.1: Καταγραφέας δεδομένων CR10X.

5. Θερμοζεύγη

Για την εκτίμηση της θερμικής συμπεριφοράς του φωτοβολταϊκού σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας τοποθετήθηκαν συνολικά τέσσερα θερμοζεύγη, δύο στην μπροστινή επιφάνεια και δύο στην πίσω επιφάνεια. Ακόμα χρησιμοποιήθηκαν θερμοζεύγη για την μέτρηση θερμοκρασίας της εισόδου, εξόδου του νερού, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος καθώς και της θερμοκρασίας της επιφάνειας του γυαλιού.

Τα θερμοζεύγη που χρησιμοποιήθηκαν είναι θερμοζεύγη τύπου T, το είδος τους είναι χαλκός/κωνσταντάνη (99,9% Cu / 55% Cu + 45% Ni), το θερμοκρασιακό εύρος στο οποίο λειτουργούν σωστά είναι από -250 °C έως 400 °C με ακρίβεια ± 2 °C και η μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία είναι αυτή των 500 °C. Τα θερμοζεύγη αυτά παράγουν στα άκρα τους τάση της κλίμακας 42 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$.

6. Πυρανόμετρο

Το πυρανόμετρο που χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση της ολικής ακτινοβολίας είναι της εταιρίας Kipp & Zonen με την κωδική ονομασία CMP 3 (εικόνα 3.2). Ο αισθητήρας του πυρανομέτρου είναι μια θερμοστήλη καλυμμένη με

μαύρη επίστρωση. Η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στον αισθητήρα απορροφάται από τη μαύρη επίστρωση και μετατρέπεται σε θερμότητα, η οποία μεταφέρεται στη θερμοστήλη και τη διεγείρει, με αποτέλεσμα να παράγεται μια διαφορά δυναμικού ανάλογη με την προσπίπτουσα ακτινοβολία. Η παραγόμενη διαφορά δυναμικού περνάει ως είσοδος στο καταγραφικό, όπου μεταφράζεται σε τιμές ακτινοβολίας.

Το αισθητήριο σύστημα του πυρανομέτρου περιβάλλεται από ένα γυάλινο θόλο πάχους 4 mm, ο οποίος το προστατεύει από τις επιδράσεις του περιβάλλοντος, ενώ ταυτόχρονα αποκόπτει και την ηλιακή ακτινοβολία με μήκος κύματος μεγαλύτερο από 2800 nm. Στο κάτω μέρος της βάσης του πυρανομέτρου υπάρχει ενσωματωμένο ένα απλό σύστημα ρύθμισης της κλίσης του. Επίσης, μαζί με το πυρανόμετρο περιλαμβάνεται θωρακισμένο καλώδιο μήκους 10 μέτρων, ώστε να εξασφαλίζεται η μικρότερη δυνατή παρουσία θορύβου κατά τη μέτρηση. Παρακάτω φαίνονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά του.



Εικόνα 3.2: Πυρανόμετρο CMP 3 της εταιρίας Kipp & Zonen.

Φασματική περιοχή	300 έως 2800 nm
Ευαισθησία	5 έως 20 Mv /W/m ²
Χρόνος απόκρισης	18 sec
Κατευθυντήριο σφάλμα (στις 80° με ακτίνα 1000 W/m ²)	< 20%
Εξάρτηση από την θερμοκρασία (-10°C έως +40°C)	< 5%
Εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας	-40°C έως +80°C
Μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία	2000 W/m ²
Οπτικό πεδίο	180°

Πίνακας 3.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά πυρανομέτρου CMP 3.

7. Ανεμόμετρο

Για την μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου χρησιμοποιήθηκε ένα ανεμόμετρο τύπου κυπέλλου της εταιρίας VECTOR με την κωδική ονομασία A100LK (εικόνα 3.3). Το ανεμόμετρο ήταν βαθμολογημένο και η καταγραφή της ταχύτητας του

ανέμου γινόταν με απευθείας μετατροπή της συχνότητας ηλεκτρικών παλμών σε ταχύτητα ανέμου μέσω κατάλληλου συντελεστή μετατροπής. Το συγκεκριμένο μοντέλο είναι καταλληλότερο για εφαρμογές χαμηλής ισχύος στις οποίες απαιτείται ανεμόμετρο που παρέχει ένα παλμό/ συχνότητα εξόδου, ενώ παράλληλα καταναλώνει λίγο ρεύμα και λειτουργεί με χαμηλή παροχή των 5V. Τα χαρακτηριστικά του φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (πίνακας 3.2).



Εικόνα 3.3: Ανεμόμετρο A100LK της εταιρίας Vector.

Ταχύτητες λειτουργίας	0.2m/s έως 75+ m/s (146Kts)
Θερμοκρασία λειτουργίας	-30° έως 70°C
Τάση λειτουργίας	4.75V έως 28V DC
Κατανάλωση λειτουργίας	max 1.3mA
Σήμα εξόδου	παλμικό (0V/4V)
A100LK	10Hz ανά Knot

Πίνακας 3.2: Λειτουργικά χαρακτηριστικά ανεμομέτρου A100LK της Vector.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΤΩΝ ΣΥΣΚΕΥΩΝ ICS

