



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟΥΠΟΛΗ, 73 100 ΧΑΝΙΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Πειραματική μελέτη και λειτουργία ηλιακού θερμικού συστήματος με
συλλέκτη κενού προηγμένης σχεδίασης**



ΚΟΙΛΙΑΣ ΧΡΗΣΤΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΠΑΠΑΕΥΘΥΜΙΟΥ ΣΠΥΡΟΣ

ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΧΑΝΙΑ 2020

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Με την συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, φτάνει στο τέλος ένας μακρύς κύκλος σπουδών που για εμένα αποτέλεσε ένα από τα πιο σημαντικά κομμάτια της ζωής μου. Μέσα από αυτά τα χρόνια σπουδών, τους φίλους που έκανα και τους καθηγητές με τους οποίους ήρθα σε επαφή, αποκόμισα εξαιρετικές γνώσεις, οι οποίες θα αποτελέσουν θεμέλιο για την επαγγελματική μου σταδιοδρομία.

Σε αυτό το σημείο, θέλω να εκφράσω τις ευχαριστίες μου προς εκείνους τους ανθρώπους που βοήθησαν να πραγματοποιηθεί η παρούσα εργασία. Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής εργασίας μου, Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Παπαευθυμίου Σπύρο για την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος και για την συμπαράσταση και βοήθεια που μου παρείχε σε όλη τη διάρκεια του. Επιπλέον, οφείλω να ευχαριστήσω και τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Σουλιώτη Μανώλη για τις πολύτιμες γνώσεις που μου έδωσε, καθώς και για την ενασχόληση και τις υποδείξεις του που με βοήθησαν να επιλύσω τα προβλήματα που προέκυψαν. Τέλος, δεν μπορώ να παραλείψω να ευχαριστήσω τον συμφοιτητή και φίλο μου Γιώργο Παπαδόπουλο για την άψογη συνεργασία που είχαμε καθόλη την διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας και συγγραφής των διπλωματικών μας.

Κλείνοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς την οικογένειά μου για την υπομονή και την αμέριστη στήριξη στην προσπάθεια μου όλα αυτά τα χρόνια, αλλά και την υπέροχη παρέα μου για τις αξέχαστες στιγμές και την διαρκή συμπαράσταση που μου παρείχαν όλο αυτό το διάστημα.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα ηλιακά θερμικά συστήματα αποτελούν μια τεχνολογία που τα τελευταία χρόνια γνωρίζει ραγδαία ανάπτυξη, λόγω της ελκυστικότητάς τους σε οικονομική και περιβαλλοντολογική βάση. Δεν παύουν όμως να χρίζουν περαιτέρω βελτίωσης, κυρίως λόγω των θερμικών απωλειών που έχουν σε διαστήματα μη επαρκούς ηλιοφάνειας.

Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, γίνεται μια αναλυτική μελέτη και ανάπτυξη της λειτουργίας ενός πειραματικού ηλιακού θερμικού συστήματος για θέρμανση ζεστού νερού χρήσης. Ο σχεδιασμός και η κατασκευή αυτής της πρότυπης διάταξης πραγματοποιήθηκε στον χώρο του Πολυτεχνείου Κρήτης από τον Φεβρουάριο του 2020 και οι διαδικασίες περιγράφονται αναλυτικά.

Πιο συγκεκριμένα, στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας παρουσιάζονται τα είδη των θερμικών ηλιακών συστημάτων και η αρχή λειτουργίας τους. Επίσης, αναλύονται τα διάφορα είδη ηλιακών συλλεκτών και τα χαρακτηριστικά τους, καθώς και αυτά των δεξαμενών αποθήκευσης.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, παρουσιάζονται-αναλύονται τα σχέδια και επεξηγούνται οι αρχές λειτουργίας της διάταξης που κατασκευάστηκε. Επίσης, γίνεται αναφορά στη μεθοδολογία και στις εργασίες συναρμολόγησης για το σχεδιασμό και την κατασκευή του ηλιακού θερμικού συστήματος. Ακόμα στο τέλος του κεφαλαίου, αναλύονται και απεικονίζονται τα εξαρτήματα και τα όργανα μέτρησης που αποτελούν την διάταξη.

Στο τρίτο κεφάλαιο, το οποίο αφορά τον σκοπό της διπλωματικής, είναι μέσω πειραματικών μετρήσεων που έγιναν στον χώρο του Πολυτεχνείου Κρήτης τον Ιούλιο 2020, ο προσδιορισμός της στιγμιαίας απόδοσης του συλλέκτη καθώς και της ημερήσιας απόδοσης του συστήματος. Στόχος είναι η σταδιακή βελτιστοποίηση της ημερήσιας λειτουργίας της διάταξης. Επίσης, γίνεται μια αναλυτική αναφορά των μεθόδων υπολογισμού των δύο αποδόσεων καθώς και ο σχεδιασμός των καμπυλών διακύμανσης των θερμοκρασιών που προκύπτουν από τις μετρήσεις.

Τέλος, η διπλωματική καταλήγει στην εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων και σε μελλοντικές προοπτικές που προκύπτουν από την μελέτη της πειραματικής διάταξης.

SUMMARY

Solar thermal systems are a technology that has grown rapidly in recent years, due to their attractiveness on an economic and environmental basis. Although, they do not cease to need further improvement, mainly due to the heat losses they have during periods of insufficient sunshine.

In this thesis, is carried out a detailed study and development of the operation of an experimental solar thermal system for domestic hot water heating. The design and construction of this standard device took place at the Technical University of Crete since February 2020 and the procedures are described in detail.

More specifically, in the first chapter of the thesis are presented the types of solar thermal systems and their operation principles. Also, the different types of solar panels and their characteristics are analyzed, as well as those of storage tanks.

In the second chapter, the drawings are presented - analyzed and the operating principles of the experimental device constructed are explained. Reference is also made to the methodology and assembly work for the design and construction of the solar thermal system. Also, at the end of the chapter, the components and measuring instruments that make up the device are analyzed and illustrated.

In the third chapter, which concerns the purpose of the diploma, is through experimental measurements made at the Technical University of Crete in July 2020, the determination of the instantaneous performance of the collector as well as the daily performance of the system. The aim is to gradually optimize the daily operation of the device. Also, in this chapter, a detailed report of the methods of calculating the two efficiencies is made, as well as the design of the temperature variation curves resulting from the measurements.

Finally, the diploma ends up with useful conclusions and future perspectives arising from the study of the experimental device.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	2
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	3
SUMMARY	4
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	5
ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ - ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....	11
ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ.....	11
1.1. Ηλιακή ακτινοβολία και η αξιοποίησή της	11
1.2. Ενεργητικές μέθοδοι αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας	14
1.3. Περιγραφή λειτουργίας ηλιακού θερμικού συστήματος	15
1.4. Είδη ηλιακών θερμικών συστημάτων	16
1.5. Δεξαμενή αποθήκευσης	22
1.6. Ηλιακός συλλέκτης.....	23
1.6.1. Είδη ηλιακών συλλεκτών	24
1.6.2. Απόδοση ηλιακού συλλέκτη	35
1.6.3. Προσανατολισμός και κλίση ηλιακών συλλεκτών	38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	40
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	40
2.1. Εισαγωγή	40
2.2. Σχεδιασμός του ηλιακού συστήματος.....	41
2.3. Διαδικασία συναρμολόγησης και κατασκευής πειραματικής διάταξης	45
2.4. Παρουσίαση οργάνων και εξοπλισμού πειραματικής συσκευής.....	52
2.4.1. Ηλιακός συλλέκτης κενού EMELCATSOL	52
2.4.2. Δεξαμενή αποθήκευσης EMELCATSOL.....	54
2.4.3. Κυκλοφορητής GRUNDFOS ALPHA SOLAR.....	55
2.4.4. Ηλιακή αντλία DC D-Energia System PV5-12 5.....	57

2.4.5. Φωτοβολταϊκό πάνελ.....	59
2.4.6. Ηλεκτρομαγνητικό ροόμετρο ifm.....	59
2.4.7. Πυρανόμετρο Kipp & Zonen CMP 3.....	61
2.4.8. Ανεμόμετρο Windspeed A100K	62
2.4.9. Θερμοζεύγη – Εμβαπτιζόμενα κυάθια.....	63
2.4.10. Βασικός υδραυλικός εξοπλισμός.....	64
2.4.11. Σύστημα καταγραφής δεδομένων (Data Logger).....	68
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	75
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	75
3.1. Σκοπός πειραματικών δοκιμών	75
3.2. Μέθοδοι πειραματικής μελέτης ηλιοθερμικών συστημάτων	76
3.2.1. Προσδιορισμός στιγμιαίας θερμικής απόδοσης ηλιακού συλλέκτη.....	76
3.2.2. Πειραματικός προσδιορισμός ημερήσιας απόδοσης συστήματος	79
3.2.3. Πειραματικός Προσδιορισμός Θερμικών Απωλειών Δεξαμενής	86
3.3. Πειραματική διάταξη και διαδικασία μετρήσεων του ηλιακού συστήματος.....	88
3.4. Αποτελέσματα μετρητικών δοκιμών του συστήματος	89
3.4.1. Διαγράμματα ημερήσιας λειτουργίας του συστήματος	89
3.4.2. Υπολογισμός στιγμιαίας απόδοσης συλλέκτη.....	96
3.4.3. Υπολογισμός ημερήσιας απόδοσης συστήματος	98
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	100
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ.....	100
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	102

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ-ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Figure 1.1: Εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία	12
Figure 1.2: Μέση ετήσια ηλιακή ακτινοβολία στην Ευρώπη	12
Figure 1.3: Παράδειγμα εφαρμογής φωτοβολταϊκού συστήματος σε κατοικία	13
Figure 1.4: Παράδειγμα εφαρμογής παθητικού συστήματος σε κατοικία	13
Figure 1.5: Παράδειγμα εφαρμογής ενός ενεργητικού θερμικού συστήματος σε κατοικία ..	14
Figure 1.6: Τρόπος λειτουργίας ηλιακού θερμικού συστήματος.....	16
Figure 1.7: Ένα θερμικό ηλιακό σύστημα φυσικής ροής.....	17
Figure 1.8: Μια τυπική διάταξη ενός θερμοσιφωνικού συστήματος	17
Figure 1.9: Σύστημα ICS.....	18
Figure 1.10: Ένα ηλιακό σύστημα εξαναγκασμένης κυκλοφορίας με εφεδρικό λέβητα θερμότητας.....	19
Figure 1.11: Ηλιακό σύστημα ανοικτού βρόγχου	20
Figure 1.12: Ηλιακό σύστημα κλειστού βρόγχου	21
Figure 1.13: Τομή δεξαμενής νερού με σερπαντίνα	22
Figure 1.14: Ηλιακός συλλέκτης χωρίς κάλυμμα	25
Figure 1.15: Μέρη ενός επίπεδου ηλιακού συλλέκτη	26
Figure 1.16: Ηλιακό σύστημα με συλλέκτες κενού.....	27
Figure 1.17: Αρχή λειτουργίας ενός συλλέκτη κενού υγρής σύνδεσης, σε κάτοψη	28
Figure 1.18: Σχεδιάγραμμα απορροφητή σε ένα συλλέκτη κενού κατοπτρικής διάταξης	28
Figure 1.19 : Τομή ενός σωλήνα θερμότητας σε συλλέκτη κενού υγρής σύνδεσης (αριστερά), ξηρής σύνδεσης (δεξιά)	29
Figure 1.20: Τυπικά συγκεντρωτικά συστήματα: σύστημα με παραβολικό κάτοπτρο, ηλιακός πύργος, σύστημα με συλλέκτες τύπου Fresnel, σύστημα με παραβολικό δίσκο	31
Figure 1.21: Πάρκο με παραβολικούς δίσκους.....	32
Figure 1.22: Σύστημα ηλιακού δίσκου με μηχανή Stirling	32
Figure 1.23: Πάρκο με παραβολικά κοίλα κάτοπτρα.....	33
Figure 1.24: Σύστημα με ανακλαστήρες Fresnel.....	34
Figure 1.25: Ένας ηλιακός πύργος όπως φαίνεται από το έδαφος και από ύψος	35
Figure 1.26: Απόδοση συλλέκτη για έναν τυπικό συλλέκτη κενού σε διάφορα επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας.....	36
Figure 1.27: Γραφήματα με απόδοση και θερμοκρασιακό εύρος διαφόρων τύπων συλλεκτών	38
Figure 1.28: Αλλαγή της κλίσης συλλέκτη ανάλογα την εποχή.....	39

Figure 2.29: Διάγραμμα ηλιακού συστήματος εξαναγκασμένης ροής που παρουσιάζει τις υδραυλικές και ηλεκτρικές συνδέσεις σε τομή.....	42
Figure 2.30: 3D σχεδιασμός πειραματικής διάταξης	43
Figure 2.31: Δεξιά πλάγια όψη.....	43
Figure 2.32: Αριστερή πλάγια όψη	44
Figure 2.33: Μπροστινή όψη	44
Figure 2.34: Πίσω όψη	44
Figure 2.35: Διαστάσεις βάσης υποστήριξης (mm)	45
Figure 2.36: 3D σχεδιασμός βάσης υποστήριξης	46
Figure 2.37: Βάση υποστήριξης συστήματος.....	46
Figure 2.38: Πίσω όψη βάσης στήριξης	47
Figure 2.39: Δημιουργία κλειστού κυκλώματος με την τοποθέτηση κυκλοφορητή και ροόμετρου	48
Figure 2.40: Δημιουργία ανοικτού κυκλώματος με τοποθέτηση αντλίας ανακυκλοφορίας ..	49
Figure 2.41: Σύνδεση πυρανόμετρου και ανεμόμετρου με το Data Logger.....	49
Figure 2.42: Data Logger, θερμοζεύγη, τροφοδοτικό του Η/Μ ροόμετρου και ροοστάτης ...	50
Figure 2.43: Μπροστινή όψη του τελικού πειραματικού συστήματος.....	50
Figure 2.44: Πλάγια όψη τελικού πειραματικού συστήματος.....	51
Figure 2.45: Συνολική απεικόνιση διάταξης.....	51
Figure 2.46: Διαστάσεις πλαισίου ηλιακού συλλέκτη(mm)	53
Figure 2.47: Ο ηλιακός συλλέκτης κενού	53
Figure 2.48: Διαστάσεις δεξαμενής αποθήκευσης (mm)	54
Figure 2.49: Δεξαμενή αποθήκευσης.....	54
Figure 2.50: Κυκλοφορητής Grundfos	56
Figure 2.51: Διαστάσεις κυκλοφορητή (mm).....	56
Figure 2.52: Ηλιακή αντλία DC	57
Figure 2.53: Αντλία ανακυκλοφορίας στο σύστημα	58
Figure 2.54: Διαστάσεις αντλίας DC (mm)	58
Figure 2.55: Φωτοβολταϊκό πάνελ συστήματος.....	59
Figure 2.56: Ηλεκτρομαγνητικό ροόμετρο ifm.....	60
Figure 2.57: CMP 3 πυρανόμετρο	61
Figure 2.58: Τομή πυρανόμετρου	62
Figure 2.59: Ανεμόμετρο Windspeed A100K	63
Figure 2.60: Θερμοστοιχείο τύπου T	Figure 2.61: Εμβαπτιζόμενο καάθιο..... 64
Figure 2.62: Σχεδιάγραμμα μανόμετρου τύπου Bourdon	64

Figure 2.63: Ένα τυπικό μανόμετρο Bourdon.....	65
Figure 2.64: Κοινό δοχείο διαστολής (αριστερά), δοχείο διαστολής της διάταξης (δεξιά) ...	66
Figure 2.65: Βαλβίδα αντεπιστροφής	67
Figure 2.66: Βαλβίδα εκτόνωσης	67
Figure 2.67: Βαλβίδα εξαερισμού	68
Figure 2.68: Μέρη βασικής μονάδας Data Logger	69
Figure 2.69: CR1000X data logger	71
Figure 2.70: Οι θύρες του CR1000X.....	72
Figure 2.71: Λογισμικό πρόγραμμα Loggernet.....	74
Figure 3.72: Διάγραμμα μεταβολής των θερμοκρασιών και της έντασης της ακτινοβολίας κατά την διάρκεια της 1ης ημέρας λειτουργίας του συστήματος	89
Figure 3.73: Διάγραμμα μεταβολής των θερμοκρασιών και της έντασης της ακτινοβολίας κατά την διάρκεια της 2ης ημέρας λειτουργίας του συστήματος	90
Figure 3.74: Διάγραμμα μεταβολής των θερμοκρασιών και της έντασης της ακτινοβολίας κατά την διάρκεια της 3ης ημέρας λειτουργίας του συστήματος	90
Figure 3.75: Διάγραμμα μεταβολής των θερμοκρασιών και της έντασης της ακτινοβολίας κατά την διάρκεια της 4ης ημέρας λειτουργίας του συστήματος	91
Figure 3.76: Διάγραμμα μεταβολής των θερμοκρασιών και της έντασης της ακτινοβολίας κατά την διάρκεια της 5ης ημέρας λειτουργίας του συστήματος	92
Figure 3.77: Διάγραμμα μεταβολής των θερμοκρασιών και της έντασης της ακτινοβολίας κατά την διάρκεια της 6ης ημέρας λειτουργίας του συστήματος	92
Figure 3.78: Διάγραμμα μεταβολής των θερμοκρασιών και της έντασης της ακτινοβολίας κατά την διάρκεια της 7ης ημέρας λειτουργίας του συστήματος	93
Figure 3.79: Διάγραμμα μεταβολής των θερμοκρασιών και της έντασης της ακτινοβολίας κατά την διάρκεια της 8ης ημέρας λειτουργίας του συστήματος	93
Figure 3.80: Διάγραμμα μεταβολής των θερμοκρασιών και της έντασης της ακτινοβολίας κατά την διάρκεια της 9ης ημέρας λειτουργίας του συστήματος	94
Figure 3.81: Διάγραμμα μεταβολής των θερμοκρασιών και της έντασης της ακτινοβολίας κατά την διάρκεια της 10ης ημέρας λειτουργίας του συστήματος	94
Figure 3.82: Διάγραμμα μεταβολής των θερμοκρασιών και της έντασης της ακτινοβολίας κατά την διάρκεια της 11ης ημέρας λειτουργίας του συστήματος	95
Figure 3.83: Γραφική παράσταση μεταβολής στιγμιαίας απόδοσης συλλέκτη	97
Figure 3.84: Γραφική παράσταση μεταβολής μέσης ημερήσιας απόδοσης συστήματος.....	99

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

1.1. Ηλιακή ακτινοβολία και η αξιοποίησή της

Ο ήλιος είναι ο πιο σημαντικός προμηθευτής ενέργειας της Γης. Όλη η ζωή στον πλανήτη μας εξαρτάται από την ενέργεια του. Είναι το σημείο εκκίνησης για όλες τις χημικές και βιολογικές διεργασίες. Ταυτόχρονα, είναι η πιο φιλική προς το περιβάλλον μορφή όλων των ενεργειών, αφού μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ποικίλους τρόπους και είναι κατάλληλη για όλα τα κοινωνικά συστήματα.

Στον πυρήνα του ήλιου λαμβάνει χώρα μια διαδικασία σύντηξης στην οποία ζεύγη πυρήνων υδρογόνου συντήκονται σε πυρήνες ηλίου. Η ενέργεια που απελευθερώνεται με αυτόν τον τρόπο ακτινοβολείται στο διάστημα με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Καθώς ο ήλιος απέχει 148 εκατομμύρια χιλιόμετρα από τη Γη, εκπέμπει μόνο ένα μικρό μέρος της ενέργειας του στον πλανήτη μας. Παρόλα αυτά, ο ήλιος προσφέρει περισσότερη ενέργεια σε τέσσερις ώρες από την ενέργεια που χρησιμοποιεί η ανθρώπινη φυλή σε ένα ολόκληρο έτος [1].