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

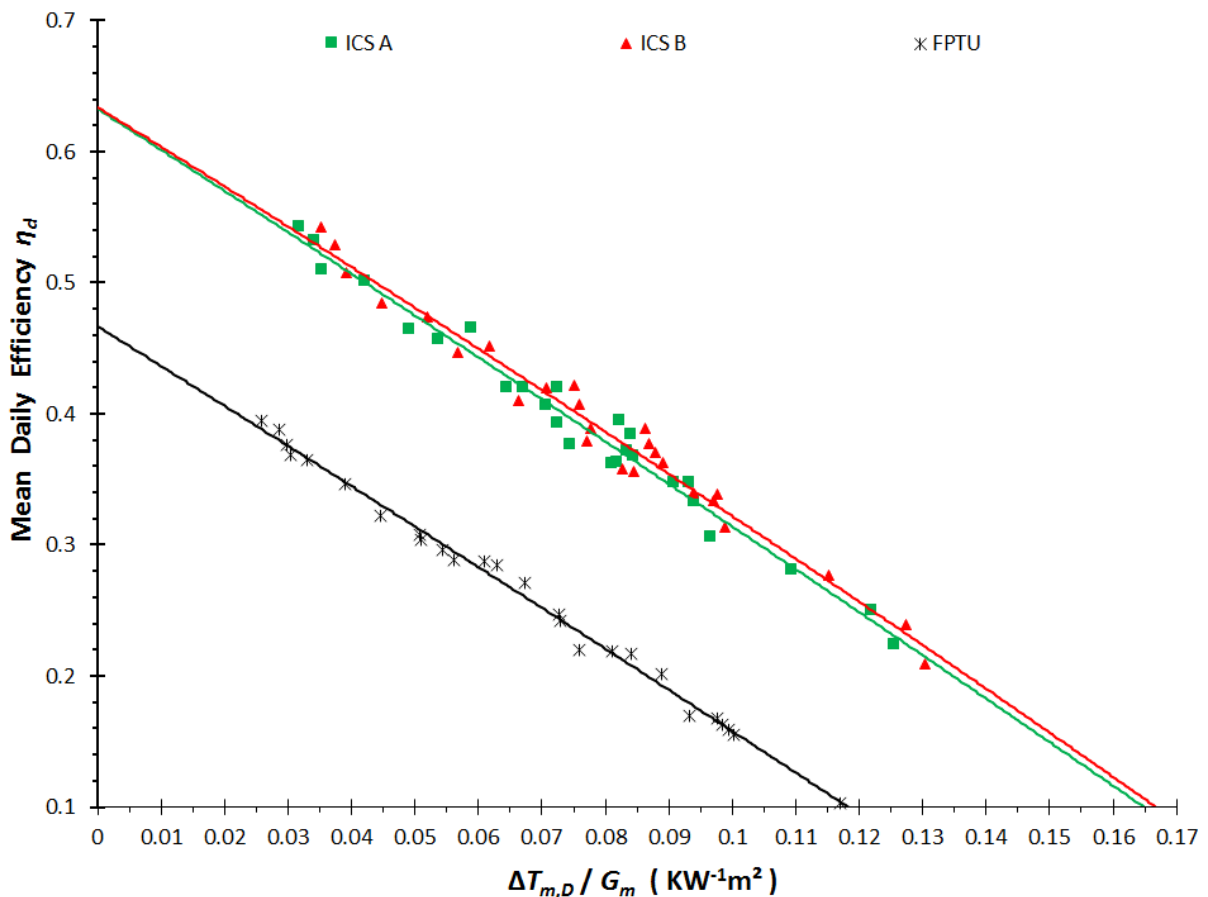
4.1 Εισαγωγή.

Οι πειραματικές δοκιμές των συσκευών ICS πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με την πειραματική διαδικασία όπως αναπτύχθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στο παρόν κεφάλαιο της εργασίας παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών των πειραματικών μοντέλων ICS, για τον προσδιορισμό της μέσης ημερήσιας απόδοσης και του συντελεστή ημερήσιων και νυκτερινών θερμικών απωλειών. Επιπλέον, εκτιμάται η θερμοκρασιακή διαστρωμάτωση και παρουσιάζονται ημερήσια και τριήμερα διαγράμματα μεταβολής της θερμοκρασίας του νερού του δοχείου κάθε συσκευής. Παρουσιάζονται επιπλέον τα αποτελέσματα από την πειραματική λειτουργία μιας θερμοσιφωνικής συσκευής επίπεδου ηλιακού συλλέκτη (FPTU) με σκοπό να εκτιμηθεί το θερμοκρασιακό εύρος της αποδοτικής λειτουργίας των υπό μελέτη ηλιακών συσκευών συγκριτικά με μια ευρέως διαδεδομένη ηλιακή συσκευή θέρμανσης νερού. Η συσκευή FPTU είναι μια χαρακτηριστική θερμοσιφωνική συσκευή επίπεδου ηλιακού συλλέκτη, όπου ο εναλλάκτης θερμότητας είναι τύπου μανδύα και η απορροφητική επιφάνεια είναι μαύρης ματ βαφής με $A_{\alpha} = 1.77 \text{ m}^2$, ενώ ο συνολικός όγκος του αποθηκευμένου νερού είναι $V_T = 96 \text{ l}$.

Τα πειραματικά μοντέλα ICS δοκιμάστηκαν με χρήση κατόπτρων τύπου Aluminized Mylar με σκοπό τον καθορισμό της θερμικής συμπεριφοράς τους σε συνάρτηση με την ανακλαστικότητα της κατοπτρικής επιφάνειας. Τα διαφανή

καλύμματα που χρησιμοποιήθηκαν σε όλες τις συσκευές ICS ήταν γυάλινα φύλλα πάχους 4 mm υψηλής διαπερατότητας, $\tau=0.90$ (σε κάθετη πρόσπτωση). Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα από τον πειραματικό προσδιορισμό της μέσης ημερήσιας απόδοσης η_d των πειραματικών μοντέλων ICS και αποδίδονται τόσο γραφικά όσο και με τη βοήθεια προσεγγιστικών εξισώσεων 2ας τάξεως συναρτήσει της παραμέτρου $\Delta T_{m,D}/G_m$. Ακολούθως, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τον πειραματικό προσδιορισμό των συντελεστών νυκτερινών θερμικών απωλειών U_s και αποδίδονται γραφικά μέσω προσεγγιστικών γραμμικών εξισώσεων συναρτήσει του $\Delta T_{m,N}$. Τέλος, παρουσιάζονται ημερήσια και τετραήμερα διαγράμματα μεταβολής της θερμοκρασίας του νερού εντός των δοχείων αποθήκευσης για τον προσδιορισμό της θερμοκρασιακής διαστρωμάτωσής του και την εκτίμηση της μέγιστης θερμοκρασίας του, αντίστοιχα.