Η ενέργεια αυτή, αποτελείται από φως, θερμότητα και διάφορα μήκη κύματος και ακτινοβολείται στο διάστημα με ισχύ που φτάνει εκατοντάδες χιλιάδες δισεκατομμύρια κιλοβάτ. Η ισχύς της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στη γη είναι κατά μέσο όρο 10^{15} W. Βέβαια, στην επιφάνεια της Γης φτάνει μόνο ένα μέρος της ακτινοβολίας που προέρχεται κατευθείαν από τον Ήλιο (άμεση ακτινοβολία), γύρω στο 25%. Εκτός από αυτό το ποσοστό, άλλο ένα ποσό ακτινοβολίας (25%) φτάνει στην επιφάνεια από διάχυση στα σωματίδια της ατμόσφαιρας. Το υπόλοιπο, είτε απορροφάται από το όζον, τους υδρατμούς, τον αέρα και την σκόνη, είτε επιστρέφει πίσω στο διάστημα.

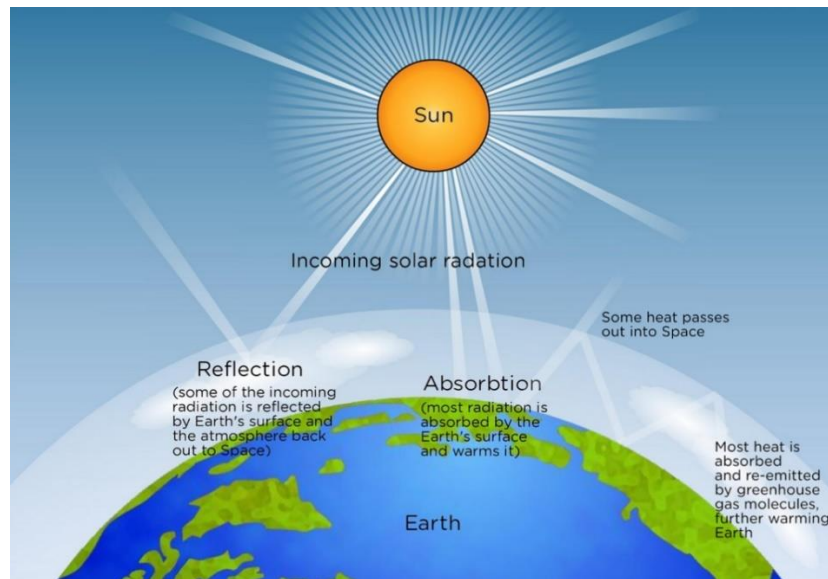


Figure 1.1: Εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία [2]

Σε ένα 24ωρο κάθε τετραγωνικό μέτρο επιφάνειας της γης δέχεται κατά μέσο όρο 4-6 KWh ηλιακής ενέργειας με ετήσια ακτινοβολία 800-2500 KWh/m³, ποσό σχεδόν διπλάσιο από την ενέργεια που θα μπορέσει ποτέ να ληφθεί από το σύνολο των μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (πετρέλαιο, φυσικό αέριο, γαιάνθρακες κ.α.). Η Ελλάδα, χώρα με μεγάλη ηλιοφάνεια, προσφέρεται για την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας, καθώς η μέση ημερήσια ενέργεια που δίνεται από τον ήλιο υπολογίζεται ότι είναι περίπου 4,6 KWh/m² [3].

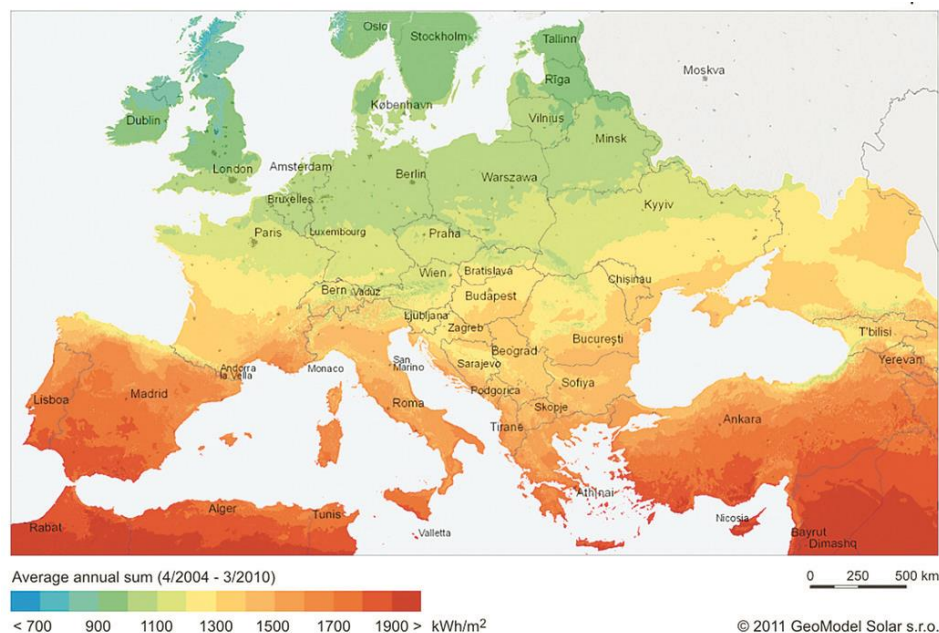


Figure 1.2: Μέση ετήσια ηλιακή ακτινοβολία στην Ευρώπη

Η ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να αξιοποιηθεί με διάφορους τρόπους:

1. με την άμεση παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, μέσω φωτοβολταϊκών στοιχείων ή κυψελών (PV cells). Αυτά τα συστήματα, μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια απευθείας σε ηλεκτρική έχοντας απόδοση που έχει ξεπεράσει το 15%, με υποσχόμενες προϋποθέσεις να αποκτήσουν ακόμα καλύτερη απόδοση.

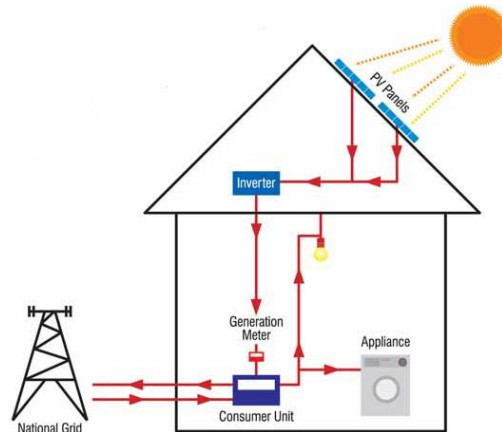


Figure 1.3: Παράδειγμα εφαρμογής φωτοβολταϊκού συστήματος σε κατοικία [4]

2. με τα παθητικά ηλιακά συστήματα, τα οποία κατά κύριο λόγο είναι δομικά στοιχεία των κτιρίων, που αξιοποιούν τους νόμους θερμότητας. Συλλέγουν την ηλιακή ενέργεια, την αποθηκεύουν σε μορφή θερμότητας και ύστερα την διανέμουν στον χώρο. Μπορούν με την βοήθεια του γυαλιού ή άλλου διαφανούς υλικού να εγκλωβίσουν την θερμότητα σε εσωτερικούς χώρους και να συνδυαστούν με αρχιτεκτονικές τεχνικές φυσικού φωτισμού, προσφέροντας λύσεις τόσο για θέρμανση τον χειμώνα, όσο και για κλιματισμό το καλοκαίρι.

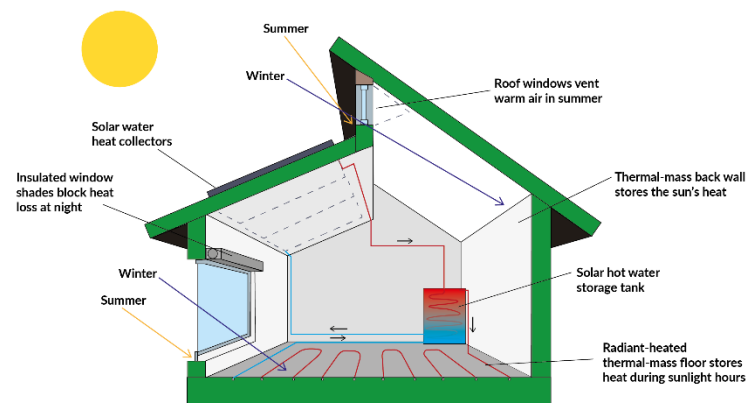


Figure 1.4: Παράδειγμα εφαρμογής παθητικού συστήματος σε κατοικία [5]

3. με τα ενεργητικά θερμικά συστήματα, με τα οποία θα ασχοληθούμε, τα οποία συλλέγουν την ακτινοβολία του ήλιου με τους ηλιακούς συλλέκτες και την μετατρέπουν σε θερμότητα. Την θερμότητα αυτήν την αποθηκεύουν σε κάποια θερμονωτική δεξαμενή.

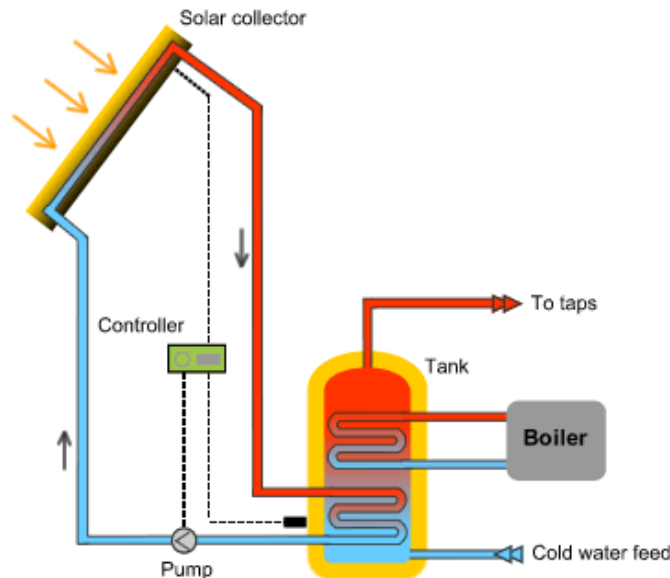


Figure 1.5: Παράδειγμα εφαρμογής ενός ενεργητικού θερμικού συστήματος σε κατοικία [6]

1.2. Ενεργητικές μέθοδοι αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας

Τα ενεργητικά θερμικά συστήματα, χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τα συστήματα αέρα και τα συστήματα υγρού. Η κυριότερη διαφορά είναι ο τρόπος με τον οποίο η ηλιακή ενέργεια συσσωρεύεται στον ηλιακό συλλέκτη. Στα συστήματα αέρα, η ενέργεια απορροφάται μέσω αέρα, ενώ στα συστήματα υγρού χρησιμοποιείται κάποιο ρευστό για την διαδικασία. Τα συστήματα αέρος αποτελούν ένα πολύ μικρό τμήμα της παγκόσμιας αγοράς (0,4% το 2014), καθώς οι συλλέκτες τους παρουσιάζουν χαμηλότερη απόδοση, δεν συνδυάζονται τόσο εύκολα με συστήματα κλιματισμού και η αποθήκευση της θερμότητας κοστίζει ακριβότερα [6] [7].

Η πιο διαδεδομένη χρήση ενεργητικών θερμικών συστημάτων είναι για θέρμανση χώρων ή νερού. Συλλέγουν την ηλιακή ακτινοβολία και την μετατρέπουν σε θερμότητα χαμηλής θερμοκρασίας. Με αυτόν τον τρόπο μπορούν να χρησιμοποιηθούν, οπουδήποτε απαιτείται θερμότητα σχετικά χαμηλής θερμοκρασιακής στάθμης, όπως:

- για θέρμανση νερού οικιακής χρήσης
- για θέρμανση ή ψύξη χώρων
- για θέρμανση πισινών
- για διάφορες βιομηχανικές διεργασίες και αγροτικές εφαρμογές (αφαλάτωση, ξήρανση προϊόντων, διαδικασίες απόσταξης)[8]

Τέλος, μια άλλη εφαρμογή που έχει μεγάλη απήχηση τα τελευταία χρόνια, είναι τα υδριβικά συστήματα, τα οποία συνδυάζουν την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης και θέρμανσης χώρων. Αυτή η χρήση των συστημάτων μπορεί να θεωρηθεί πολύ αποδοτική, ιδιαίτερα στην Ελλάδα, αν συνδυαστεί με την κατάλληλη μελέτη/κατασκευή των κτιρίων (καλή μόνωση, εκμετάλλευση των παθητικών ηλιακών ωφελειών κ.α.).

Γενικά, η απόδοση των ενεργητικών θερμικών συστημάτων έχει βελτιωθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια, και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η Ελλάδα να είναι 2η θέση στην ευρωπαϊκή κατάταξη με τις χώρες με τα περισσότερα εγκατεστημένα τετραγωνικά μέτρα ηλιακών συλλεκτών. Η εγκατεστημένη επιφάνεια κάθε είδους ηλιακών συλλεκτών φτάνει τα 316.000 τ.μ. (στοιχεία 2017) [9].

1.3. Περιγραφή λειτουργίας ηλιακού θερμικού συστήματος

Αρχικά, ο ηλιακός συλλέκτης που τοποθετείται στην οροφή του κτιρίου μετατρέπει το φως που διεισδύει στους υαλοπίνακες του (ακτινοβολία μικρού κύματος) σε θερμότητα. Ουσιαστικά ο συλλέκτης είναι ο σύνδεσμος μεταξύ του ήλιου και του τελικού χρήστη ζεστού νερού. Η θερμότητα δημιουργείται καθώς οι ακτίνες του ήλιου απορροφούνται μέσω μιας σκούρας, συνήθως μεταλλικής πλάκας, του απορροφητή. Αυτό είναι το πιο σημαντικό μέρος του συλλέκτη. Στον απορροφητή υπάρχει ένα σύστημα σωλήνων που γεμίζει με ένα μέσο μεταφοράς θερμότητας (συνήθως νερό ή αντιψυκτικό μείγμα). Αυτό το ρευστό υποδέχεται την παραγόμενη θερμότητα και μέσω σωληνώσεων συλλέγεται σε μια δεξαμενή αποθήκευσης του ζεστού νερού. Στα περισσότερα ηλιακά συστήματα θέρμανσης νερού, η θερμότητα μεταφέρεται στη συνέχεια στο

οικιακό νερό χρήσης μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας. Αυτός είναι κατά πολύ ο πιο συνηθισμένος τύπος ηλιακού θερμικού συστήματος. Στην συνέχεια, το μέσο μεταφοράς θερμότητας, ρέει μέσω ενός δευτέρου αγωγού ξανά πίσω στον συλλέκτη ενώ το θερμό νερό χρήσης ανεβαίνει προς το πάνω μέρος της δεξαμενής αποθήκευσης. Ανάλογα με την πυκνότητα και τη θερμοκρασία του, στην δεξαμενή υπάρχει ένα σύστημα στρωματοποίησης. Το νερό που έχει πιο υψηλή θερμοκρασία βρίσκεται στην κορυφή (από όπου φεύγει από τη δεξαμενή μόλις ενεργοποιούνται οι βρύσες) και το πιο κρύο βρίσκεται στον πυθμένα [1].

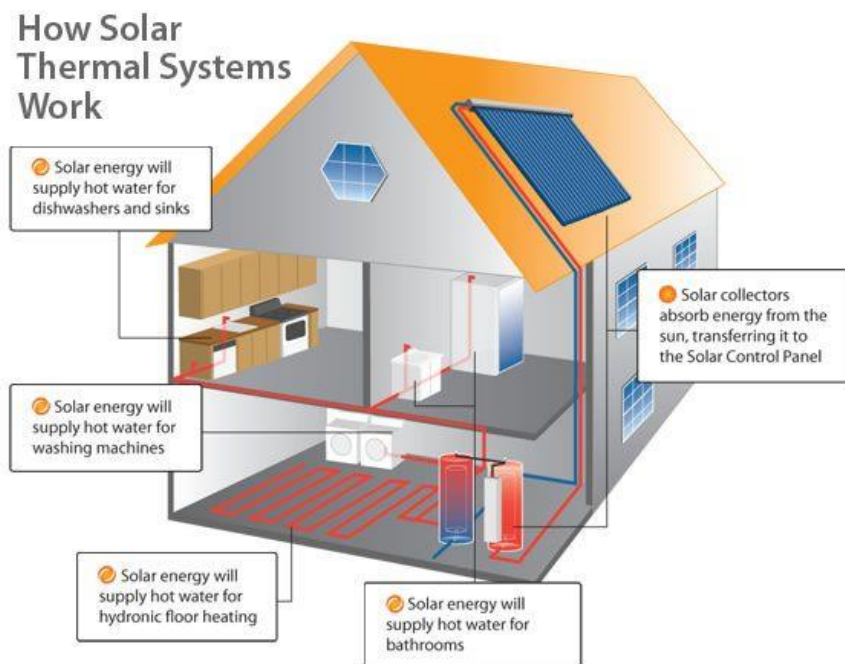


Figure 1.6: Τρόπος λειτουργίας ηλιακού θερμικού συστήματος

1.4. Είδη ηλιακών θερμικών συστημάτων

Τα ηλιακά θερμικά συστήματα, ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσης του ηλιακού συλλέκτη και της δεξαμενής αποθήκευσης, χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- τα ηλιακά συστήματα φυσικής ροής (παθητικό σύστημα)
- τα συστήματα εξαναγκασμένης ροής (ενεργό σύστημα)

Στα **ηλιακά συστήματα φυσικής ροής**, η δεξαμενή αποθήκευσης ζεστού νερού, πρέπει να βρίσκεται τοποθετημένη σε σημείο υψηλότερο από την συλλεκτική επιφάνεια. Με αυτόν τον τρόπο η κυκλοφορία του ρευστού επιτυγχάνεται λόγω της διαφοράς πίεσης που δημιουργείται στο κύκλωμα. Έτσι επιτυγχάνεται με φυσικό τρόπο χωρίς αντλία η συνεχής ροή του θερμαινόμενου μέσου από το θερμότερο σημείο (συλλέκτης) προς το ψυχρότερο (δεξαμενή νερού), μέχρι έως ότου τα δύο σημεία να αποκτήσουν παρόμοιες θερμοκρασίες. Αυτή η αρχή λειτουργίας των συστημάτων φυσικής ροής, ονομάζεται **αρχή του θερμοσίφωνου** [10].

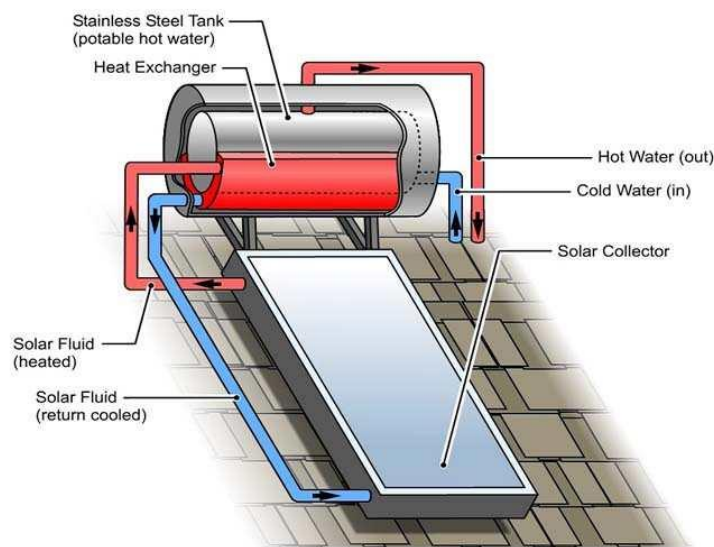


Figure 1.7: Ένα θερμικό ηλιακό σύστημα φυσικής ροής

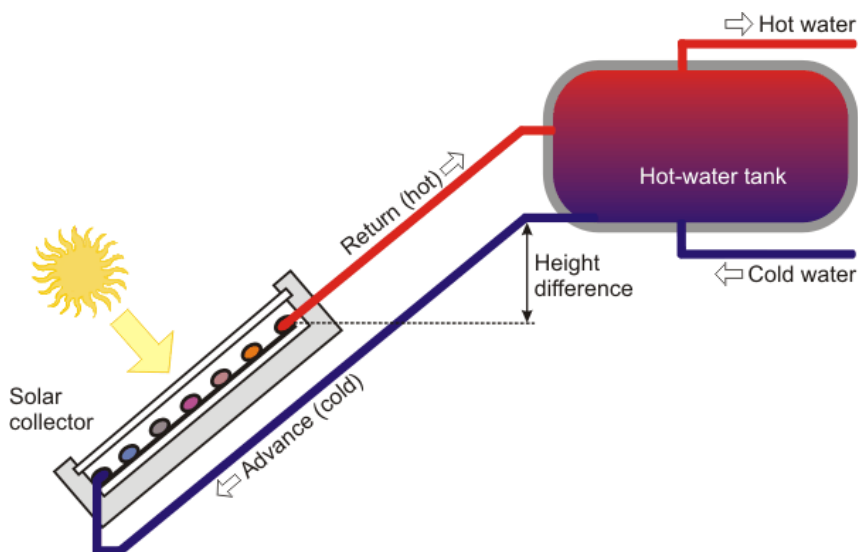


Figure 1.8: Μια τυπική διάταξη ενός θερμοσιφωνικού συστήματος [10]

Τα πιο γνωστά συστήματα φυσικής ροής είναι οι ηλιακοί θερμοσίφωνες και είναι οι πιο διαδεδομένοι στην Ελλάδα, καθώς κατασκευάζονται σε χωρητικότητες 150-300 λίτρων και μπορούν να καλύψουν τις ανάγκες μιας οικίας για ζεστό νερό χρήσης, έχοντας σχετικά μεγάλη αποδοτικότητα και γρήγορη απόσβεση.