4.1.1 Μέση Ημερήσια Απόδοση.



Διάγραμμα 4.1: Διαγράμματα μεταβολής της μέσης ημερήσιας απόδοσης η_d των συσκευών ICS και της συσκευής FPTU συναρτήσει της παραμέτρου $\Delta T_{m,D} / G_m$.

Η μέση ημερήσια απόδοση των ηλιακών συσκευών ICS εξαρτάται από τη μέση θερμοκρασία λειτουργίας τους κατά τη διάρκεια της ημέρας, από τη σχεδίαση των προσαρτωμένων καμπύλων κατοπτρικών διατάξεων και από τα χρησιμοποιούμενα υλικά κατασκευής. Βασική παράμετρος θεωρείται η επιφάνεια ανοίγματος κάθε συσκευής ICS, που καθορίζει σε σημαντικό βαθμό τη τιμή της μέσης ημερήσιας απόδοσης και σχετίζεται άμεσα με τη γεωμετρία που υιοθετείται κατά το σχεδιασμό

και την κατασκευή της. Στο Σχ. 4.1 παρουσιάζονται τα διαγράμματα μεταβολής της μέσης ημερήσιας απόδοσης η_d των συσκευών ICS συναρτήσει της παραμέτρου $\Delta T_{m,D} / G_m$. Μαζί με τα διαγράμματα μεταβολής της μέσης ημερήσιας απόδοσης των συσκευών ICS, στα ίδια σχήματα παρουσιάζεται και το διάγραμμα μεταβολής της μέσης ημερήσιας απόδοσης της συσκευής FPTU με σκοπό να συγκριθούν οι αντίστοιχες τιμές της όπως προκύπτουν από την παράλληλη λειτουργία της με τις προτεινόμενες συσκευές ICS.

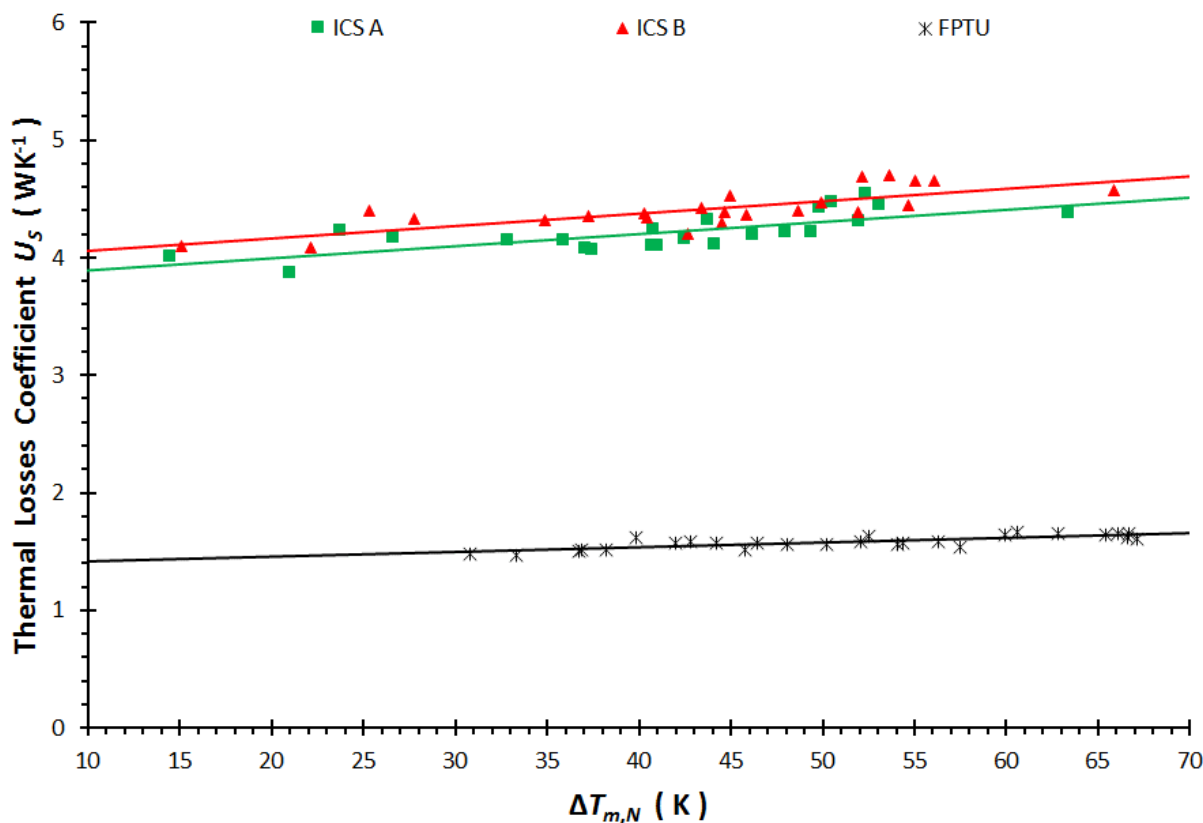
Από τα αποτελέσματα γίνεται αντιληπτό ότι οι συσκευές ICS παρουσιάζουν την αναμενόμενη συμπεριφορά, ως αποτελέσματα της παρόμοιας γεωμετρίας. Οι μέση ημερήσια απόδοση της συσκευής FPTU κυμαίνεται σε χαμηλές τιμές, συγκριτικά με τις αντίστοιχες τιμές των μέσων ημερήσιων αποδόσεων των συσκευών ICS.

4.1.2 Συντελεστής Νυκτερινών Θερμικών Απωλειών.

Οι νυκτερινές θερμικές απώλειες των συσκευών ICS εξαρτώνται κυρίως από τη θερμοκρασία λειτουργίας τους, την σχεδίαση των προσαρτημένων κατοπτρικών διατάξεων και τη συνολική εξωτερική επιφάνεια ανταλλαγής θερμότητας με το περιβάλλον. Επιπλέον παράγοντες θεωρούνται το είδος της απορροφητικής επιφάνειας, ο τύπος της κατοπτρικής επιφάνειας, και το είδος αλλά και ο αριθμός των διαφανών καλυμμάτων. Στο Σχ. 4.2 παρουσιάζουμε τα διαγράμματα μεταβολής των συντελεστών των νυκτερινών θερμικών απωλειών U_s των συσκευών ICS και της FPTU συναρτήσει της παραμέτρου $\Delta T_{m,N}$ για κάτοπτρα μέτριας και υψηλής ανακλαστικότητας (τύπος Α και Β, αντίστοιχα). Από τα διαγράμματα αυτά

προκύπτουν συμπεράσματα σχετικά με τη θερμική συμπεριφορά των συσκευών ICS, που συνδέονται άμεσα με τις βασικές αρχές σχεδίασης.

Η συσκευή FPTU, όπως είναι αναμενόμενο, παρουσιάζει τις λιγότερες θερμικές απώλειες λόγω της πολύ καλής θερμικής προστασίας του κυλινδρικού δοχείου αποθήκευσης. Σημειώνεται ότι τα πειραματικά σημεία της πειραματικής δοκιμής αυτής της συσκευής εντοπίζονται σε περιοχές με υψηλή τιμή της παραμέτρου $\Delta T_{m,N}$. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά τη διάρκεια της ημερήσιας λειτουργίας της συσκευής, η τελική μέση τιμή της θερμοκρασίας του νερού έχει υψηλή τιμή, λόγω της μικρής τιμής της παραμέτρου V_T / A_α .



Διάγραμμα 4.2: Διαγράμματα μεταβολής των συντελεστών νυκτερινών απωλειών U_s των συσκευών ICS και της συσκευής FPTU συναρτήσει της παραμέτρου $\Delta T_{m,N}$.

Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται συνολικά οι εξισώσεις των μεταβολών τόσο των μέσων ημερήσιων αποδόσεων όσο και των συντελεστών νυκτερινών θερμικών απωλειών για τις συσκευές ICS και FPTU.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΜΕΣΩΝ ΗΜΕΡΗΣΙΩΝ ΑΠΟΔΟΣΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΝΥΚΤΕΡΙΝΩΝ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ

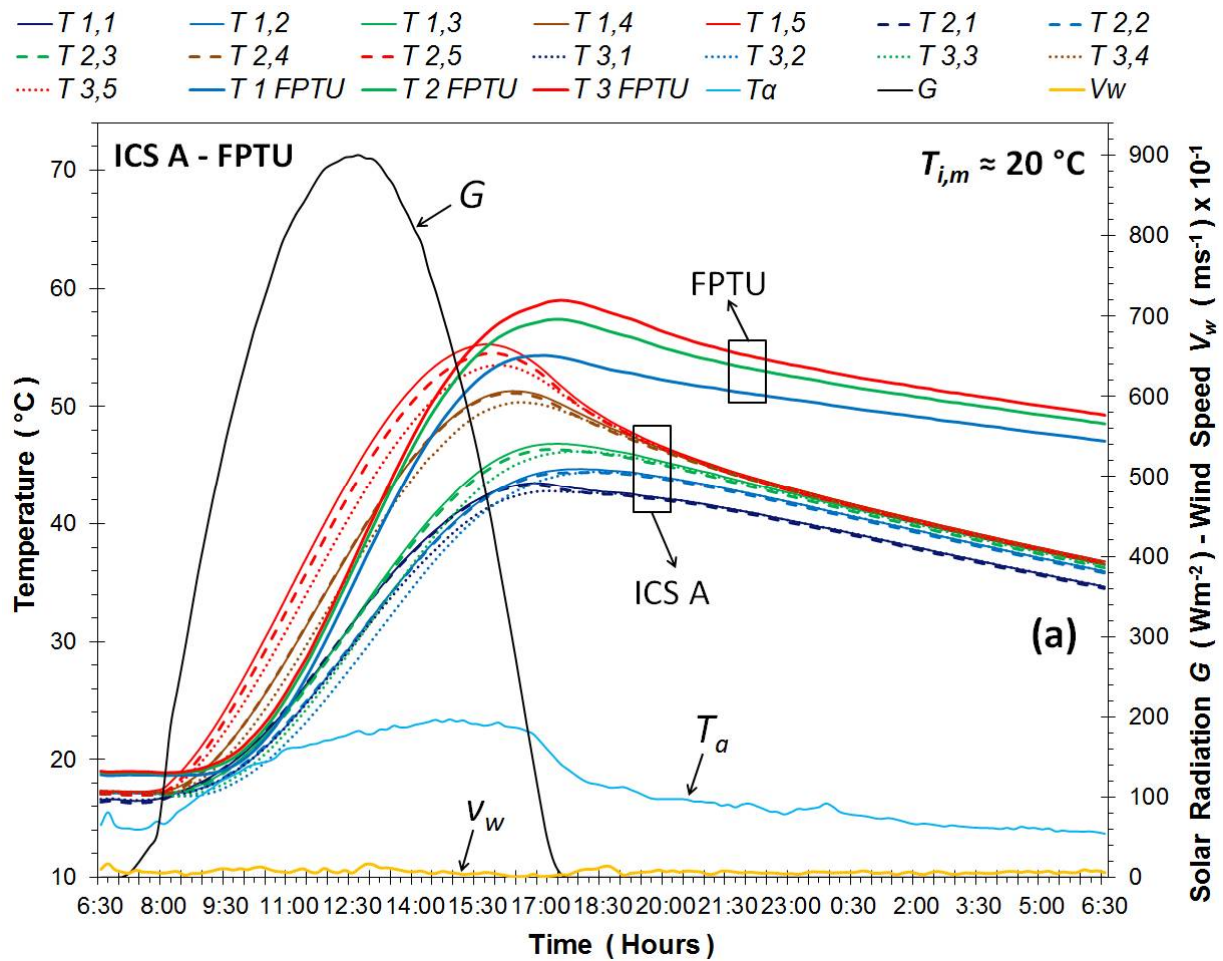
ΣΥΣΚΕΥΗ	Μέση ημερήσια Απόδοση η_D	Συντελεστής Θερμικών Απωλειών U_S (WK^{-1})
ICS A	$0.633 - 3.117 \cdot (\Delta T_{m,D} / G_m) - 0.683 \cdot (\Delta T_{m,D} / G_m)^2$	$3.788 + 0.0103 \cdot \Delta T_{m,N}$
ICS B	$0.634 - 2.994 \cdot (\Delta T_{m,D} / G_m) - 1.236 \cdot (\Delta T_{m,D} / G_m)^2$	$3.952 + 0.0106 \cdot \Delta T_{m,N}$
FPTU	$0.467 - 3 \cdot (\Delta T_{m,D} / G_m) - 6.94 \cdot (\Delta T_{m,D} / G_m)^2$	$1.373 + 0.004 \cdot \Delta T_{m,N}$