Άλλη μια κατηγορία ηλιακών συστημάτων φυσική κυκλοφορίας, εκτός από τους ηλιακούς θερμοσίφωνες, είναι **τα ενσωματωμένα συστήματα συλλέκτη – αποθήκευσης ICS (Integrated Collector Storage)** στα οποία τα τελευταία χρόνια γίνονται πολλές έρευνες για την βελτίωση της απόδοσής τους. Αυτά τα συστήματα συνδυάζουν τον συλλέκτη με το δοχείο αποθήκευσης σε μια μονάδα. Πιο αναλυτικά, μια δεξαμενή νερού εσωκλείεται σε ένα καλά μονωμένο κουτί, και η επιφάνεια του χώρου αποθήκευσης λειτουργεί ως απορροφητής. Το κρύο νερό διοχετεύεται στο κάτω μέρος της δεξαμενής, ενώ το ζεστό νερό λαμβάνεται από την κορυφή. Το πλεονέκτημα αυτών των συστημάτων είναι ότι δεν απαιτούν σωληνώσεις, χωριστές δεξαμενές αποθήκευσης και αλλά εξαρτήματα, ενώ δεν απαιτούν και μεγάλο χώρο εγκατάστασης. Δεν γίνονται όμως ακόμα δημοφιλή, λόγω των υψηλών απωλειών θερμότητας κατά την νύχτα και όταν έχει νεφώσεις [11].

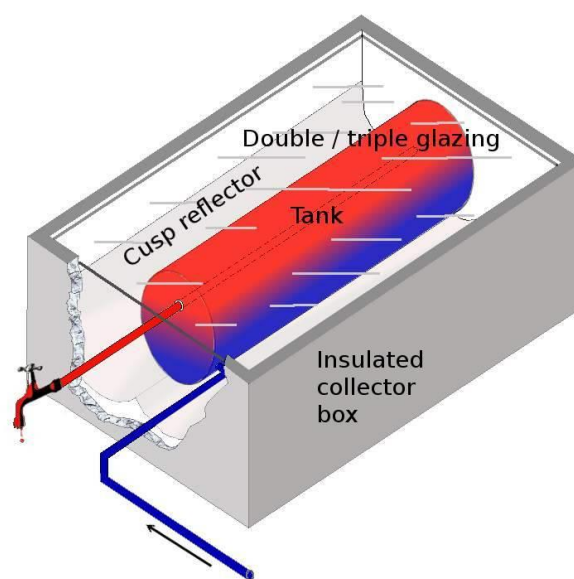


Figure 1.9: Σύστημα ICS [12]

Στα **ηλιακά συστήματα εξαναγκασμένης κυκλοφορίας**, ο ηλιακός συλλέκτης βρίσκεται συνήθως σε απόσταση από την δεξαμενή αποθήκευσης. Για την κυκλοφορία του θερμαινόμενου μέσου, χρησιμοποιούνται ηλεκτρικές αντλίες, βαλβίδες και συστήματα ελέγχου. Πολλές φορές, χρησιμοποιείται και διαφορικός θερμοστάτης, ώστε να δώσει εντολή εκκίνησης στον κυκλοφορητή για να αρχίσει η ροή του ρευστού εντός των σωληνώσεων, όταν η θερμοκρασία του νερού του συλλέκτη είναι μεγαλύτερη από την θερμοκρασία του νερού στο κάτω μέρος της δεξαμενής. Αλλιώς, η αντλία δεν ξεκινάει και δεν υπάρχει ροή.

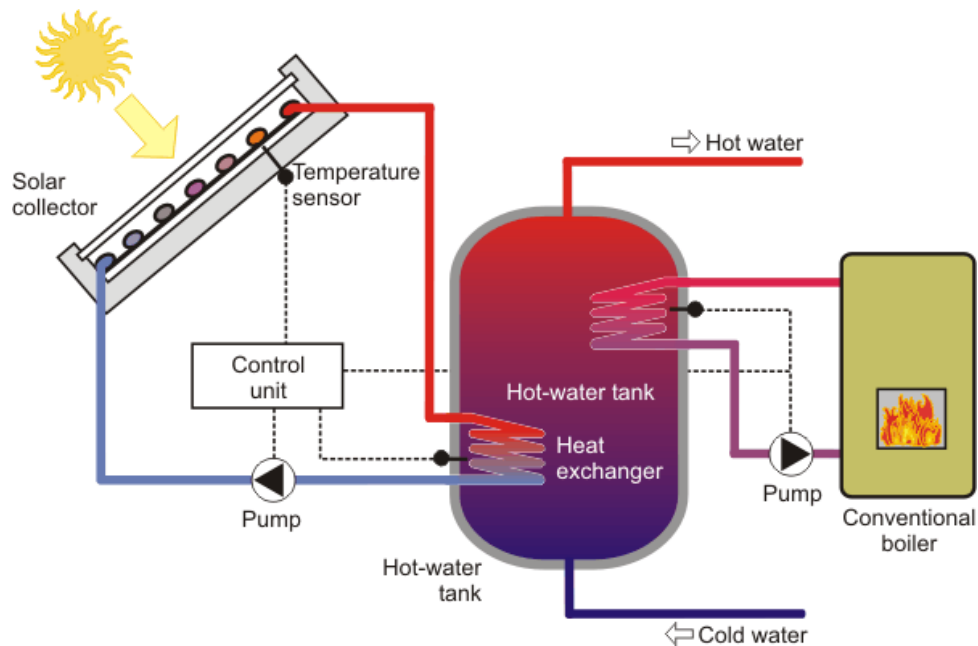


Figure 1.10: Ένα ηλιακό σύστημα εξαναγκασμένης κυκλοφορίας με εφεδρικό λέβητα θερμότητας [10]

Αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούνται τις περισσότερες φορές για κάλυψη μεγαλύτερων αναγκών σε νερό (π.χ. γυμναστήρια, πολυκατοικίες, ξενοδοχεία, μεγάλες μονοκατοικίες), είναι πλήρως αυτοματοποιημένα, απαιτούν ελάχιστη συντήρηση και όταν συνδυαστούν με εφεδρική πηγή ενέργειας καλύπτουν έως και 100% τις ανάγκες για ζεστό νερό [10].

Επίσης, ανάλογα με το κύκλωμα κυκλοφορίας του θερμαινόμενου μέσου, διακρίνονται δύο είδη ηλιακών θερμικών συστημάτων:

- τα συστήματα ανοικτού βρόγχου
- τα συστήματα κλειστού βρόγχου

Στα **συστήματα ανοικτού βρόγχου**, το θερμαινόμενο μέσο είναι το ίδιο με το νερό χρήσης. Χρησιμοποιούνται σε περιοχές με θερμό κλίμα, όπου η πιθανότητα παγετού είναι σπάνια, καθώς δεν είναι δυνατή η προσθήκη αντιψυκτικών μιγμάτων (αφού το θερμαινόμενο μέσο είναι το ίδιο το νερό χρήσης). Αυτά τα συστήματα ενδέχεται να απαιτούν και σύστημα προστασίας από τον παγετό (γίνεται ανακυκλοφορία του ζεστού νερού στην δεξαμενή όταν υπάρχουν συνθήκες παγετού), γεγονός που απαιτεί ηλεκτρική ενέργεια για να λειτουργήσει. Σε ένα σύστημα ανοικτού βρόγχου, το χρησιμοποιήσιμο ζεστό νερό κυκλοφορεί απευθείας μέσω του συστήματος θέρμανσης [7] [13].

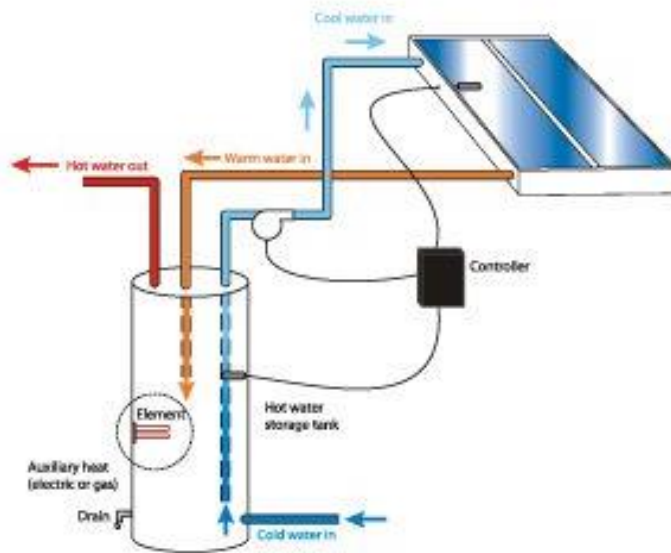


Figure 1.11: Ηλιακό σύστημα ανοικτού βρόγχου [13]

Στα **συστήματα κλειστού βρόγχου**, γίνεται έμμεση θέρμανση του νερού χρήσης μέσω εναλλάκτη θερμότητας. Το θερμαινόμενο μέσο τις περισσότερες φορές είναι ένα μείγμα αντιψυκτικού υγρού (γλυκόζη) και νερού, το οποίο το προστατεύει από τον παγετό. Το νερό του δικτύου θερμαίνεται μέσω της επαφής με την σπειροειδής σωλήνωση του ζεστού θερμαινόμενου ρευστού που έρχεται από τους ηλιακούς συλλέκτες. Ένα πλεονέκτημα του συγκεκριμένου συστήματος είναι ότι οι συλλέκτες μπορεί να τοποθετηθούν οπουδήποτε. Τα συστήματα αυτά είναι σχεδόν η μόνη λύση σε εγκαταστάσεις όπου το κλίμα της περιοχής είναι πολύ ψυχρό [14].

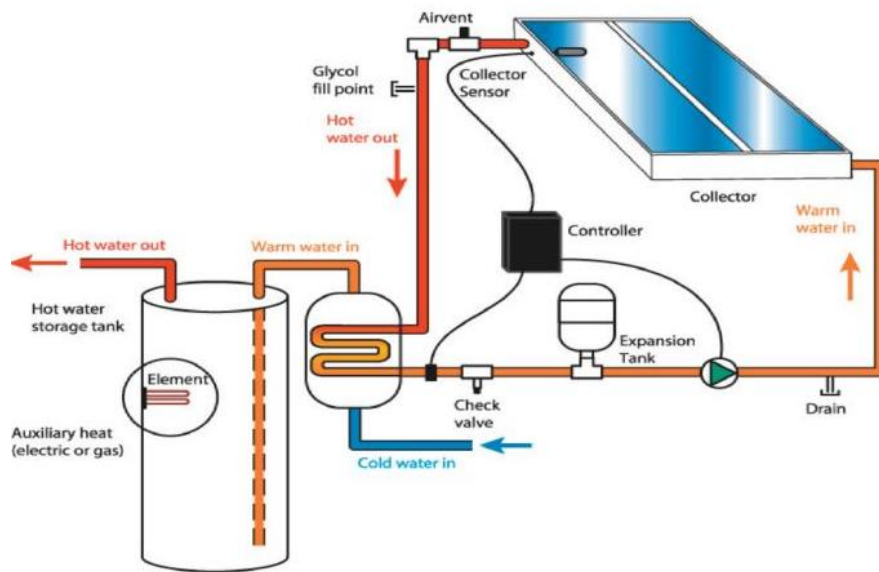


Figure 1.12: Ηλιακό σύστημα κλειστού βρόγχου [13]

Τέλος, ανάλογα με τον αριθμό ενεργειακών πηγών που μπορούν να εκμεταλλευτούν, τα ηλιακά θερμικά συστήματα, μπορούν να διακριθούν σε:

- διπλής ενέργειας
- τριπλής ενέργειας

Τα συστήματα **διπλής ενέργειας** λειτουργούν εκμεταλλευόμενα είτε την ηλιακή, είτε την ηλεκτρική ενέργεια. Για παράδειγμα, σε περίπτωση συννεφιάς όπου η ηλιακή ενέργεια δεν επαρκεί για να ζεστάνει το νερό, υπάρχει ηλεκτρική αντίσταση τοποθετημένη εντός του τμήματος αποθήκευσης, ώστε να παρέχει ζεστό νερό.

Τα συστήματα **τριπλής ενέργειας** λειτουργούν παρόμοια με τα συστήματα διπλής ενέργειας, με την διαφορά ότι περιλαμβάνουν άλλη μια παροχή. Αυτή είναι η εκμετάλλευση ζεστού νερού, ως θερμαντικό μέσο, από τον λέβητα κεντρικής θέρμανσης. Για να μπορέσει να λειτουργήσει το σύστημα τριπλής ενέργειας υποχρεωτική είναι η ύπαρξη κατάλληλης υποδομής στο κτήριο, ώστε το ηλιακό σύστημα να συνδεθεί με το λεβητοστάσιο [15].

1.5. Δεξαμενή αποθήκευσης

Σε ένα ηλιακό θερμικό σύστημα, ο ηλιακός συλλέκτης συνδέεται με μια δεξαμενή αποθήκευσης, στην οποία μεταφέρει την θερμότητα που παράγει μέσω του θερμαντικού μέσου που ρέει στις σωληνώσεις. Η δεξαμενή είναι συνήθως από χάλυβδο, με εσωτερική επίστρωση για προστασία από την διάβρωση. Η επίστρωση αποτελείται από ειδικά πλαστικά ή εποξειδικά χρώματα. Σε περίπτωση που το σύστημα είναι ακριβό, η δεξαμενή αποθήκευσης μπορεί να είναι χάλκινη ή ανοξείδωτη. Η δεξαμενή εξωτερικά έχει πολύ καλή μόνωση, συνήθως από πολυουρεθάνη ή υαλοβάμβακα, έτσι ώστε να ελαχιστοποιεί τις θερμικές απώλειες.

Επίσης, στις δεξαμενές αποθήκευσης ανάλογα με το είδος του ηλιακού συστήματος που έχουμε, υπάρχει ενσωματωμένη ηλεκτρική αντίσταση. Στα συστήματα κλειστού βρόγχου υπάρχει ενσωματωμένος εναλλάκτης ή σερπαντίνα για την κυκλοφορία του θερμαινόμενου μέσου. Στα πιο ακριβά συστήματα, η δεξαμενή είναι διπλών τοιχωμάτων (τύπος μανδύα), και στην οποία το θερμαινόμενο μέσο κυκλοφορεί ανάμεσα στα δύο τοιχώματα. Αυτό το σύστημα προσφέρει μεγαλύτερη επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας και είναι απλό στην κατασκευή.

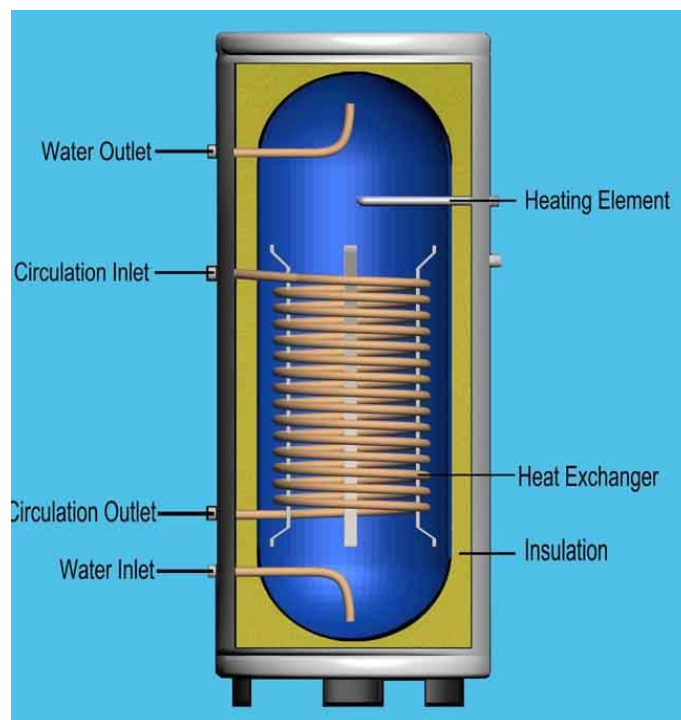


Figure 1.13: Τομή δεξαμενής νερού με σερπαντίνα [16]

Τέλος, η χωρητικότητα της δεξαμενής είναι συνάρτηση της συλλεκτικής επιφάνειας που διατίθεται. Για συνήθεις οικιακές εφαρμογές η χωρητικότητα κυμαίνεται από 150 έως 300 λίτρα και η τοποθέτηση της ως προς τον ηλιακό συλλέκτη μπορεί να γίνει οριζόντια για εξοικονόμηση χώρου ή κάθετα για καλύτερη διαστρωμάτωση του νερού [17].

1.6. Ηλιακός συλλέκτης

Ο ηλιακός συλλέκτης είναι το σημαντικότερο μέρος ενός ηλιακού θερμικού συστήματος. Ανάλογα με την θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος, οι ηλιακοί συλλέκτες χωρίζονται σε δυο μεγάλες κατηγορίες. Στις χαμηλές και μεσαίες θερμοκρασίες συνήθως χρησιμοποιούνται συλλέκτες επίπεδης γεωμετρίας, ενώ σε υψηλές θερμοκρασίες οι ηλιακοί συλλέκτες συνδυάζονται με επίπεδες και κατοπτρικές διατάξεις. Πιο συγκεκριμένα:

Για χαμηλές και μεσαίες θερμοκρασίες, χρησιμοποιούνται οι μη συγκεντρωτικοί συλλέκτες για θέρμανση ζεστού νερού χρήσης αλλά και χώρου. Πρόκειται για απλές διατάξεις, η λειτουργία των οποίων βασίζεται στην **αρχή του θερμοκηπίου**, που αναπτύσσεται στο χώρο ανάμεσα στην πλάκα απορρόφησης και τη γυάλινη επικάλυψη. Σύμφωνα με αυτήν την αρχή, η ηλιακή ακτινοβολία πέφτει πάνω στην μαύρη απορροφητική πλάκα αυξάνοντας την θερμοκρασία της πλάκας. Στην συνέχεια, η πλάκα εκπέμπει μεγάλου κύματος ακτινοβολία (θερμική ακτινοβολία), για την οποία όμως υπάρχει τζάμι που την καλύπτει και είναι σχεδόν αδιαφανές. Με αυτό τον τρόπο η μεγάλου κύματος ακτινοβολία, παγιδεύεται ανάμεσα στην πλάκα και το τζάμι με αποτέλεσμα να αυξάνεται η απόδοση του συλλέκτη. Το θερμαντικό μέσο κυκλοφορεί σε σωλήνες που είναι σε επαφή με την πλάκα στο πίσω μέρος της.

Αντίθετα, για υψηλές θερμοκρασίες χρησιμοποιούνται συγκεντρωτικά συστήματα, τα οποία αποτελούνται από πολύπλοκες διατάξεις. Στόχος τους είναι η επίτευξη υψηλών θερμοκρασιών, είτε για την παραγωγή ζεστού νερού, είτε για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Οι θερμοκρασίες που απαιτούνται για την παραγωγή ηλεκτρισμού είναι της τάξεως άνω των 500 °C. Καθώς θερμαίνεται

το ρευστό απολαβής, μετατρέπεται σε ατμό και αυτός με τη σειρά του κινεί μία τουρμπίνα η οποία είναι συνδεδεμένη με μία ηλεκτρική γεννήτρια.

Οι σημαντικότεροι παράγοντες που διασφαλίζουν την μέγιστη απόδοση του ηλιακού συλλέκτη είναι η μεγάλη απορροφητικότητα της πλάκας στην ηλιακή ακτινοβολία, ο μικρός συντελεστής εκπομπής της πλάκας στη μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία και η μεγάλη αδιαφάνεια του κρυστάλλου για τη δεύτερη. Τα υλικά που προσφέρουν την καλύτερη σχέση απόδοσης -τιμής είναι το γυαλί και επιφάνεια από αλουμίνιο ή χαλκό χρωματισμένη μαύρη (για την αύξηση του συντελεστή αγωγής της θερμότητας) [8].

1.6.1. Είδη ηλιακών συλλεκτών

Όπως είπαμε παραπάνω, οι ηλιακοί συλλέκτες χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες ανάλογα με την θερμοκρασία λειτουργίας τους, τους μη συγκεντρωτικούς και τους συγκεντρωτικούς.

- Μη συγκεντρωτικοί (Χαμηλές - Μεσαίες θερμοκρασίες)
 - Ηλιακοί συλλέκτες χωρίς κάλυμμα
 - Επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες
 - Συλλέκτες κενού
- Συγκεντρωτικοί (Υψηλές θερμοκρασίες)
 - Ηλιακοί πύργοι
 - Ηλιακοί δίσκοι
 - Συλλέκτες Φρέσνελ (Fresnel)
 - Παραβολικά κοίλα κάτοπτρα

➤ Ηλιακοί συλλέκτες χωρίς κάλυμμα

Αποτελούν την απλούστερη μορφή ηλιακών συλλεκτών. Αποτελούνται από μαύρους πλαστικούς ή μεταλλικούς σωλήνες, οι οποίοι δεν έχουν μόνωση, και μέσα τους κυκλοφορεί ένα ρευστό. Η σημαντικότερη διαφορά σε σχέση με τους υπόλοιπους επίπεδους συλλέκτες έγκειται στο γεγονός ότι αποτελούνται μόνο από τον απορροφητή.

Η λειτουργία τους είναι πολύ απλή, καθώς δεν απαιτείται επιπρόσθετος εξοπλισμός, όπως μονάδα αποθήκευσης και εναλλάκτης θερμότητας. Το νερό της δεξαμενής κυκλοφορεί μέσα στον συλλέκτη, θερμαίνεται από τον ήλιο και διοχετεύεται απευθείας ξανά στην δεξαμενή.



Figure 1.14: Ηλιακός συλλέκτης χωρίς κάλυμμα [18]

Χρησιμοποιούνται σχεδόν πάντα για κολυμβητικές δεξαμενές (πισίνες), όπου η επιθυμητή θερμοκρασία είναι σχετικά χαμηλή, αφού η μέγιστη θερμοκρασία που επιτυγχάνεται είναι 20°C πάνω από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος [19].

➤ Επίπεδοι συλλέκτες

Οι επίπεδοι συλλέκτες είναι το κυριότερο σύστημα συλλογής ηλιακής ενέργειας που χρησιμοποιείται για εφαρμογές παραγωγής ζεστού νερού και θέρμανσης χώρου. Η λειτουργία τους βασίζεται στο φαινόμενο του θερμοκηπίου που αναλύθηκε παραπάνω. Συνήθως τοποθετούνται σταθερά πάνω στο κτήριο και σε θέση (κλίση και προσανατολισμό) που εξαρτάται από τον τόπο και την εποχή του έτους, που λειτουργεί ο συλλέκτης.

Αποτελούνται από τέσσερα βασικά μέρη:

- την πλάκα συλλογής της ακτινοβολίας (πλάκα απορρόφησης), η οποία διατίθεται σε διάφορους τύπους, αλλά συνήθως έχει μαύρο χρώμα για μείωση των αντανακλάσεων.

- τους σωλήνες ροής του ρευστού, οι οποίοι είτε αποτελούν τμήμα της απορροφητικής πλάκας, είτε είναι σε επαφή και συνήθως αποτελούνται από χαλκό.
- την κάλυψη της πλάκας απορρόφησης, η οποία είναι ένα προστατευτικό κάλυμμα από γυαλί ή πλαστικό. Διακρίνεται για την μεγάλη απορροφητικότητα (90-95%), την ελάχιστη ανάκλαση στα μικρά μήκη κύματος (5-15%) και την μέγιστη ανάκλαση στα μεγαλύτερα μήκη κύματος της ηλιακής ακτινοβολίας.
- το πλαίσιο το οποίο εξασφαλίζει την μόνωση των υπόλοιπων εξαρτημάτων από τα καιρικά φαινόμενα και μειώνει τις απώλειες στην πίσω πλευρά του συλλέκτη.

Οι επίπεδοι συλλέκτες χρησιμοποιούνται για εφαρμογές με θερμοκρασιακό εύρος μέχρι και τους 150°C. Εκτός από την θέρμανση χώρων και την παραγωγή ζεστού νερού χρησιμοποιούνται και σε εφαρμογές όπως εγκαταστάσεις κλιματισμού και παραγωγής θερμότητας για βιομηχανική χρήση [21].

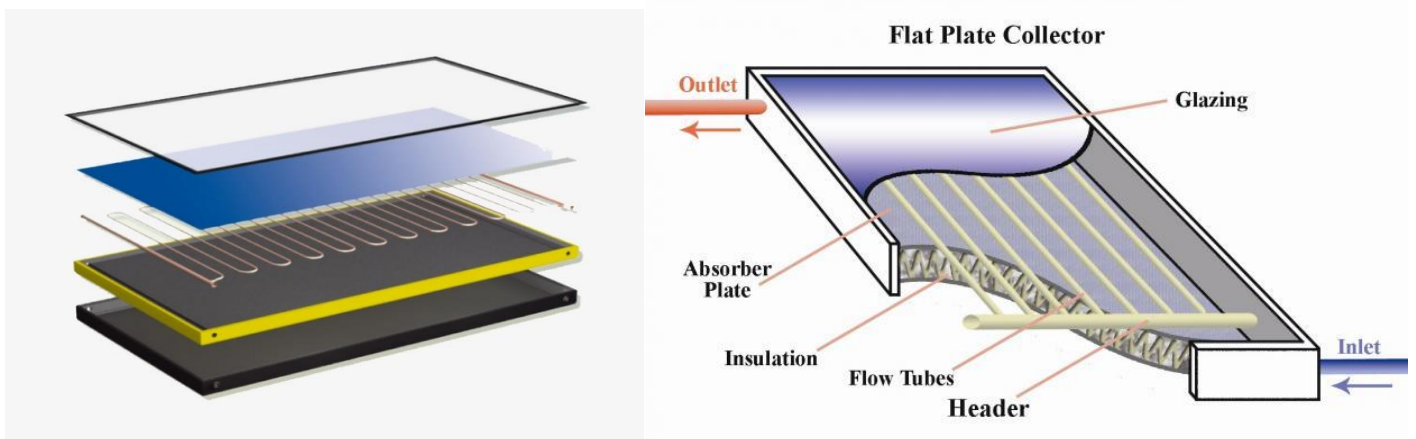


Figure 1.15: Μέρη ενός επίπεδου ηλιακού συλλέκτη [20]

Μια άλλη υποκατηγορία επίπεδων ηλιακών συλλεκτών, η οποία αναπτύσσεται τα τελευταία χρόνια, είναι οι **επιλεκτικοί επίπεδοι συλλέκτες**. Οι επιλεκτικές επιφάνειες έχουν μεγάλο βαθμό απορρόφησης και σχετικά χαμηλό βαθμό εκπομπής για την ηλιακή ακτινοβολία. Στον επιλεκτικό συλλέκτη χρησιμοποιούν βαφές, οι οποίες απορροφούν μεγάλο ποσό από την εκπίπτουσα ακτινοβολία. Αυτή η βαφή περιέχει τιτάνιο και εφαρμόζεται στη μεταλλική

επιφάνεια με μοριακό βομβαρδισμό. Η επιλεκτική βαφή προσδίδει στον συλλέκτη ένα χαρακτηριστικό γαλαζο-μπλέ χρώμα. Η χρήση αυτών των σχετικά ακριβών επιφανειών δικαιολογείται μόνο για την επίτευξη σχετικά υψηλών θερμοκρασιών (πάνω από 60 °C) και μεγαλύτερων βαθμών απόδοσης. Γενικά, ο επιλεκτικός συλλέκτης μεγιστοποιεί το ποσοστό ενέργειας που απορροφά, αλλά δεν βοηθά καθόλου στην μείωση των απωλειών [8].

➤ **Συλλέκτες κενού**

Οι συλλέκτες κενού αποτελούνται από παράλληλους γυάλινους σωλήνες, οι οποίοι είναι κολλημένοι πάνω σε έναν ή δύο κεντρικούς σωλήνες, όπου και γίνεται η ανταλλαγή θερμότητας. Οι σωλήνες βρίσκονται υπό μερικό κενό, γεγονός που επιτυγχάνει την καλύτερη μόνωση και την μείωση των απωλειών αφού η μετάδοση θερμότητας γίνεται μόνο με ακτινοβολία και όχι με συναγωγή. Κάθε σωλήνας αποτελείται συνήθως από έναν σωλήνα τύπου Dewar, ο οποίος περιέχει έναν χάλκινο θερμαντικό αυλό, στο εσωτερικό του οποίου ρέει το θερμαντικό μέσο.

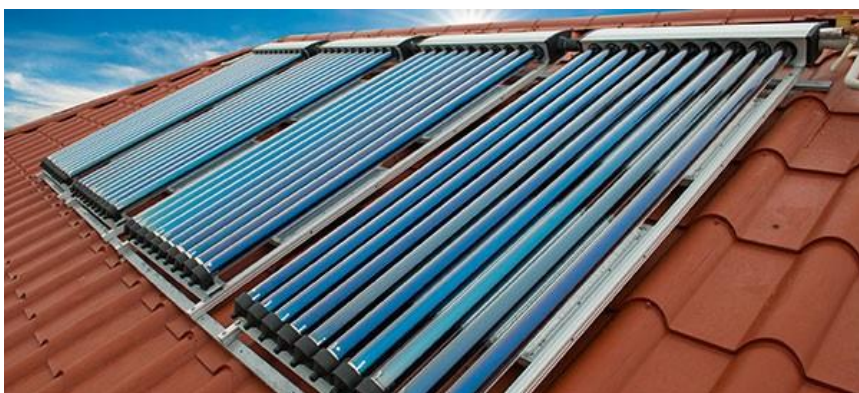


Figure 1.16: Ηλιακό σύστημα με συλλέκτες κενού

Κατά την λειτουργίας τους, η συλλεγόμενη θερμότητα μεταφέρεται μέσω φύλλων αλουμινίου σε ένα χάλκινο σωλήνα που περιέχει ένα ανόργανο μη τοξικό πτητικό υγρό (εξατμίζεται στους 25°C). Όταν ο σωλήνας αρχίζει και θερμαίνεται, το ρευστό αυτό μετατρέπεται σε υπέρθερμο ατμό, ανεβαίνει προς την πάνω πλευρά του σωλήνα που βρίσκεται μέσα στον εναλλάκτη θερμότητας και ζεσταίνει το νερό χρήσης ή το θερμαντικό μέσο. Στην συνέχεια, αφού το ρευστό έχει μεταφέρει την θερμότητα, συμπυκνώνεται και κατεβαίνει στην κάτω πλευρά του αυλού και η διαδικασία επαναλαμβάνεται.

Οι σωλήνες που βρίσκονται στους συλλέκτες κενού χωρίζονται δύο κατηγορίες, ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσης με τον κεντρικό αγωγό, αυτούς με την ξηρή και αυτούς με την υγρή σύνδεση. Για αυτούς με την ξηρή σύνδεση, ο συμπυκνωτής περιβάλλει τον συλλέκτη και παρέχει καλή θερμική αγωγή με έναν εναλλάκτη θερμότητας διπλού σωλήνα. Αυτό επιτρέπει την αλλαγή κάποιου ελαττωματικού σωλήνα χωρίς να χρειάζεται να αδειάσει όλο το κύκλωμα. Για τους σωλήνες με υγρή σύνδεση, ο συμπυκνωτής βυθίζεται στο μέσο μεταφοράς θερμότητας. Εάν πρέπει να αντικατασταθεί κάποιος σωλήνας, είναι απαραίτητο να αδειάσει μέρος του κυκλώματος [1]. Ακόμα, διακρίνονται σε συλλέκτες κενού απουσία κατοπτρικών διατάξεων και σε συλλέκτες κενού με κατοπτρικές διατάξεις. Στην δεύτερη κατηγορία, πίσω από κάθε γυάλινο σωλήνα υπάρχει ένα κάτοπτρο, το οποίο είναι κατάλληλα σχεδιασμένο ώστε όταν πέσουν πάνω του οι ηλιακές ακτίνες να ανακλαστούν και να κατευθυνθούν πάνω στον γυάλινο σωλήνα [8].

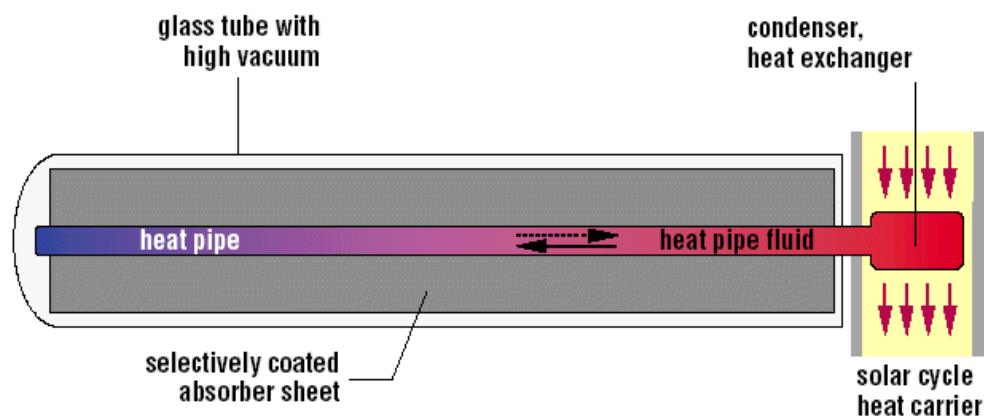


Figure 1.17: Αρχή λειτουργίας ενός συλλέκτη κενού υγρής σύνδεσης, σε κάτοψη [10]

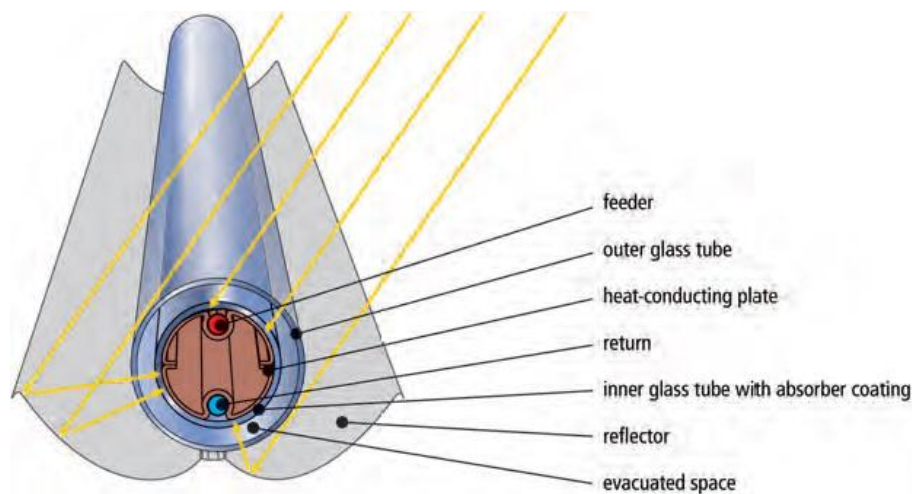


Figure 1.18: Σχεδιάγραμμα απορροφητή σε ένα συλλέκτη κενού κατοπτρικής διάταξης [1]

Το πλεονέκτημα των συλλεκτών κενού έναντι των επίπεδων συλλεκτών είναι ότι έχουν υψηλότερο βαθμό απόδοσης και μειωμένες θερμικές απώλειες χάρη στην άριστη θερμική μόνωση. Επίσης, καταλαμβάνουν μικρότερη επιφάνεια εγκατάστασης λόγω της υψηλής απόδοσης. Παρουσιάζουν όμως και μειονεκτήματα όπως το υψηλό κόστος εγκατάστασης και η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας που αναπτύσσουν, κάτι που τα κάνει ακατάλληλα για κατοικίες αφού το καλοκαίρι η θερμοκρασία στο εσωτερικό τους ξεπερνάει τους 300°C. Για αυτόν τον λόγο και χρησιμοποιούνται κυρίως σε ψυχρά κλίματα και σε εφαρμογές που απαιτούνται θερμοκρασίες νερού μεγαλύτερες των 80°C (ηλιακός κλιματισμός, βιομηχανία) [21].

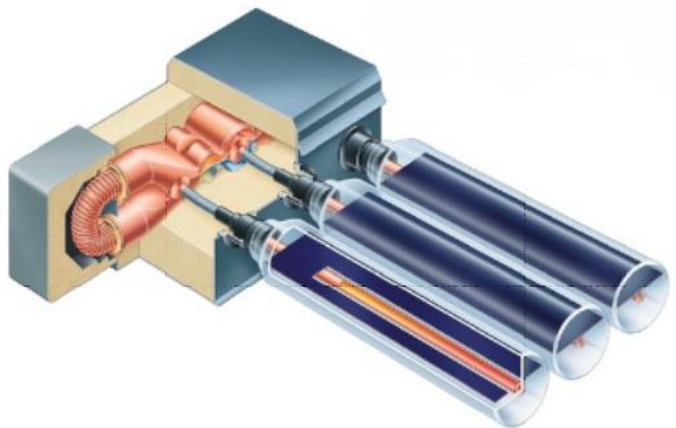
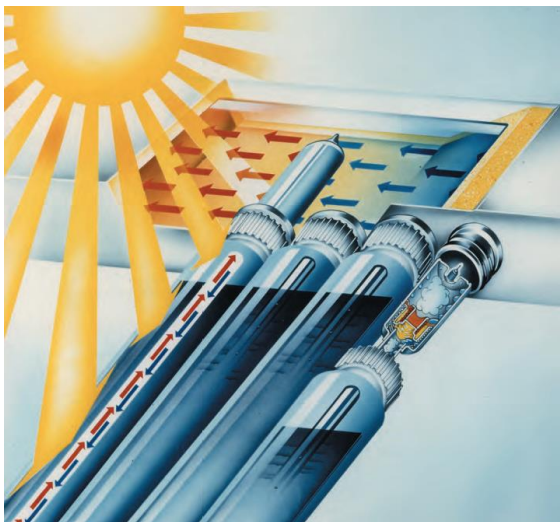


Figure 1.19 : Τομή ενός σωλήνα θερμότητας σε συλλέκτη κενού υγρής σύνδεσης (αριστερά), ξηρής σύνδεσης (δεξιά) [1]

Αναλυτικά, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα ενός ηλιακού συλλέκτη κενού είναι:

Πλεονεκτήματα

- Επιτυγχάνει υψηλή απόδοση ακόμη και με μεγάλες διαφορές θερμοκρασίας μεταξύ απορροφητή και περιβάλλοντος χώρου.
- Επιτυγχάνει υψηλή απόδοση με χαμηλή ακτινοβολία.
- Υποστηρίζει εφαρμογές θέρμανσης χώρου πολύ πιο αποτελεσματικά από ότι οι επίπεδοι συλλέκτες.
- Επιτυγχάνει πολύ υψηλές θερμοκρασίες, ικανές για παραγωγή ατμού ή κλιματισμό.