Πίνακας 4.1: *Εξισώσεις των μέσων ημερήσιων αποδόσεων η_D και των συντελεστών νυκτερινών απωλειών U_S , $U_{S,\alpha}$ και $U_{S,r}$ των συσκευών ICS και της συσκευής FPTU.*

4.1.3 Διαγράμματα Μεταβολής της Θερμοκρασίας του Νερού για 24ωρη και Τριήμερη Λειτουργία των Συσκευών ICS με Ασύμμετρα Κάτοπτρα.

Τα μέχρι τώρα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι η συσκευή FPTU λειτουργεί καλύτερα σε σχέση με τις συσκευές ICS της κατηγορίας που εξετάζουμε. Στην παράγραφο αυτή επιχειρούμε να εξετάσουμε τη θερμική συμπεριφορά των συσκευών ICS λαμβάνοντας υπόψη την αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του νερού εντός των δοχείων αποθήκευσης και την εκτίμηση της θερμοκρασιακής

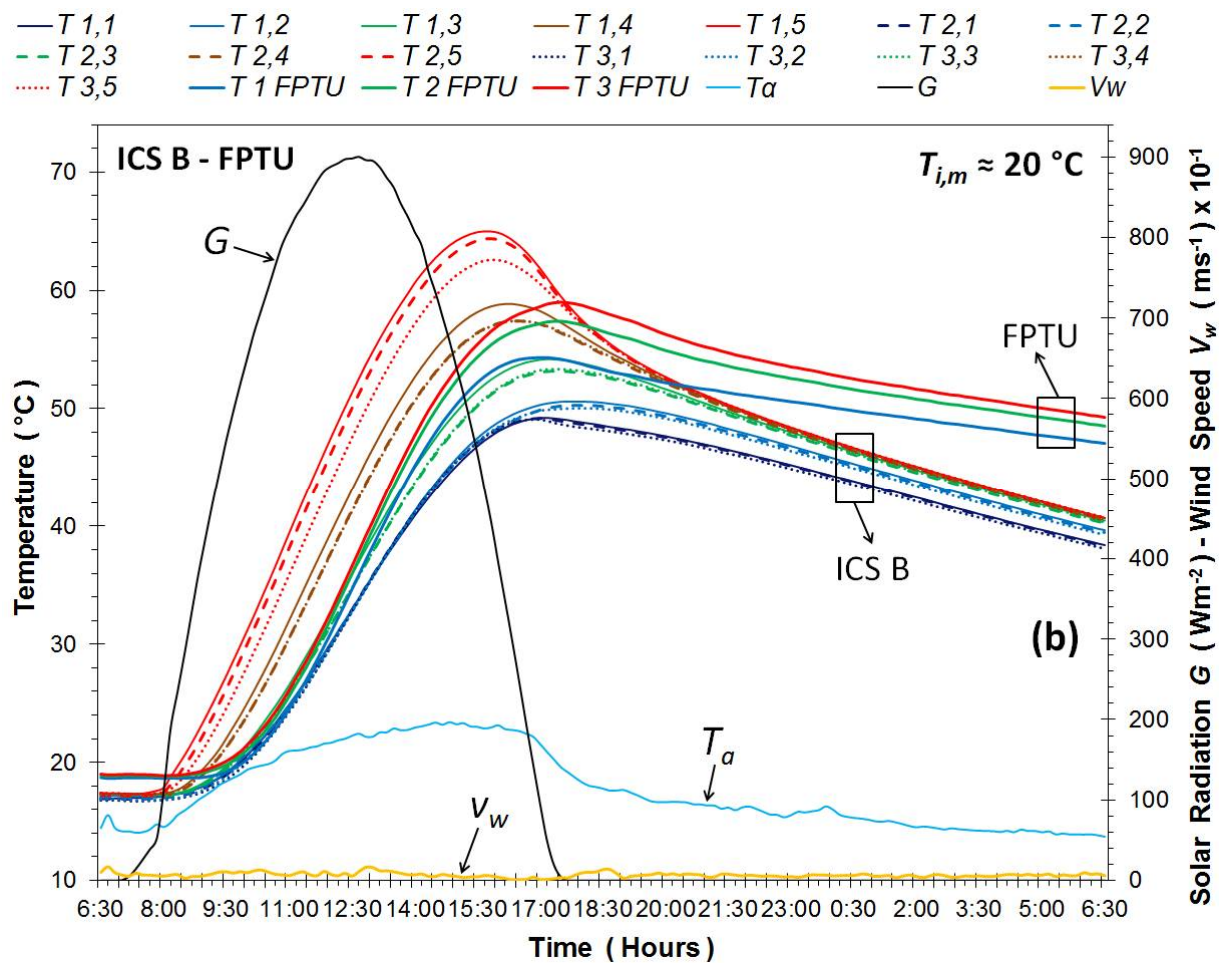
διαστρωμάτωσής του στη διάρκεια 24ωρης και τετραήμερης λειτουργίας τους χωρίς απομάστευσή του. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η σχεδίαση των συσκευών ICS στοχεύει στη δημιουργία έντονης θερμοκρασιακής διαστρωμάτωσης του νερού εντός των δοχείων αποθήκευσης προκειμένου σε εύλογο χρονικό διάστημα από την έναρξη της ημερήσιας λειτουργίας τους, το νερό που περιέχεται στο ανώτερο τμήμα του δοχείου αποθήκευσης να βρίσκεται σε μέγιστη δυνατή θερμοκρασία χρήσης. Η απαίτηση αυτή σχετίζεται με το ποσό και την κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας στην απορροφητική επιφάνεια των συσκευών. Στα διαγράμματα 4.2 και 4.3 παρουσιάζονται οι μεταβολές της θερμοκρασίας του νερού εντός των δοχείων για όλες τις υπό μελέτη συσκευές ICS. Η αρχική θερμοκρασία του νερού είναι η ελάχιστη για τη δεδομένη εποχή του έτους που πραγματοποιείται η συγκριτική λειτουργία, προκειμένου να εκτιμηθεί η θερμοκρασιακή διαστρωμάτωση του νερού αλλά και η μέγιστη τιμή της μέσης θερμοκρασίας του σε κάθε περίπτωση. Με βάση τα διαγράμματα αυτά εντοπίζονται οι διαφορές στη θερμική συμπεριφορά των υπό μελέτη συσκευών ICS και προκύπτουν συμπεράσματα που συνοψίζονται στα εξής:



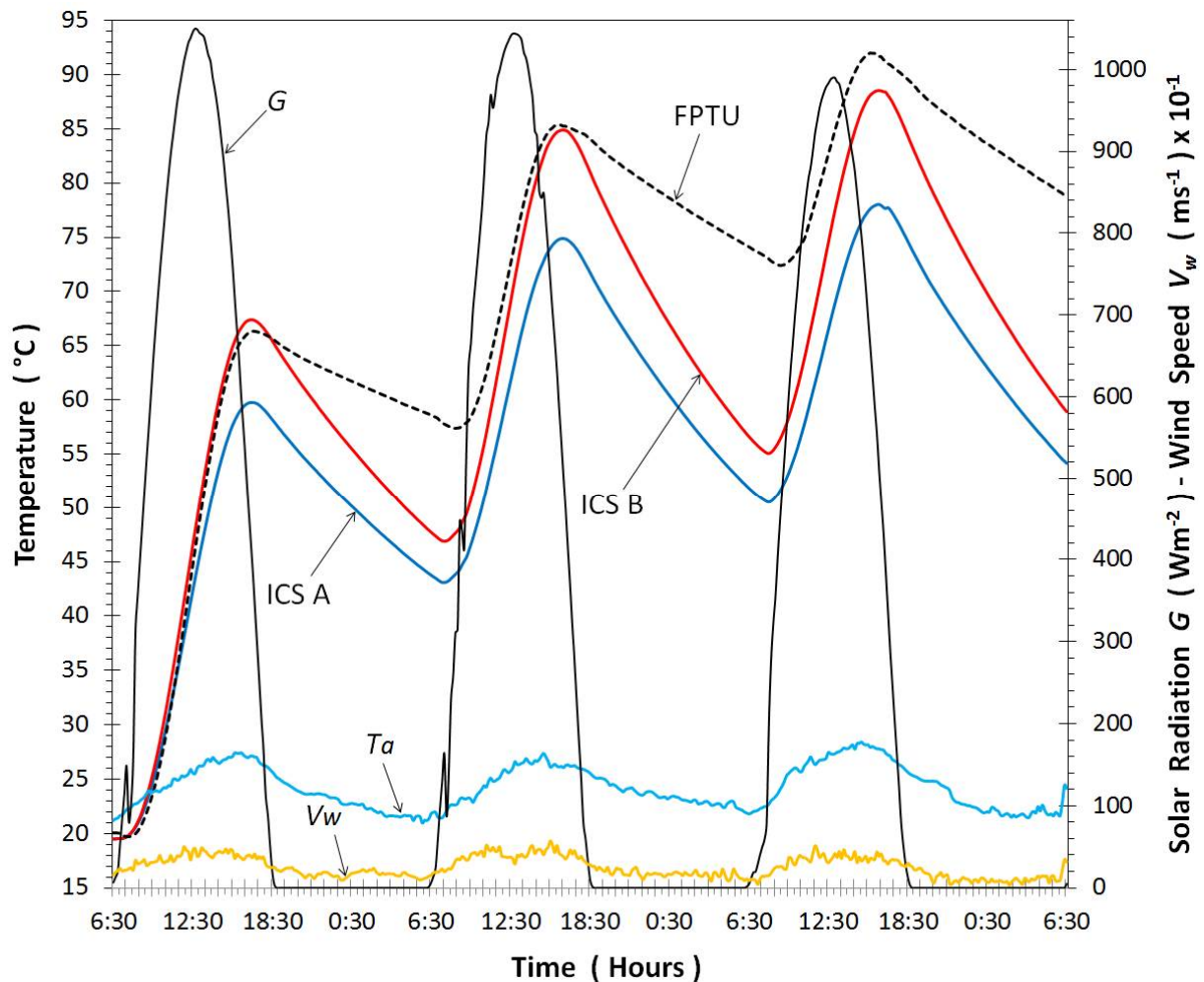
Διάγραμμα 4.2: Διαγράμματα μεταβολής των θερμοκρασιών του νερού εντός των κυλινδρικών δοχείων αποθήκευσης της συσκευής ICS A και FPTU για 24ωρη λειτουργία.