- Μπορεί να μεταφερθεί εύκολα σε οποιαδήποτε τοποθεσία για εγκατάσταση λόγω του χαμηλού βάρους του, πολλές φορές ο συλλέκτης συναρμολογείται στο χώρο εγκατάστασης.
- Περιστρέφοντας τις λωρίδες απορρόφησης (στο εργοστάσιο ή κατά τη συναρμολόγηση) μπορεί να ευθυγραμμιστεί προς τον ήλιο.
- Με τη μορφή σωλήνων άμεσης ροής, μπορεί να τοποθετηθεί οριζόντια σε επίπεδη οροφή, παρέχοντας έτσι μικρότερο φορτίο ανέμου και χαμηλότερο κόστος εγκατάστασης.

Μειονεκτήματα:

- Είναι πολύ πιο ακριβός από ότι ένας επίπεδος συλλέκτης ή ένας συλλέκτης χωρίς κάλυμμα.
- Δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εγκατάσταση σε σκεπή λόγω βάρους.
- Σε περίπτωση συστήματος θερμότητας, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για οριζόντια εγκατάσταση (η κλίση πρέπει να είναι τουλάχιστον 25°) [1].

➤ Συγκεντρωτικοί συλλέκτες

Οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες χρησιμοποιούνται για την συλλογή ηλιακής ακτινοβολίας και την μετατροπή της σε θερμότητα μέσης ή υψηλής θερμοκρασίας. Την συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας την επιτυγχάνουν χρησιμοποιώντας οπτικά συστήματα, κάτι που επιτρέπει θερμοκρασίες πολύ υψηλότερες σε σχέση με τους επίπεδους συλλέκτες.

Ένας συγκεντρωτικός ηλιακός συλλέκτης αποτελείται από το οπτικό σύστημα ή συγκεντρωτήρα και τον δέκτη. Ο συγκεντρωτήρας δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία, την συγκεντρώνει και την κατευθύνει στον δέκτη, ο οποίος με την σειρά του, την απορρόφα. Ο συγκεντρωτήρας μπορεί να είναι φακός και να διαθλά την ηλιακή ακτινοβολία ή να είναι καθρέπτης και να την ανακλά. Ακόμα υπάρχουν πολλά είδη συγκεντρωτήρων, όπως επίπεδος, παραβολικός, ή να αποτελείται από μία σειρά κινούμενων επιπέδων κατόπτρων, τα οποία με κατάλληλους μηχανισμούς παρακολουθούν την πορεία του ήλιου. Επίσης, ο δέκτης μπορεί να είναι επίπεδη, κυρτή ή κοίλη επιφάνεια.

Ακόμα, υπάρχουν πολλοί τύποι συγκεντρωτικών συλλεκτών όπως, συγκεντρωτικός συλλέκτης με επίπεδα κάτοπτρα, συγκεντρωτικός συλλέκτης με επιμήκη παραβολικά κάτοπτρα, συγκεντρωτικός συλλέκτης με παραβολοειδές κάτοπτρο, συγκεντρωτικός συλλέκτης με φακό Fresnel και ηλιακός πύργος. Κάθε ένας από αυτούς τους τύπους συλλεκτών έχει τις ιδιαιτερότητες του και τις δικές του αρχές λειτουργίας.

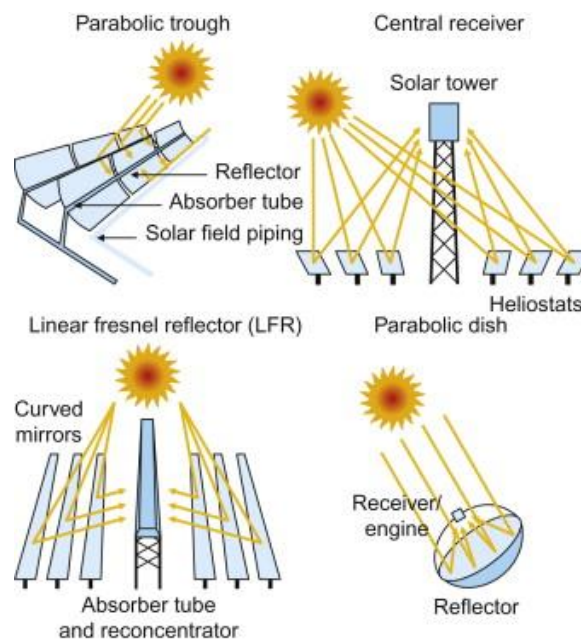


Figure 1.20: Τυπικά συγκεντρωτικά συστήματα: σύστημα με παραβολικό κάτοπτρο, ηλιακός πύργος, σύστημα με συλλέκτης τύπου Fresnel, σύστημα με παραβολικό δίσκο [22]

Τα **ηλιακά συστήματα με παραβολικούς δίσκους (CSP)**, χρησιμοποιούν παραβολικούς καθρέπτες που παρακολουθούν την πορεία του ήλιου και συγκεντρώνουν την ηλιακή ενέργεια σε έναν δέκτη όπου απορροφάται και μεταφέρεται σε μια μηχανή θερμότητας - γεννήτρια ή σε ένα υγρό μεταφοράς θερμότητας που μεταφέρεται σε μια επίγεια εγκατάσταση. Τα περισσότερα συστήματα με παραβολικούς δίσκους, περιλαμβάνουν την χρήση ενσωματωμένων κινητήρων τύπου Stirling για άμεση παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Ο κινητήρας Stirling είναι ένας κινητήρας αερίου κλειστού κυκλώματος, ο οποίος παράγει έργο με την θέρμανση και την ψύξη της ίδιας μάζας αερίου. Δεν ανταλλάσσει αέριο ούτε με την κρύα ή με την ζεστή πηγή, αλλά μόνο με

θερμότητα. Έχει δύο έμβολα, το έμβολο ισχύος, το οποίο είναι ερμητικά κλειστό και το έμβολο διαχωρισμού, το οποίο είναι πορώδες και επιτρέπει εν μέρει τη ροή αερίου μέσω αυτού.

Οι συμπυκνωτές αυτών των συστημάτων έχουν τις υψηλότερες οπτικές αποδόσεις, τις υψηλότερες αναλογίες συγκέντρωσης ακτινοβολίας και τις υψηλότερες συνολικές αποδόσεις ενεργειακής μετατροπής από όλα τα άλλα συγκεντρωτικά συστήματα. Ορισμένα πρωτότυπα συστήματα δίσκων με μηχανές Stirling έχουν δημιουργηθεί και λειτουργούν στη Σαουδική Αραβία, την Ισπανία και τις ΗΠΑ. Το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας εξακολουθεί να είναι σχετικά υψηλό σε σύγκριση με εκείνο των ηλιακών πύργων ή παραβολικών σταθμών. Ωστόσο, μια δραματική μείωση του κόστους θεωρείται πιθανή όταν τέτοια συστήματα αρχίζουν να παράγονται σε μεγάλο αριθμό [23][1].



Figure 1.21: Πάρκο με παραβολικούς δίσκους

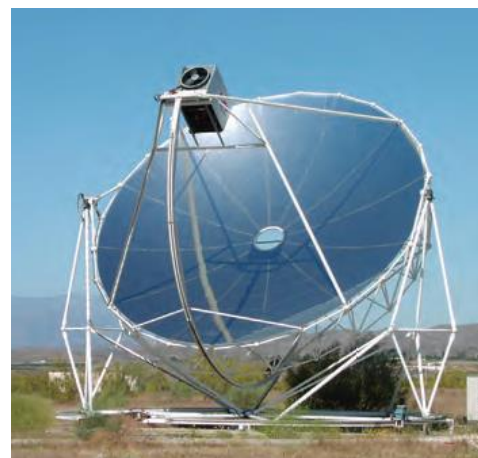


Figure 1.22: Σύστημα ηλιακού δίσκου με μηχανή Stirling [1]

Τα **παραβολικά κοίλα κάτοπτρα** χρησιμοποιούν καμπυλωτούς ανακλαστήρες για τη συγκέντρωση του ηλιακού φωτός σε έναν σωλήνα γεμάτο με ρευστό. Αυτός ο σωλήνας, που συχνά ονομάζεται σωλήνας Dewar, είναι συνήθως γεμάτος με λάδι και μεταφέρει το θερμαινόμενο ρευστό σε έναν κινητήρα όπως ένας ηλεκτροκινητήρας. Για να επιτευχθεί η μέγιστη θερμική απόδοση του συστήματος που είναι γύρω στο 60-80%, τοποθετούνται παραβολικοί ανακλαστήρες σε συστήματα παρακολούθησης για να ακολουθούν τον ήλιο. Η ένταση των συμπυκνωμένων ηλιακών ακτίνων θερμαίνει το θερμαντικό μέσο περίπου στους 400°C [24].



Figure 1.23: Πάρκο με παραβολικά κοίλα κάτοπτρα [1]

Οι **ανακλαστήρες Fresnel** μοιάζουν με τα παραβολικά κοίλα κάτοπτρα στο γεγονός ότι και σε αυτά η ηλιακή ακτινοβολία θερμαίνει ένα σωλήνα, ο οποίος περιέχει το θερμαντικό μέσο. Οι ανακλαστήρες Fresnel είναι μεγάλοι και στενοί, έχουν ελάχιστη ή καθόλου καμπυλότητα και πολλοί δέκτες συνδέονται για να σχηματίσουν μια μονάδα. Μέσα στον σωλήνα ρέει νερό ή ένα μείγμα νερού και περίπου 70% ατμός υψηλής πίεσης, και η θερμοκρασία λειτουργίας είναι περίπου 260°C. Στην έξοδο των σωλήνων, το νερό και ο ατμός διαχωρίζονται και παράγεται κεκορεσμένος ατμός για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιώντας μια μονάδα ισχύος κύκλου Rankine. Η θερμότητα μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την προθέρμανση του νερού τροφοδοσίας [25].

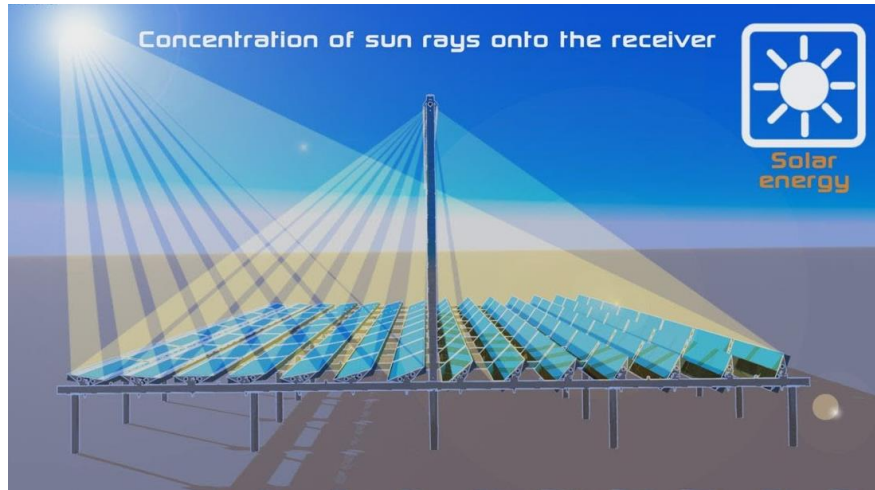


Figure 1.24: Σύστημα με ανακλαστήρες Fresnel

Ένας **ηλιακός πύργος** είναι ένα σύστημα που μετατρέπει την ενέργεια από τον Ήλιο - με τη μορφή ηλιακού φωτός - σε ηλεκτρική ενέργεια που μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τους ανθρώπους χρησιμοποιώντας μια ηλιακή εγκατάσταση μεγάλης κλίμακας. Η εγκατάσταση περιλαμβάνει μια σειρά από μεγάλους, μηχανοκίνητους καθρέφτες που εστιάζουν στην πορεία του ήλιου, γνωστούς ως ηλιοστάτες. Αυτοί εστιάζουν το φως του ήλιου σε δέκτη που βρίσκεται στην κορυφή ενός πύργου. Σε αυτόν τον δέκτη, ένα υγρό θερμαίνεται και χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού. Αυτός ο ατμός στη συνέχεια τροφοδοτεί μια συμβατική γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνει εξαιρετικά υψηλές τιμές συγκέντρωσης ηλιακής ακτινοβολίας και συνεπώς υψηλές θερμοκρασίες, για το θερμοδυναμικό κύκλο. Συγκεκριμένα, η θερμοκρασία του μέσου μεταφοράς θερμότητας, προσεγγίζει τους 560°C , ενώ πειραματικά έχει παρατηρηθεί, ότι μπορεί να αγγίξει ακόμη και τους 1.000°C . Επιπρόσθετα, όλη η διαδικασία μετατροπής της ενέργειας λαμβάνει χώρα σε ένα συγκεκριμένο σταθερό σημείο, αποφεύγοντας έτσι τις περιττές μεταφορές της θερμότητας. Μειονεκτήματα της χρήσης των ηλιακών πύργων είναι η εγκατάσταση του προϋποθέτει μεγάλο αρχικό κεφάλαιο και υψηλό κόστος συντήρησης. Επίσης, η μεγάλη έκταση των καθρεφτών και του πύργου που μπορεί να κυμαίνεται από 50 έως και περισσότερα από 100 μέτρα μπορεί να θεωρηθεί ως άσχημο θέαμα και να αλλοιώσει το τοπίο της περιοχής.



Figure 1.25: Ένας ηλιακός πύργος όπως φαίνεται από το έδαφος(αριστερά) και από ύψος (δεξιά) [26]

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα των συγκεντρωτικών συλλεκτών είναι η επίτευξη πολύ υψηλών θερμοκρασιών λειτουργίας (έως και 550°C), γεγονός που τα κάνει χρήσιμα για βιομηχανικές χρήσεις και στην παραγωγή ηλεκτρισμού. Ένα όμως σημαντικό μειονέκτημα, είναι ότι αξιοποιούν μόνο την άμεση ακτινοβολία, με αποτέλεσμα να χάνεται η ενέργεια που περιέχει η διάχυτη ακτινοβολία. Παρόλα αυτά, οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες αποτελούν νέα τεχνολογία με μεγάλες προοπτικές για την βιομηχανία [26].

1.6.2. Απόδοση ηλιακού συλλέκτη

Η ποσότητα θερμότητας που συλλέγεται από έναν ηλιακό συλλέκτη μπορεί να προβλεφθεί από την απόδοση του (η_c):

$$\eta_c = \eta_o - \frac{a_1(T_c - T_a) + a_2(T_c - T_a)^2}{G}$$

Η απόδοση του ηλιακού συλλέκτη ποικίλλει σημαντικά ανάλογα με την ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας (G), της θερμοκρασίας του αέρα περιβάλλοντος (T_a) και της μέσης θερμοκρασίας στο εσωτερικό του συλλέκτη (T_c).

Σαν μια αρχική ανάλυση, η μέση εσωτερική θερμοκρασία ρευστού του συλλέκτη θεωρείται ότι είναι ο γραμμικός μέσος όρος της θερμοκρασίας εισόδου (T_{in}) και εξόδου (T_{out}) του συλλέκτη:

$$T_c = \frac{T_{in} + T_{out}}{2}$$

Οι συντελεστές οπτικής απόδοσης (η_o) και θερμικής απώλειας (a_1 , a_2) γενικά καθορίζονται πειραματικά. Οι οπτικές και θερμικές απώλειες έχουν αμφότερες επιπτώσεις στην αποτελεσματικότητα του συλλέκτη και οι συνεισφορές τους εξαρτώνται κυρίως από τη φυσική σχεδίαση του συλλέκτη.

Ορολογία

a_1, a_2	: συντελεστές θερμικής απώλειας συλλέκτη ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)
A_c	: συνολική επιφάνεια συλλέκτη (m^2)
c_p	: ειδική θερμότητα υγρού απολαβής της θερμότητας ($kJ/kg^\circ C$)
G	: ηλιακή ακτινοβολία (W/m^2)
m	: παροχή ρευστού (kg/s)
mc_p	: ρυθμός ροής θερμότητας ($kW/^\circ C$)
Q_s	: προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια (kW)
T_a	: θερμοκρασία περιβάλλοντος ($^\circ C$)
T_c	: θερμοκρασία ηλιακού συλλέκτη ($^\circ C$)
T_{in}	: θερμοκρασία εισόδου ρευστού στον συλλέκτη ($^\circ C$)
T_{out}	: θερμοκρασία εξόδου ρευστού στον συλλέκτη ($^\circ C$)
η_c	: απόδοση ηλιακού συλλέκτη
η_o	: solar collector optical efficiency

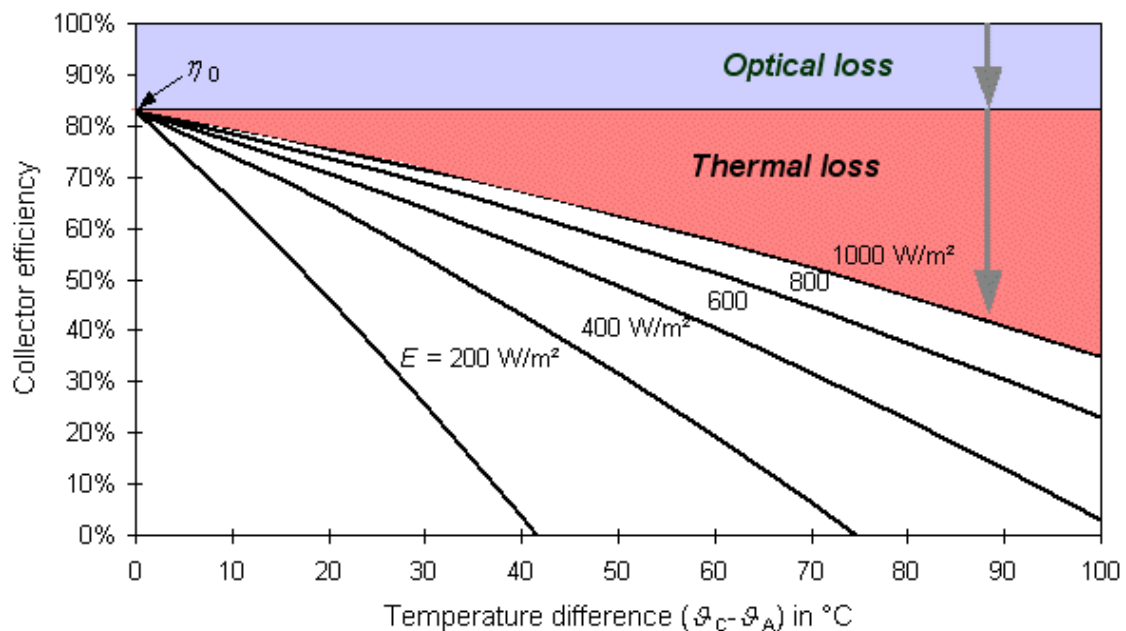


Figure 1.26: Απόδοση συλλέκτη για έναν τυπικό συλλέκτη κενού σε διάφορα επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας [10]

Μόλις γίνουν γνωστοί οι συντελεστές οπτικής απόδοσης και θερμικής απώλειας, η ηλιακή προσπίπτουσα ενέργεια (Q_s) μπορεί να προσδιοριστεί χρησιμοποιώντας την παρακάτω εξίσωση:

$$Q_s = \eta_c G A_c = \eta_o G A_c - A_c a_1 (T_c - T_a) - A_c a_2 (T_c - T_a)^2$$

όπου A_c είναι η συνολική επιφάνεια συλλέκτη (m^2).

Η θερμοκρασία του συλλέκτη (T_c) επηρεάζεται όχι μόνο από το επίπεδο της ηλιακής ακτινοβολίας, αλλά και από τον ρυθμό ροής μάζας του ρευστού που ρέει μέσω του συλλέκτη (\dot{m}). Διαισθητικά, καθώς ο ρυθμός ροής μάζας μειώνεται, η θερμοκρασία εξόδου από τον ηλιακό συλλέκτη αυξάνεται. Αυτό οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας του ηλιακού συλλέκτη, η οποία με τη σειρά της μειώνει την απόδοση του συλλέκτη. Ο ρυθμός ροής μάζας σε συνάρτηση με την αύξηση της θερμοκρασίας (ΔT) μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την παρακάτω εξίσωση:

$$\dot{m} = \frac{Q_s}{c_p \Delta T} = A_c \left(\frac{\eta_o G - a_1 (T_c - T_a) - a_2 (T_c - T_a)^2}{c_p \Delta T} \right)$$

με $\Delta T = T_{out} - T_{in}$

όπου c_p είναι η ειδική θερμότητα υγρού απολαβής της θερμότητας [27].