1. Η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του νερού σχετίζεται με το συνολικό άνοιγμα της κάθε συσκευής, καθώς εξαρτάται από τη συνολική ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στην απορροφητική επιφάνεια των συσκευών (λόγος V_T / A_α). Επιπλέον παράγοντες θεωρούνται ο λόγος συγκέντρωσης (CR) που καθορίζει την ένταση της συνολικά απορροφούμενης ηλιακής ακτινοβολίας αλλά και η συλλεκτική επιφάνεια (A_r) σε κάθε περίπτωση.

2. Η θερμοκρασιακή διαστρωμάτωση του νερού εντός των δοχείων αποθήκευσης καθορίζεται από τη γεωμετρία και τη σχεδίαση της κάθε συσκευής. Στην περίπτωση αυτή οι συσκευές ICS παρουσιάζουν έντονη θερμοκρασιακή διαστρωμάτωση και μάλιστα νωρίτερα της πρωινές ώρες λειτουργίας.



Διάγραμμα 4.3: Διαγράμματα μεταβολής των θερμοκρασιών του νερού εντός των κυλινδρικών δοχείων αποθήκευσης της συσκευής ICS B και FPTU για 24ωρη λειτουργία.



Διάγραμμα 4.4: Διαγράμματα μεταβολής των θερμοκρασιών του νερού εντός των κυλινδρικών δοχείων αποθήκευσης της συσκευής ICS B και FPTU για τριήμερη λειτουργία.

Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζονται αποτελέσματα της τριήμερης λειτουργίας των συσκευών χωρίς απομάστευση νερού χρήσης. Η διαφορές εντοπίζονται στη διαφοροποίηση της γεωμετρίας των συσκευών, στις διαστάσεις και στον όγκο του νερού αποθήκευσης.

4.2 Συμπεράσματα.

Τα συμπεράσματα της εκπόνησης της Πτυχιακής Εργασίας συνοψίζονται στα ακόλουθα:

1. Οι προτεινόμενες ηλιακές συσκευές ICS αποτελούν εναλλακτική πρόταση για θέρμανση νερού χρήσης για θερμοκρασίες 40-70°C. Το συμπέρασμα αυτό εξάγεται από το γεγονός ότι τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι οι επιτεύξιμες θερμοκρασίες μπορούν να καλύψουν τις εν λόγω ανάγκες.
2. Επιπλέον τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι συγκριτικά με τη λειτουργία της συσκευής FPTU, η λειτουργία των συσκευών ICS κρίνεται ιδιαίτερα αποδοτική. Ιδιαίτερα στη διάρκεια της ημερήσια λειτουργίας η θερμοκρασία του νερού εντός των δοχείων αποθήκευσης των συσκευών ICS, παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές σε σχέση με την αντίστοιχη θερμοκρασία του νερού εντός του δοχείου αποθήκευσης της συσκευής FPTU.
3. Η μέση ημερήσια απόδοση των συσκευών ICS κυμαίνεται σε υψηλότερες τιμές συγκριτικά με την αντίστοιχη μέση ημερήσια απόδοση της συσκευής FPTU.
4. Κρίσιμο σημείο της λειτουργίας των συσκευών ICS είναι η διατήρηση της θερμοκρασίας του νερού εντός των δοχείων αποθήκευσης. Το ζήτημα αυτό είναι αντικείμενο ερευνητικής δραστηριότητας τα τελευταία χρόνια. Η επίλυση του ζητήματος αυτού δεν ήταν το βασικό αντικείμενο της πτυχιακής εργασίας. Μπορούν όμως να διατυπωθούν τα ακόλουθα: Η χρήση του νερού αποθήκευσης στη διάρκεια της ημέρας είναι η κρίσιμη διαδικασία με την οποία μπορεί να βελτιωθεί η θερμική συμπεριφορά των συσκευών ICS.
5. Το κόστος κατασκευής και εγκατάστασης των συσκευών ICS κρίνεται χαμηλότερο συγκριτικά με το αντίστοιχο κόστος της συσκευής FPTU. Αυτό ίσως είναι και το σημαντικότερο πλεονέκτημα των συσκευών ICS, ιδιαίτερα δε όταν μπορούν με εύκολο τρόπο να εγκατασταθούν σε όλες τις οροφές κτιρίων.

Παράρτημα

Κώδικας Προγράμματος CR10X

(LOGGER)

Program: ICS

Flag Usage: 10

Input Channel Usage: 67

Excitation Channel Usage: None

Control Port Usage: COM 1

Pulse Input Channel Usage: P1

Output Array Definitions: 67

*	1	Table 1 Programs
01:	60	Sec. Execution Interval
01:	P11	Temp 107 Probe
01:	1	Rep
02:	1	IN Chan
03:	3	Excite all reps w/EXchan 3
04:	65	Loc :
05:	1	Mult
06:	0	Offset
02:	P2	Volt (DIFF)
01:	1	Rep
02:	33	25 mV 50 Hz rejection Range
03:	6	IN Chan
04:	66	Loc :
05:	84.123	Mult
06:	0	Offset

03:	P3	Pulse
01:	1	Rep
02:	1	Pulse Input Chan
03:	22	Switch closure; Output Hz.
04:	67	Loc :
05:	1.2766	Mult
06:	0	Offset
04:	P86	Do
01:	41	Set high Port 1
05:	P87	Beginning of Loop
01:	0	Delay
02:	16	Loop Count
06:	P86	Do
01:	72	Pulse Port 2
07:	P90	Step Loop Index
01:	2	Step
08:	P14	Thermocouple Temp (DIFF)
01:	2	Reps
02:	32	7.5 mV 50 Hz rejection Range
03:	2	IN Chan
04:	1	Type T (Copper-Constantan)
05:	65	Ref Temp Loc
06:	1--	Loc :
07:	1	Mult
08:	0	Offset

Page 2 Table 1

09:	P95	End
10:	P86	Do
01:	51	Set low Port 1
11:	P86	Do
01:	43	Set high Port 3

12:	P87	Beginning of Loop
01:	0	Delay
02:	16	Loop Count
13:	P86	Do
01:	74	Pulse Port 4
14:	P90	Step Loop Index
01:	2	Step
15:	P14	Thermocouple Temp (DIFF)
01:	2	Reps
02:	32	7.5 mV 50 Hz rejection Range
03:	4	IN Chan
04:	1	Type T (Copper-Constantan)
05:	65	Ref Temp Loc
06:	33--	Loc :
07:	1	Mult
08:	0	Offset
16:	P95	End
17:	P86	Do
01:	53	Set low Port 3
18:	P92	If time is
01:	0	minutes into a
02:	60	minute interval
03:	10	Set high Flag 0 (output)
19:	P71	Average
01:	67	Reps
02:	1	Loc
20:	P96	Serial Output
01:	41	Printer ASCII/1200 Baud
21:	P77	Real Time
01:	0110	Day,Hour-Minute

22: P End Table 1

* 2 Table 2 Programs

01: 0.0000 Sec. Execution Interval

01: P End Table 2

* 3 Table 3 Subroutines

Page 3 Table 3

01: P End Table 3

* A Mode 10 Memory Allocation

01: 67 Input Locations

02: 136 Intermediate Locations

03: 0.0000 Final Storage Area 2

* C Mode 12 Security

01: 0000 LOCK 1

02: 0000 LOCK 2

03: 0000 LOCK 3

Page 4 Input Location Assignments (with comments)

Key:

T=Table Number

E=Entry Number

L=Location Number

T: E: L: Loc :
1: 8: 1: Loc :
1: 15: 33: Loc :
1: 1: 65: Loc :
1: 2: 66: Loc :
1: 3: 67: Loc :

Βιβλιογραφία

- [1] J. A. Duffie, W. A. Beckman, “Solar Engineering of Thermal Processes”. John Wiley & Sons, Inc. (1991).
- [2] Σ.Ν.Καπλάνης ΗΠΙΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΙΙ Ηλιακή Μηχανική Εκδόσεις ΙΩΝ
- [3] Ι. Γ. Καούρης, Ν. Συρίμπεης, “Παράλληλη σύγκριση δύο πανομοιότυπων ηλιακών θερμοσιφώνων με διαφορετική κυκλοφορία κλειστού κυκλώματος”. Πρακτικά 6^{ου} Εθνικού Συνεδρίου Ι.Η.Τ., Τόμος Α', σελ. 221–231, Βόλος, 3–5 Νοε. (1999).
- [4] S. Kalogirou, “Design, construction, performance evaluation and economic analysis of an integrated collector storage system”. *Renewable Energy* 12, 179–192 (1997).
- [5] H. P. Garg and U. Rani, “Theoretical and experimental studies on collector / storage type solar water heater”. *Solar Energy* 29, 467–478 (1982).
- [6] A. Goetzberger and M. Rommel, “Prospects for integrated storage collector systems in central Europe”. *Solar Energy* 39, 211–219 (1987).
- [7] H. P. Garg, D. S. Hrishikesan and R. Jha, “System performance of built-in-storage type solar water heater with transparent insulation”. *Solar and Wind Technology* 5, 533–538 (1988).
- [8] J. V. C. Chinnappa and K. Gnanalingam, “Performance at Colombo, Ceylon, of a pressurized solar water heater of the combined collector and storage type”. *Solar Energy* 15, 195–204 (1973).
- [9] H. P. Garg, “Year round performance studies on a built-in-storage type solar water heater at Jodhpur, India”. *Solar Energy* 17, 167–172 (1975).
- [10] J. Prakash, H. P. Garg and G. Datta, “Effect of baffle plate on the performance of built-in-storage type solar water heater”. *Energy* 8, 381–387 (1983).

- [11] M. Sokolov and M. Vaxman, "Analysis of an integral compact solar water heater". *Solar Energy* 30, 237–246 (1983).
- [12] A. Ecevit, M. Al-Shariah and E. D. Apaydin, "Triangular built-in-storage solar water heater". *Solar Energy* 42, 253–265 (1989).
- [13] B. Vaxman and M. Sokolov, "Experiments with an integral compact solar water heater". *Solar Energy* 34, 447–454 (1985).
- [14] A. Ecevit, M. A. Chaikh Wais and A. M. Al – Shariah, "A comparative evaluation of the performances of three built-in-storage-type solar water heaters". *Solar Energy* 44, 23–36 (1990).
- [15] Y. Tripanagnostopoulos, M. Souliotis, Th. Nousia. "Solar ICS systems with two cylindrical storage tanks". *Renewable Energy*, Volume 16, Issues 1-4, pp. 665-668, (1999).
- [16] Y. Tripanagnostopoulos, M. Souliotis, Th. Nousia. "CPC Type Integrated Collector Storage Systems". *Solar Energy*, Volume 72, Issue 4, pp. 327–350, (2002).
- [17] Y. Tripanagnostopoulos, M. Souliotis. "ICS solar systems with horizontal cylindrical storage tank and reflector of CPC or involute geometry". *Renewable Energy*, Volume 29, Issue 1, pp. 13–38, (2004).
- [18] Y. Tripanagnostopoulos, M. Souliotis. "ICS solar systems with horizontal (E–W) and vertical (N–S) cylindrical water storage tank". *Renewable Energy*, Volume 29, Issue 1, pp. 73–96, (2004).
- [19] Y. Tripanagnostopoulos, M. Souliotis. "Integrated collector storage solar systems with asymmetric CPC reflectors". *Renewable Energy*, Volume 29, Issue 2, pp. 223–248, (2004).
- [20] M. Souliotis, Y. Tripanagnostopoulos. "Experimental study of CPC type ICS solar systems". *Solar Energy*, Volume 76, Issue 4, pp. 389–408, (2004).
- [21] Y. Tripanagnostopoulos, M. Souliotis. "ICS solar systems with two water tanks". *Renewable Energy*, Volume 31, Issue 11, pp. 1698–1717, (2006).