Όπως φαίνεται από τα παρακάτω χαρακτηριστικά απόδοσης των ηλιακών συλλεκτών, δεν υπάρχει παγκοσμίως καλύτερος ηλιακός συλλέκτης. Για παράδειγμα, σε εφαρμογές χαμηλής θερμοκρασίας σε περιοχές με υψηλή ηλιακή ακτινοβολία, ένας συλλέκτης χωρίς κάλυμμα με πλαστικό απορροφητή ανθεκτικό στην υπεριώδη ακτινοβολία μπορεί να είναι η βέλτιστη επιλογή. Από την άλλη πλευρά, υπό συνθήκες υψηλής ηλιακής ακτινοβολίας, η ηλιακή θερμική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας απαιτεί τη χρήση συγκεντρωτικών συστημάτων, όπως για παράδειγμα την χρήση σωλήνων κενού με παραβολικούς ανακλαστήρες άξονα γραμμής [21].

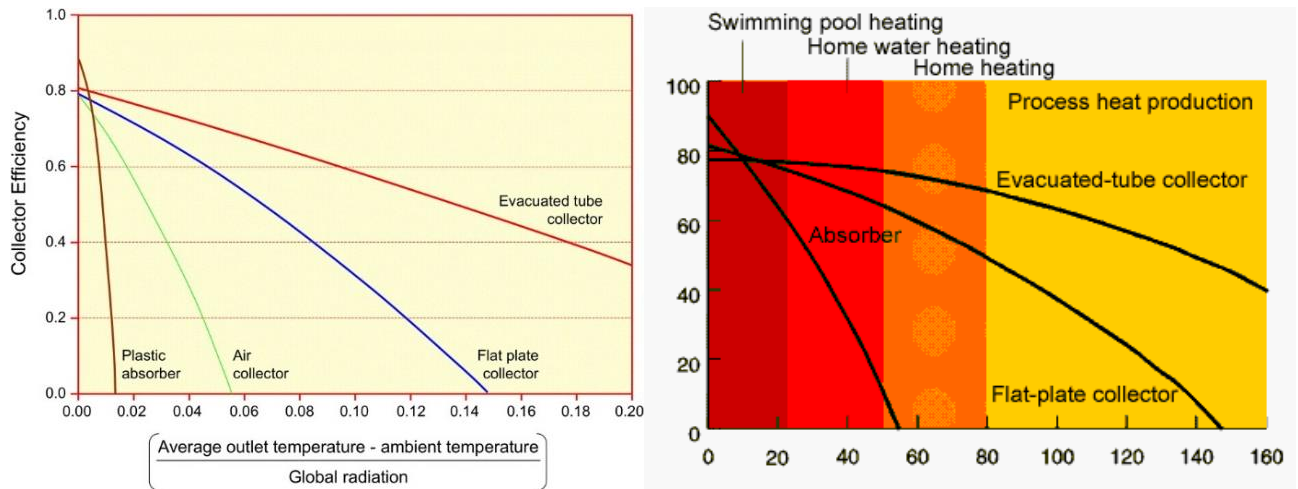


Figure 1.27: Γραφήματα με απόδοση και θερμοκρασιακό εύρος διαφόρων τύπων συλλεκτών [21]

1.6.3. Προσανατολισμός και κλίση ηλιακών συλλεκτών

Για την μεγιστοποίηση της θερμικής απόδοσης των ηλιακών συλλεκτών, απαραίτητη είναι η βέλτιστη εκμετάλλευση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.

Γενικά, ένας ηλιακός συλλέκτης αποδίδει πιο μεγάλη θερμότητα, όσο πιο κάθετα πέφτουν οι ακτίνες του ήλιου σε αυτόν. Στην πλειονότητα των ηλιοθερμικών συστημάτων επιλέγεται σταθερός προσανατολισμός, ώστε να επιτυγχάνεται μέση ετήσια γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας όσο το δυνατό πιο κοντά στις 90°. Ο καλύτερος προσανατολισμός για την τοποθέτηση των ηλιακών θερμοσιφώνων και γενικότερα των ηλιακών συλλεκτών στην Ελλάδα είναι ο νότιος, για να εκμεταλλεύονται οι συλλέκτες όσο περισσότερες ώρες ηλιοφάνειας γίνεται.

Επίσης, η κλίση του ηλιακού συλλέκτη πρέπει να είναι γύρω στις 20-50 μοίρες, ανάλογα το γεωγραφικό πλάτος. Μεγαλύτερη ή μικρότερη κλίση στον ηλιακό συλλέκτη μειώνει την απόδοση. Για την Ελλάδα και γενικότερα για όλες τις χώρες του βόρειου ημισφαιρίου, η κλίση του συλλέκτη πρέπει να είναι περίπου ίση με το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής.

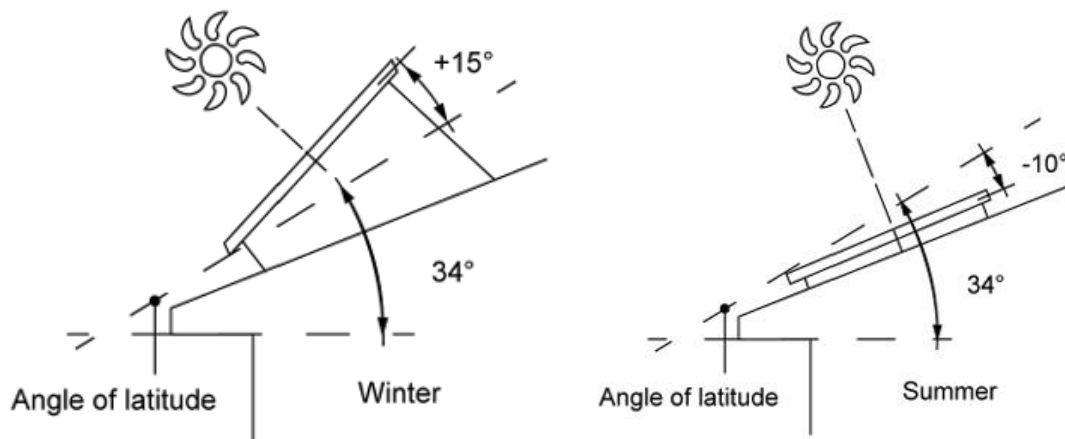


Figure 1.28: Αλλαγή της κλίσης συλλέκτη ανάλογα την εποχή [28]

Αυτή η κλίση μπορεί να μεταβληθεί ώστε να επιτευχθεί μεγιστοποίηση της εκμεταλλεύσιμης ηλιακής ενέργειας ανάλογα την περίοδο και την χρήση, με μία μικρή μείωση όμως της ετήσιας ηλιακής κάλυψης. Έτσι με την αύξηση της κλίσης ως προς το οριζόντιο επίπεδο (10° - 15° μεγαλύτερη από το γεωγραφικό πλάτος του τόπου), επιτυγχάνεται μεγιστοποίηση των ενεργειακών κερδών κατά τη χειμερινή περίοδο ενώ με τη μείωση της κλίσης (10° - 15° μικρότερη από το γεωγραφικό πλάτος του τόπου), επιτυγχάνεται μεγιστοποίηση των ενεργειακών κερδών τη καλοκαιρινή περίοδο [29].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

2.1. Εισαγωγή

Η ανάπτυξη, ο σχεδιασμός και η κατασκευή του πειραματικού ηλιακού συστήματος αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα κεφάλαια της διπλωματικής εργασίας. Η συγκεκριμένη διάταξη περιγράφεται ως ένα σύστημα βεβιασμένης κυκλοφορίας που πληροί όλες τις προϋποθέσεις για την παραγωγή ζεστού νερού για οικιακή χρήση και θέρμανση χώρου.

Ο κύριος σκοπός της εργασίας είναι η βελτιστοποίηση του συστήματος, το οποίο θα επιτευχθεί μέσω πειραματικών μετρήσεων. Τα αποτελέσματα αυτών των μετρήσεων, τα οποία θα αναλυθούν στο επόμενο κεφάλαιο, περιλαμβάνουν τον προσδιορισμό της στιγμιαίας απόδοσης του ηλιακού συλλέκτη, τον προσδιορισμό της ημερήσιας απόδοσης του συστήματος, και τέλος τις καμπύλες διακύμανσης των θερμοκρασιών του ρευστού κυκλοφορίας και του νερού αποθήκευσης της δεξαμενής.

Αρχικά, το πειραματικό ηλιακό σύστημα σχεδιάστηκε σε δυσδιάστατο και τρισδιάστατο σχέδιο, με την βοήθεια του οποίου έγινε η κατασκευή και συναρμολόγηση του τελικού συστήματος. Η 3D σχεδίαση έγινε χρησιμοποιώντας το Siemens NX12, ενώ η 2D σχεδίαση έγινε με την βοήθεια του Microsoft Excel 10.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται-αναλύονται τα σχέδια και επεξηγούνται οι αρχές λειτουργίας της διάταξης. Επίσης, γίνεται αναφορά στη μεθοδολογία και στις εργασίες συναρμολόγησης για το σχεδιασμό και την κατασκευή του ηλιακού θερμικού συστήματος. Ακόμα στο τέλος του κεφαλαίου, αναλύονται και απεικονίζονται τα εξαρτήματα και τα όργανα μέτρησης που αποτελούν την διάταξη.

2.2. Σχεδιασμός του ηλιακού συστήματος

Όπως φαίνεται από την παρακάτω διάταξη, το σύστημα αποτελείται από έναν ηλιακό συλλέκτη κενού και μια δεξαμενή αποθήκευσης η οποία έχει εναλλάκτη θερμότητας τύπου μανδύα. Η δεξαμενή αποθήκευσης τοποθετείται κάτω από το υψηλότερο σημείο του ηλιακού συλλέκτη δημιουργώντας έτσι ένα σύστημα εξαναγκασμένης κυκλοφορίας.

Για τη σωστή λειτουργία του συστήματος εξαναγκασμένης κυκλοφορίας, απαραίτητη είναι η χρήση ενός κυκλοφορητή που κινεί το θερμαντικό μέσο από την δεξαμενή στον συλλέκτη μέσω των σωλήνων. Αμέσως μετά την αντλία κυκλοφορίας, τοποθετήθηκε ένα ηλεκτρομαγνητικό ροόμετρο για τον έλεγχο και τη μέτρηση της ροής.

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η λειτουργία του κλειστού κυκλώματος συλλέκτη-δεξαμενή: Αρχικά, το θερμαντικό μέσο, που είναι μίξη γλυκόλης προπυλενίου και νερού (45% γλυκόλη, 55% νερό), με τη βοήθεια του κυκλοφορητή ρέει μέσω των σωληνώσεων μέχρι το άνω σημείο του ηλιακού συλλέκτη. Μέσω του συλλέκτη κενού, το θερμαντικό μέσο θερμαίνεται και κατεβαίνει προς την δεξαμενή νερού, εισέρχεται στο μανδύα της δεξαμενής και καθώς κινείται προς την έξοδο μεταφέρει την θερμότητα στο νερό χρήσης. Τέλος, ο ρυθμός ροής του θερμαντικού μέσου υπολογίζεται με ακρίβεια μέσω ηλεκτρομαγνητικού ροόμετρου, ενώ αλλάζοντας την ταχύτητα λειτουργίας της αντλίας μπορεί να επιτευχθεί η μέγιστη θερμοκρασία του θερμαντικού μέσου στην έξοδο από τον συλλέκτη κενού και συνεπώς ποικίλες μέγιστες θερμοκρασίες νερού.

Επίσης, κάνοντας μια περιγραφή του ανοιχτού κυκλώματος της διάταξης, το νερό χρήσης από το δίκτυο, εισέρχεται στη δεξαμενή αποθήκευσης, θερμαίνεται μέσω εναλλαγή θερμότητας από το θερμαντικό μέσο το οποίο βρίσκεται στον μανδύα της δεξαμενής και στη συνέχεια εξέρχεται από τη δεξαμενή. Για οικονομία στην ποσότητα παροχής και για να μην υπάρχει χρόνος αναμονής μέχρι την άφιξη ζεστού νερού, εγκαταστάθηκε και σύστημα ανακυκλοφορίας ζεστού νερού. Ανοίγοντας και κλείνοντας τους κατάλληλους διακόπτες, η αντλία ανακυκλοφόρησης ενεργοποιείται και το νερό που χρησιμοποιείται στη δεξαμενή επανακυκλοφορεί, επιτυγχάνοντας μια σταθερή θερμοκρασία στο εσωτερικό της.

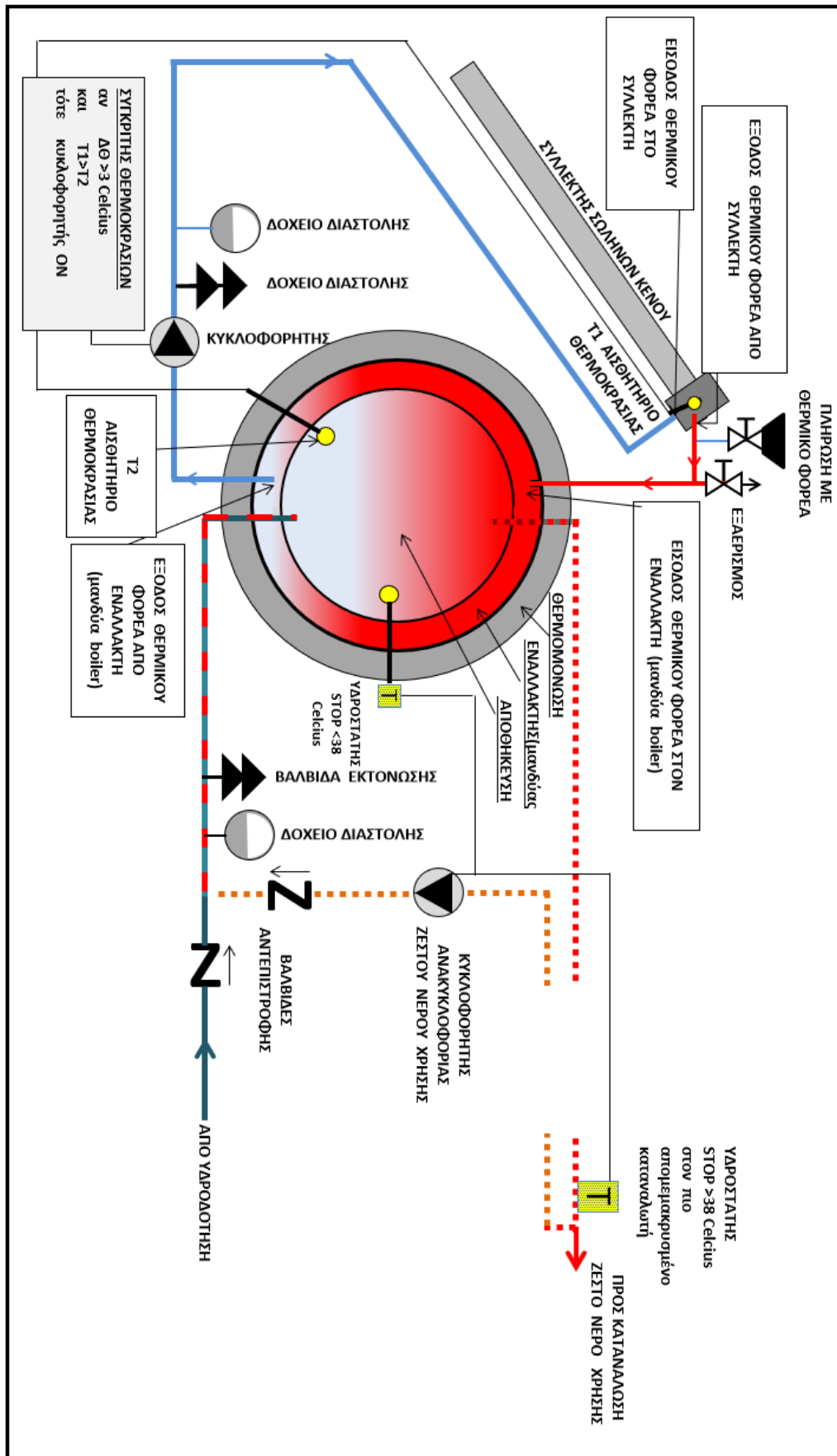


Figure 2.29: Διάγραμμα ηλιακού συστήματος εξαναγκασμένης ροής που παρουσιάζει τις υδραυλικές και ηλεκτρικές συνδέσεις σε τομή

Παρακάτω παρουσιάζεται ο τρισδιάστατος σχεδιασμός της πειραματικής διάταξης υπό διαφορετικές γωνίες:

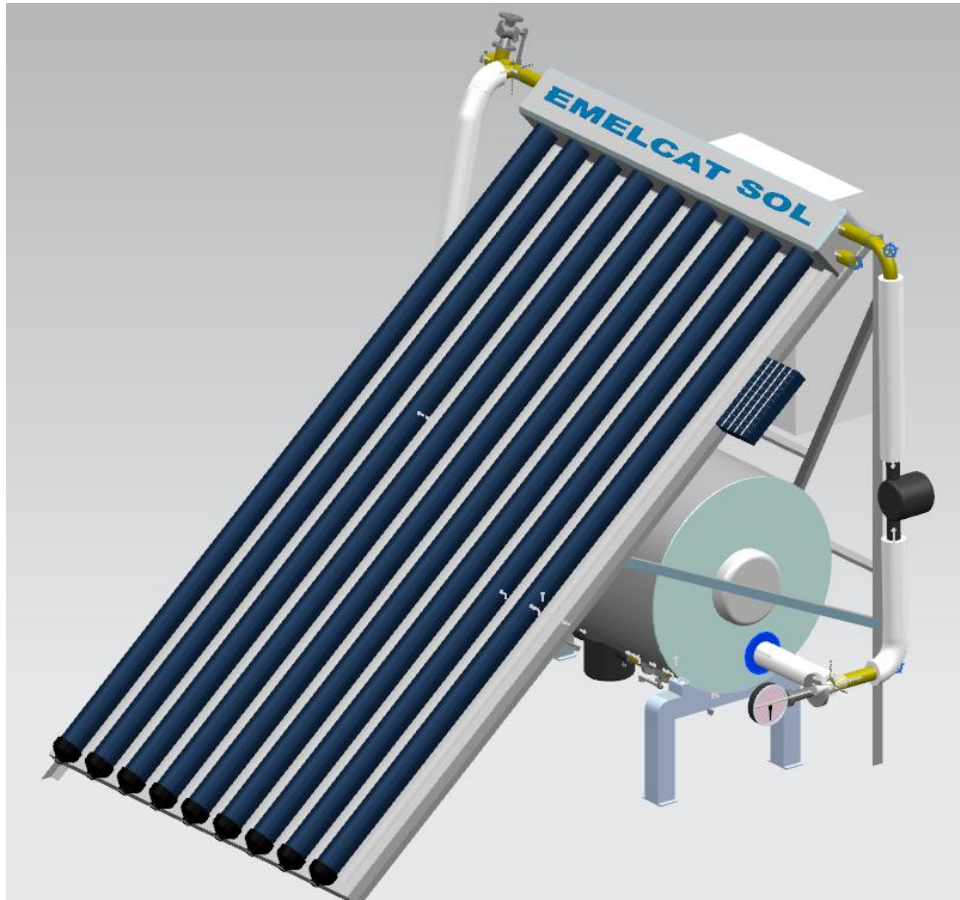


Figure 2.30: 3D σχεδιασμός πειραματικής διάταξης

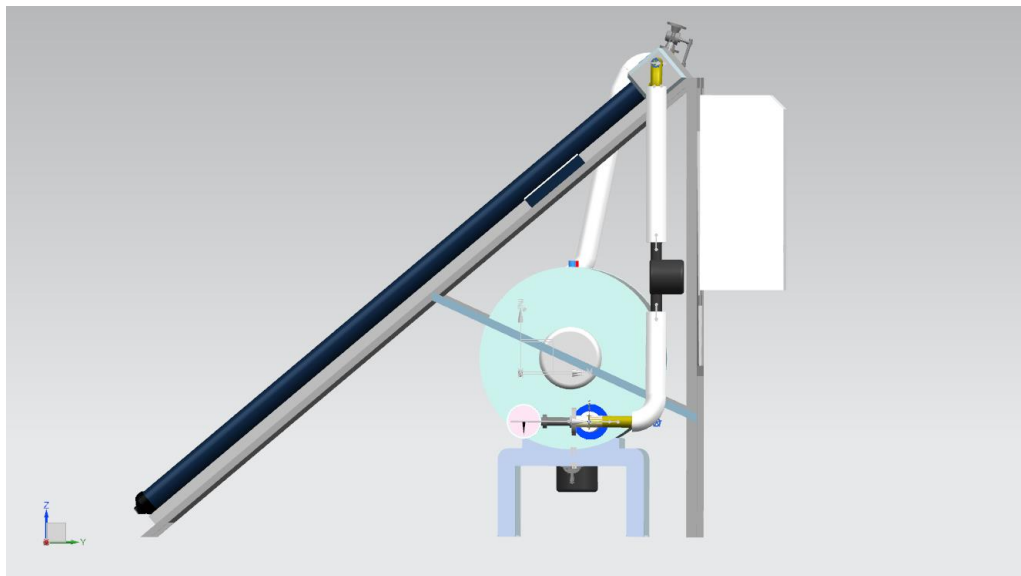


Figure 2.31: Δεξιά πλάγια όψη

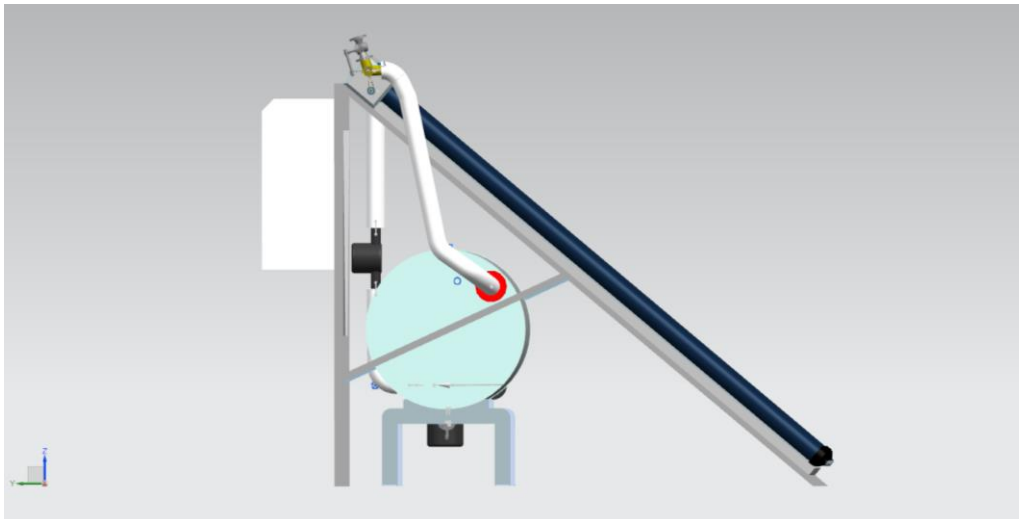


Figure 2.32: Αριστερή πλάγια όψη

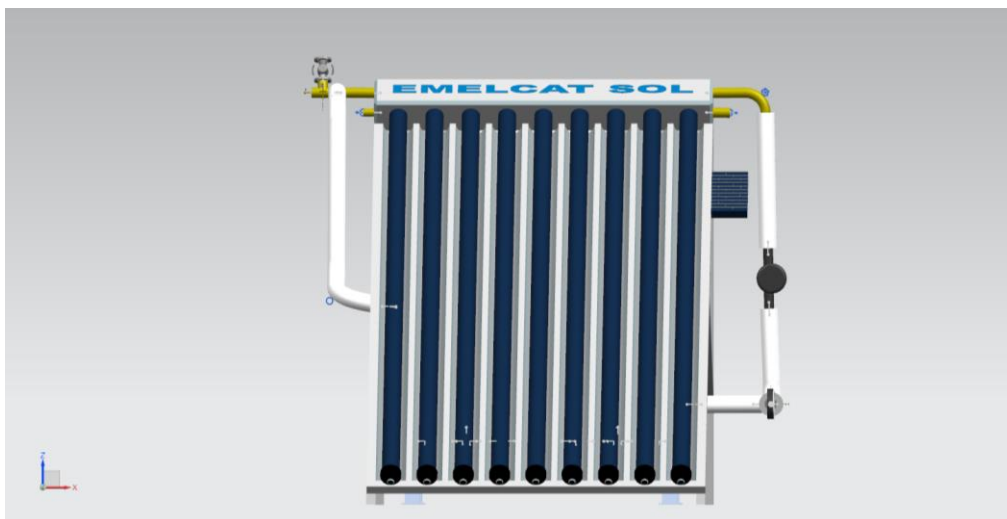


Figure 2.33: Μπροσινή όψη

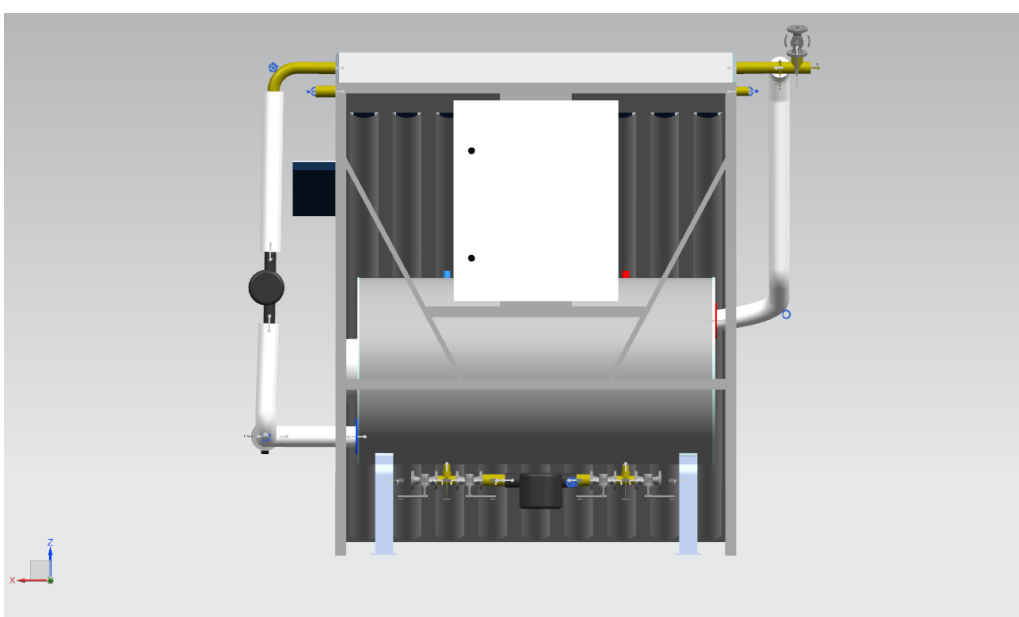


Figure 2.34: Πίσω όψη

2.3. Διαδικασία συναρμολόγησης και κατασκευής πειραματικής διάταξης

Σε αυτήν την ενότητα διεξάγεται η σταδιακή συναρμολόγηση της πειραματικής συσκευής που περιλαμβάνει: έναν ηλιακό συλλέκτη κενού και μια δεξαμενή αποθήκευσης ζεστού νερού τύπου μανδύα, 210lt της εταιρείας EmelcatSol, τις κατάλληλες σωληνώσεις, 2 διαφορετικού τύπου αντλίες, και διάφορα μετρητικά όργανα όπως μανόμετρο, ηλεκτρομαγνητικό ροόμετρο, πυρανόμετρο, ανεμόμετρο, θερμοζεύγη θερμοκρασιών. Το σύνολο των οργάνων συνδέεται σε μια συσκευή καταγραφής δεδομένων (data logger). Όλα τα παραπάνω θα μελετηθούν λεπτομερώς στην επόμενη ενότητα. Τα στάδια συναρμολόγησης παρουσιάζονται παρακάτω:

- **1^ο στάδιο:** Δημιουργία βάσης υποστήριξης, εγκατάσταση ηλιακού συλλέκτη και δεξαμενής αποθήκευσης

Αρχικά, δημιουργήθηκε μια βάση στην οποία τοποθετήθηκε ο ηλιακός συλλέκτης, ενώ η δεξαμενή αποθήκευσης τοποθετήθηκε ακριβώς κάτω από το υψηλότερο σημείο του συλλέκτη. Για να διευκολύνεται η μετακίνηση του συστήματος, κατασκευάστηκε ένα αμάξωμα Dexion, στο οποίο πάνω του είναι συνδεδεμένο ολόκληρο το σύστημα. Σε αυτό το σωστά σχεδιασμένο αμάξωμα, τοποθετήθηκαν 6 τροχοί. Οι διαστάσεις της βάσης υποστήριξης φαίνονται παρακάτω.

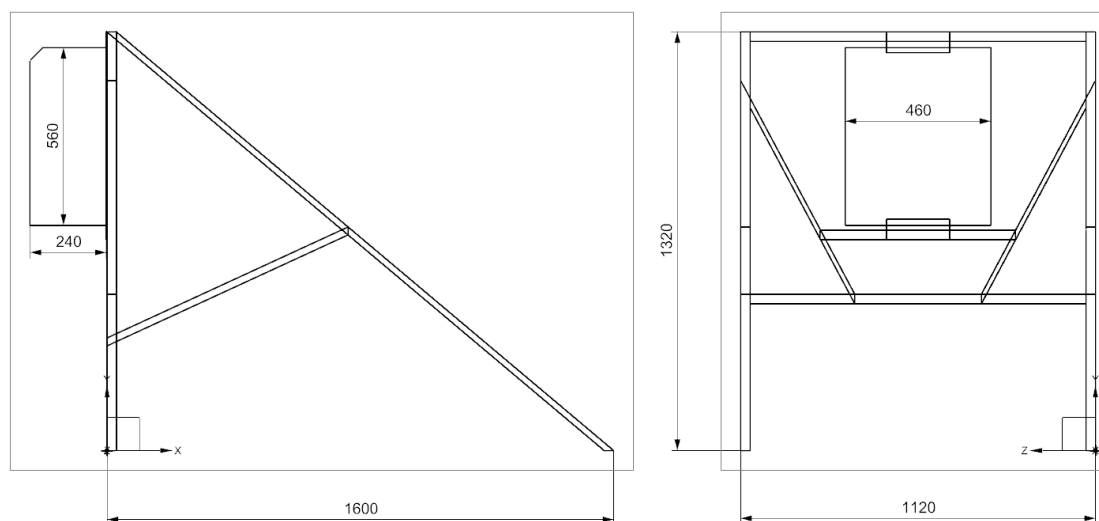


Figure 2.35: Διαστάσεις βάσης υποστήριξης (mm)

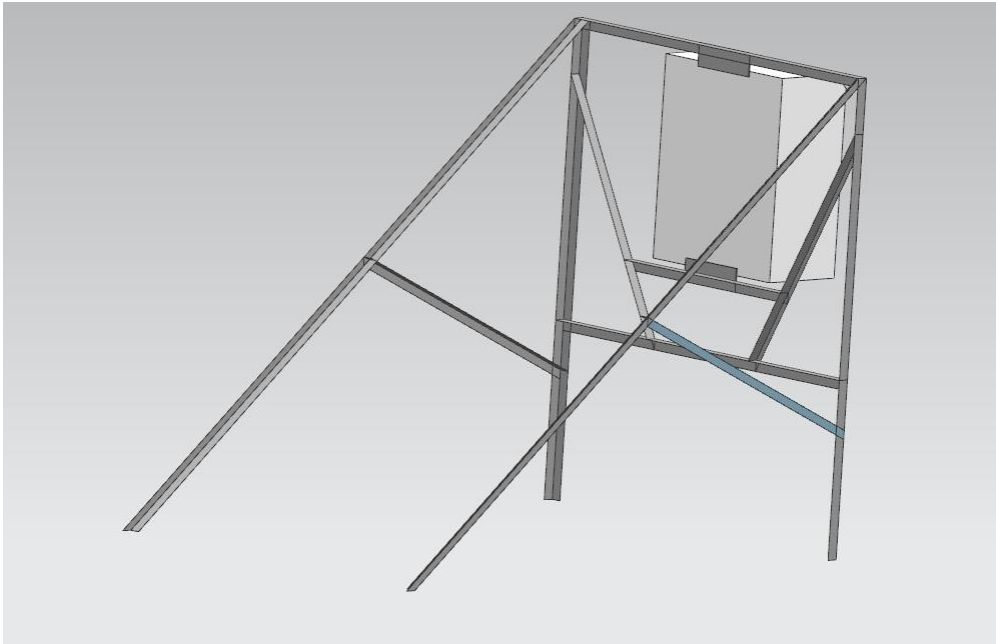


Figure 2.36: 3D σχεδιασμός βάσης υποστήριξης



Figure 2.37: Βάση υποστήριξης συστήματος



Figure 2.38: Πίσω όψη βάσης στήριξης

- **2^ο στάδιο:** Σύνδεση υδραυλικού συστήματος, εγκατάσταση αντλιών και οργάνων μέτρησης, εγκατάσταση θερμομόνωσης.

Σε αυτό το στάδιο συναρμολόγησης, αρχικά σχηματίστηκε το κλειστό κύκλωμα του συστήματος, μέσω του οποίου θα ρέει το θερμαντικό μέσο. Η ροή του ρευστού ξεκινά από τον μανδύα στο εσωτερικό της δεξαμενής, ρέει μέσω των σωλήνων στον συλλέκτη κενού και καταλήγει ξανά μέσα στον μανδύα της δεξαμενής, με τη βοήθεια του κυκλοφορητή. Επίσης, πάνω από τον κυκλοφορητή, τοποθετήθηκε ένα μικρό πλαίσιο στο οποίο εγκαταστάθηκε ένα φωτοβολταϊκό πάνελ, το οποίο έχει το ρόλο του διακόπτη για τον κυκλοφορητή.

Στην συνέχεια, το ανοικτό κύκλωμα του συστήματος συνδέθηκε στο δίκτυο παροχής νερού, με σκοπό την επίτευξη της μέγιστης διαφοράς θερμοκρασίας που μπορεί να αναπτυχθεί μεταξύ της εισόδου και της εξόδου του ρευστού απολαβής, καθώς και του ρυθμού ροής του. Ακόμα, τοποθετήθηκε μια αντλία ανακυκλοφορίας στο ανοικτό κύκλωμα του συστήματος, κάτω από την δεξαμενή αποθήκευσης, η οποία συνδέεται με την είσοδο και την έξοδο του νερού χρήσης από την δεξαμενή.

Για τη σύνδεση των παραπάνω κυκλωμάτων χρησιμοποιήθηκαν σωλήνες διαμέτρου 18*2 mm καθώς και υδραυλικά εξαρτήματα ορείχαλκου, διαστάσεων 1/2 και 3/4 της ίντσας. Επίσης, στις εισόδους και εξόδους του κλειστού και ανοικτού κυκλώματος, συνδέθηκαν μανόμετρα για τον υπολογισμό της πίεσης του ρευστού. Ακόμα, τοποθετήθηκαν αισθητήρες θερμοκρασίας μαζί με κυάθια για τη μέτρηση της θερμοκρασίας σε κάθε είσοδο - έξοδο του ηλιακού συλλέκτη και της δεξαμενής αποθήκευσης. Τέλος, στο κλειστό κύκλωμα του συλλέκτη εγκαταστάθηκε ένα ηλεκτρομαγνητικό ροόμετρο για τον ακριβή έλεγχο και τη μέτρηση της ροής του ρευστού.

Μετά την ολοκλήρωση της υδραυλικής σύνδεσης του συστήματος, εγκαταστάθηκε θερμική μόνωση σε όλους τους σωλήνες και τις συνδέσεις. Τέλος, όλα τα σημεία καλύφθηκαν με ταινία αλουμινίου για την ελαχιστοποίηση των θερμικών απωλειών.



Figure 2.39: Δημιουργία κλειστού κυκλώματος με την τοποθέτηση κυκλοφορητή και ροόμετρου

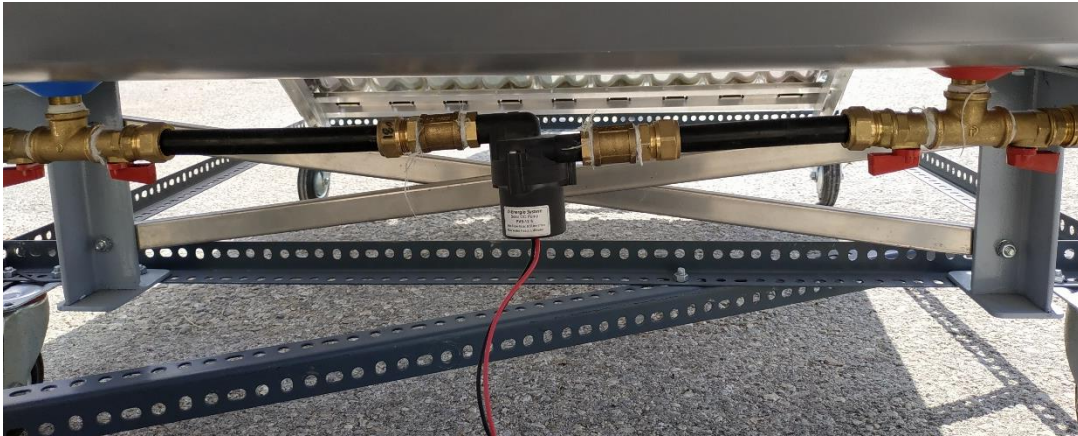


Figure 2.40: Δημιουργία ανοικτού κυκλώματος με τοποθέτηση αντλίας ανακυκλοφορίας νερού

- **3^ο στάδιο:** Ηλεκτρολογική συνδεσμολογία κυκλοφορητών, Data Logger και ηλεκτρομαγνητικού ροόμετρου

Το τελευταίο μέρος της κατασκευής αφορούσε την ηλεκτρική σύνδεση του συστήματος με μια μονάδα καταγραφής δεδομένων (Data Logger), έτσι ώστε οι μετρήσεις που γίνονται από τους αισθητήρες μέτρησης να καταγράφονται και να αποθηκεύονται σε αρχεία, με τη βοήθεια υπολογιστή. Με την καταγραφή των δεδομένων, καθίσταται δυνατή η πραγματοποίηση των πειραματικών δοκιμών του ηλιακού θερμικού συστήματος. Η συσκευή Data Logger βρίσκεται στο πίσω μέρος της βάσης υποστήριξης, προστατευόμενη μέσα σε ένα κουτί. Ακόμα, ένα CMP 3 πυρανόμετρο συνδέθηκε με το Data Logger για τον υπολογισμό της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας κατά την διεξαγωγή των μετρήσεων και ένα ανεμόμετρο για την καταγραφή της ταχύτητας του αέρα. Τέλος, όλα τα ηλεκτρολογικά όργανα και τα στοιχεία συνδέθηκαν με την παροχή ηλεκτρικού ρεύματος.



Figure 2.41: Σύνδεση πυρανόμετρου (αριστερά) και ανεμόμετρου (δεξιά) με το Data Logger

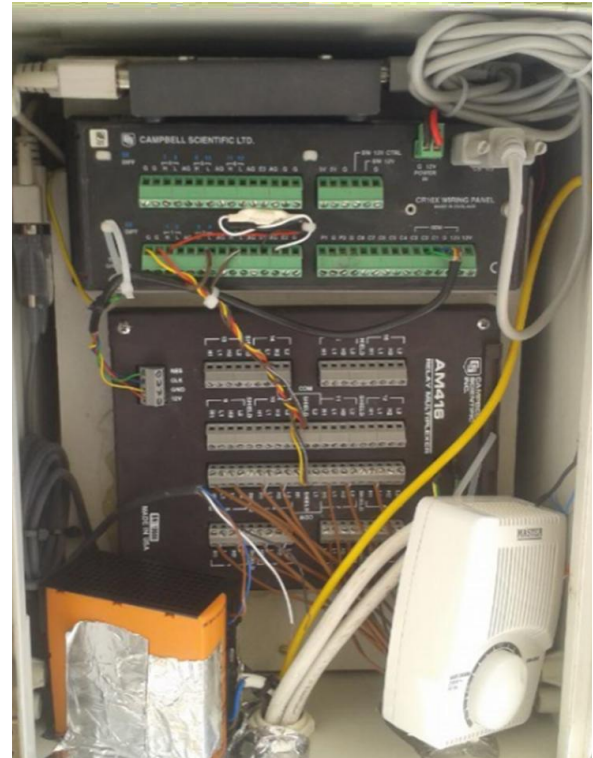


Figure 2.42: Το Data Logger, τα θερμοζεύγη, το τροφοδοτικό του Η/Μ ροόμετρου και ο ροοστάτης

Το ολοκληρωμένο σύστημα παρουσιάζεται παρακάτω:



Figure 2.43: Μπροστινή όψη του τελικού πειραματικού συστήματος



Figure 2.44: Πλάγια όψη τελικού πειραματικού συστήματος



Figure 2.45: Συνολική απεικόνιση διάταξης

2.4. Παρουσίαση οργάνων και εξοπλισμού πειραματικής συσκευής

Παρακάτω ακολουθεί ανάλυση των οργάνων μέτρησης και του εξοπλισμού που απαρτίζουν την διάταξη.

2.4.1. Ηλιακός συλλέκτης κενού EMELCATSOL

Ο συλλέκτης κενού ESOL-U, ο οποίος χρησιμοποιείται στην συγκεκριμένη διάταξη, είναι ο κατάλληλος για την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης, καλύπτοντας έως και το 80% των ετήσιων αναγκών, καθώς και για θέρμανση χώρου, παρέχοντας έως και 60% εξοικονόμηση καυσίμου.

Οι σωλήνες κενού είναι κατασκευασμένοι από BOROSILICATE 3.3 GLASS, το οποίο είναι ένα εξαιρετικά ανθεκτικό υλικό κατάλληλο σε απότομες διαφορές θερμοκρασίας, αλλά και σε εξωτερικούς παράγοντες (καιρικές συνθήκες κ.λπ.). Η επιλεκτική επικάλυψη των σωλήνων γίνεται από τρία στρώματα Cu / SS-Aln, προκειμένου να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Επίσης, ο συλλέκτης ESOL-U έχει τη δυνατότητα να εγκατασταθεί σε εύρος κλίσης 0-90, η οποία είναι μια τέλεια επιλογή καθώς καλύπτει ποικίλες ανάγκες. Τέλος, ο ανακλαστήρας τύπου CPC, κατασκευασμένος από ειδικά επεξεργασμένο αλουμίνιο, προσφέρει τη μέγιστη δυνατή χρήση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, ακόμη και σε ημέρες με χαμηλό ηλιακό φως. Προσφέρει επίσης μεγάλη διάρκεια ζωής, καθώς και ειδική αντοχή σε όλες τις περιβαλλοντικές συνθήκες [30].

Τα χαρακτηριστικά που δίνονται από τον κατασκευαστή είναι:

Τύπος μοντέλου	9 ESOL-U
Σειριακός Αριθμός	U09-100133
Ημερομηνία παραγωγής	07/2019
Εμβαδόν πλαισίου	2.3 m ²
Εμβαδόν απορροφητή	2.1 m ²
Μέγιστη πίεση λειτουργίας	1MPa

Όγκος υγρού απολαβής	4lt
Μέγιστη στιγμιαία απόδοση συλλέκτη	0.57

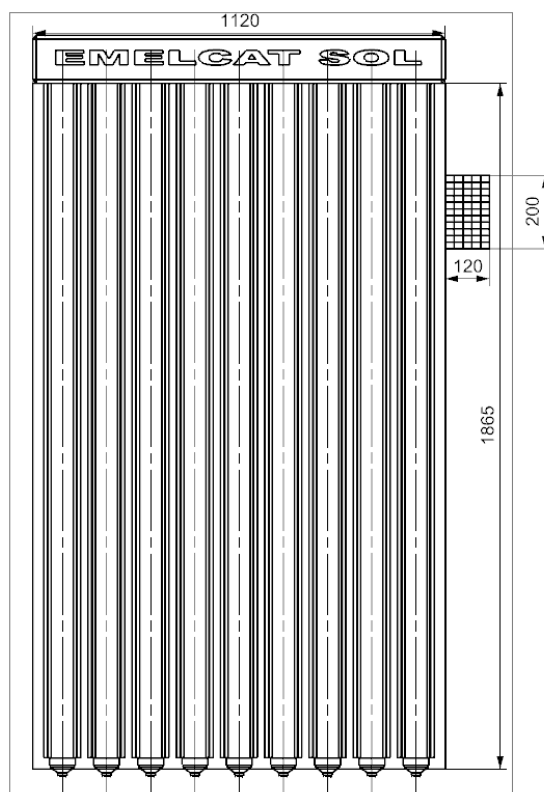


Figure 2.46: Διαστάσεις πλαισίου ηλιακού συλλέκτη(mm)



Figure 2.47: Ο ηλιακός συλλέκτης κενού

2.4.2. Δεξαμενή αποθήκευσης EMELCATSOL

Η δεξαμενή αποθήκευσης ζεστού νερού είναι τύπου μανδύα. Οι παροχές που διαθέτει επιτρέπουν την λειτουργία ενός συστήματος διπλής ενεργείας για την θέρμανση του ζεστού νερού χρήσης. Το σύστημα λειτουργεί εξ ολοκλήρου μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας. Η χωρητικότητα της δεξαμενής είναι 210 lt.

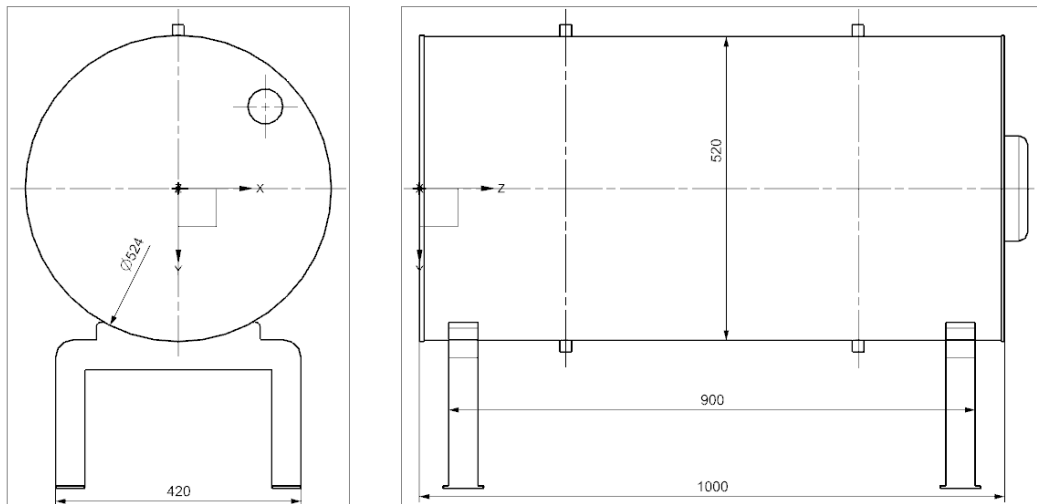


Figure 2.48: Διαστάσεις δεξαμενής αποθήκευσης (mm)



Figure 2.49: Δεξαμενή αποθήκευσης

2.4.3. Κυκλοφορητής GRUNDFOS ALPHA SOLAR 25-75 180

Ο συγκεκριμένος κυκλοφορητής έχει σχεδιαστεί για να ενσωματώνεται σε όλα τα είδη θερμικών ηλιακών συστημάτων είτε με μεταβλητή (κυμαινόμενη ροή), είτε με σταθερή ταχύτητα ροής. Η ταχύτητα μπορεί να ελεγχθεί με σήμα χαμηλής τάσης PWM (Pulse Width Modulation) μέσω ηλιακού ελεγκτή και επιτυγχάνει την βελτιστοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας που συλλέγεται και της θερμοκρασίας του συστήματος. Ως αποτέλεσμα, η κατανάλωση ισχύος της αντλίας μειώνεται σημαντικά.

Τα χαρακτηριστικά και τα πλεονεκτήματα του κυκλοφορητή είναι:

- Σταθερή ταχύτητα
- Προφίλ PWM A. Το σήμα PWM είναι μέθοδος για την παραγωγή ενός αναλογικού σήματος με τη χρήση μιας ψηφιακής πηγής
- Χαμηλός ΕΕΙ (Δείκτης ενεργειακής απόδοσης)
- Δεν χρειάζεται συντήρηση
- Χαμηλή στάθμη θορύβου
- Πολύ απλή εγκατάσταση [31].

Οι βασικές προδιαγραφές του είναι οι παρακάτω:

Τεχνικές	
Μέγιστο μανομετρικό ύψος	7.5m
Κλάση TF	110
Υλικά	
Περίβλημα αντλίας	Χυτοσίδηρος
Εγκατάσταση	
Εύρος θερμοκρασίας περιβάλλοντος	2-70 °C
Μέγιστη πίεση λειτουργίας	10 bar
Σύνδεση σωλήνα	G 1 ½
Διαβάθμιση πίεσης	PN 10

Μήκος από στόμιο σε στόμιο	180mm
Υγρό	
Αντλούμενο υγρό	Νερό
Εύρος θερμοκρασίας νερού	2-110 °C
Θερμοκρασία ρευστού κατά την διάρκεια λειτουργίας	60 °C
Πυκνότητα	983.2 kg/m ³



Figure 2.50: Κυκλοφορητής Grundfos

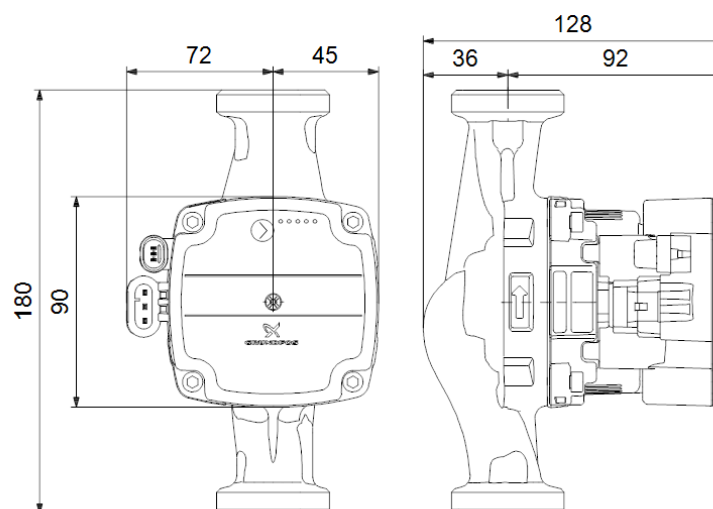


Figure 2.51: Διαστάσεις κυκλοφορητή (mm) [31]

2.4.4. Ηλιακή αντλία DC D-Energia System PV5-12 5

Στα μεγάλα κτίρια (ξενοδοχεία, πολυκατοικίες) για τη θέρμανση του νερού, εκτός από τη χρήση πετρελαίου χρησιμοποιούνται ηλιακά συστήματα ή αντλίες θερμότητας. Ωστόσο, λόγω των μεγάλων αποστάσεων της δεξαμενής αποθήκευσης ζεστού νερού από τις βρύσες, το ζεστό νερό όταν ανοίγει μια βρύση αργεί να έρθει, με αποτέλεσμα να υπάρχει σπατάλη νερού και να απαιτείται αρκετός χρόνος αναμονής. Για αυτούς τους λόγους χρησιμοποιείται σύστημα ανακυκλοφορίας ζεστού νερού. Αυτό περιλαμβάνει έναν μικρό σωλήνα διατομής (Φ16 ή 1 / 2") από την πιο απομακρυσμένη βρύση έως τη δεξαμενή αποθήκευσης. Πριν εισέλθει ο σωλήνας στη δεξαμενή, εγκαθίσταται μια μικρή αντλία (αντλία κυκλοφορίας ζεστού νερού). Αυτή η αντλία κυκλοφορεί νερό από τη μακρύτερη βρύση στη δεξαμενή έτσι ώστε ο σωλήνας ζεστού νερού από τη δεξαμενή στη βρύση να έχει πάντα ζεστό νερό.

Στην συγκεκριμένη διάταξη, η αντλία ανακυκλοφορίας, δεν χρησιμοποιείται για τους παραπάνω λόγους, αλλά κυρίως για την σωστή διαστρωμάτωση του νερού. Με λίγα λόγια, 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. Μέσω της αντλίας ανακυκλοφορίας, επιτυγχάνεται η σωστή διαστρωμάτωση του νερού της δεξαμενής και γενικά επίτευξη συνθηκών ισορροπίας στο εσωτερικό της.



Figure 2.52: Ηλιακή αντλία DC

Σε αυτήν την διάταξη, χρησιμοποιείται αντλία ανακυκλοφορίας, τα χαρακτηριστικά της οποίας είναι τα εξής:

Μέγιστος ρυθμός ροής	8.5 lt/min
Μέγιστο μανομετρικό ύψος	1.4m
Είσοδος/Έξοδος	NPT/BSP 1/2
Θερμοκρασία Ρευστού	0-110 °C
Εύρος θερμοκρασίας περιβάλλοντος	-40-70 °C
Παροχή ηλεκτρικού ρεύματος	DC παροχή, μπαταρία, ηλιακή ενέργεια
Τύπος κινητήρα	DC κινητήρας χωρίς ψήκτρες



Figure 2.53: Αντλία ανακυκλοφορίας στο σύστημα

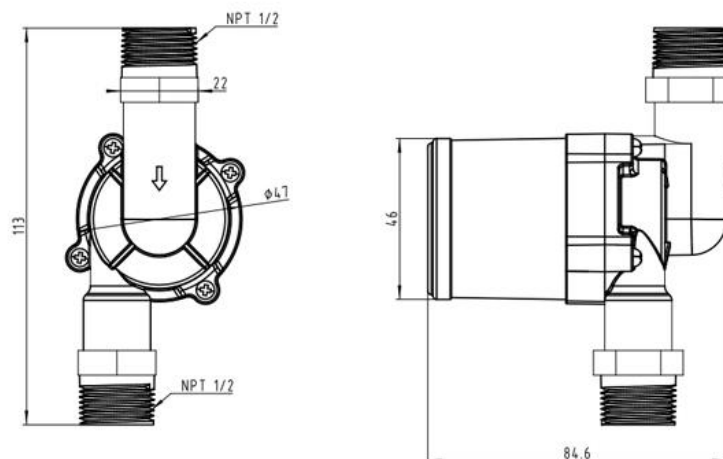


Figure 2.54: Διαστάσεις αντλίας DC (mm) [32]

2.4.5. Φωτοβολταϊκό πάνελ

Στην παρούσα διάταξη υπάρχει ένα φωτοβολταϊκό πάνελ που βρίσκεται σε ένα πλαίσιο δίπλα στον ηλιακό συλλέκτη. Οι διαστάσεις του έχουν πλάτος 120mm και μήκος 200mm.

Ο ρόλος του φωτοβολταϊκού πάνελ είναι η παροχή ρεύματος στον κυκλοφορητή, ο οποίος παρέχει την δυνατότητα απομακρυσμένης τοποθέτησης της δεξαμενής. Ουσιαστικά, έχει το ρόλο ενός διακόπτη, αφού όταν υπάρχει ηλιοφάνεια, παράγει ηλεκτρικό ρεύμα και το διαθέτει άμεσα στον κυκλοφορητή, ο οποίος με τη σειρά του δίνει κίνηση σε όλη την διάταξη. Αντιθέτως, όταν δεν υπάρχει ηλιοφάνεια και δεν απαιτείται παραγωγή ζεστού νερού, το φωτοβολταϊκό πάνελ δίνει στον κυκλοφορητή περιορισμένο ή καθόλου ηλεκτρισμό, εξοικονομώντας έτσι ενέργεια. Με αυτόν τον τρόπο το σύστημα γίνεται αυτόνομο.



Figure 2.55: Φωτοβολταϊκό πάνελ συστήματος

2.4.6. Ηλεκτρομαγνητικό ροόμετρο ifm

Στο κλειστό κύκλωμα, πάνω από τον κυκλοφορητή GRUNDFOS τοποθετήθηκε ένα ηλεκτρομαγνητικό ροόμετρο υψηλής ακρίβειας, της εταιρείας ifm, μοντέλο SM6000. Με το συγκεκριμένο ροόμετρο δίνεται η δυνατότητα λήψης δύο διαφορετικών μετρήσεων. Η πρώτη υπολογίζει την παροχή του θερμαντικού μέσου που ρέει εντός των σωληνώσεων του συλλέκτη και η δεύτερη αναφέρεται στην θερμοκρασία του ρευστού.

Ο αισθητήρας ροής βασίζεται στην αρχή της επαγωγής του Faraday. Με λίγα λόγια, το αγώγιμο ρευστό που ρέει μέσα στον αγωγό με μαγνητικό πεδίο παράγει τάση, η οποία είναι ανάλογη της ταχύτητας ή του ρυθμού ροής. Η τάση ανιχνεύεται μέσω ηλεκτροδίων και μετατρέπεται στα ηλεκτρονικά αξιολόγησης. Διατίθενται ποικίλες δυνατότητες επεξεργασίας των δεδομένων μέτρησης: αναλογική, δυαδική και παλμική έξοδος. Εξαιτίας του ευέλικτου προγραμματισμού μέσω διακόπτη μπουτόν, ο αισθητήρας ροής μπορεί να προσαρμοστεί σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας. Ο αισθητήρας τοποθετείται μέσω ενός προσαρμογέα. Ο υψηλός βαθμός προστασίας και το στιβαρό μικρό μέγεθος περίβλημα, ξεχωρίζουν τον αισθητήρα στο πεδίο.



Figure 2.56: Ηλεκτρομαγνητικό ροόμετρο ifm

Τα βασικά χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου ηλεκτρομαγνητικού ροόμετρου είναι τα παρακάτω [33]:

Εύρος μέτρησης	0,1...25 l/min
Θερμοκρασία μέσου [°C]	-10...70
Αντοχή σε πιέσεις [Mpa]	1,6
Τάση λειτουργίας [V]	18...30 DC
Κατανάλωση ρεύματος [mA]	95 (24 V)
Σύνδεση διεργασίας	βιδωτή σύνδεση G 1/2 DN15 Επίπεδη τσιμούχα

2.4.7. Πυρανόμετρο Kipp & Zonen CMP 3

Το πυρανόμετρο CMP 3 χρησιμοποιεί μια θερμοστήλη ανίχνευσης 64 συνδέσεων με μια εξαιρετικά απορροφητική και φασματικά επίπεδη μαύρη επίστρωση για να συλλάβει την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία και να την μετατρέψει σε ηλεκτρικό σήμα. Ο συγκεκριμένος ανιχνευτής προστατεύεται από υψηλής ποιότητας γυάλινο θόλο πάχους 4 mm. Η ηλεκτρική έξοδος παρέχεται ως σήμα mV και εκφράζεται σε Watt ανά τετραγωνικό μέτρο. Το CMP 3 έχει σχεδιαστεί για συνεχή εσωτερική και εξωτερική χρήση.



Figure 2.57: CMP 3 πυρανόμετρο

Το CMP 3 είναι πλήρως συμβατό με όλα τα κριτήρια προδιαγραφών απόδοσης ISO-9060. Προορίζεται για μετρήσεις ηλιακής ακτινοβολίας βραχέων κυμάτων στο φασματικό εύρος από 310 έως 2800nm. Οι μονάδες παρέχονται με ένα περιεκτικό, ανιχνεύσιμο πιστοποιητικό βαθμονόμησης.

Επίσης είναι δυνατή η τοποθέτηση του πυρανόμετρου σε ρυθμιζόμενη κλίση σε οποιαδήποτε γωνία από 0° έως 90° για να παρέχεται ακριβή ένδειξη για τη θέση και τη γωνία των σταθερών φωτοβολταϊκών πλαισίων. Η θέση και η γωνία των ηλιακών συλλεκτών παίζουν μεγάλο ρόλο στην απόδοση του ηλιακού συλλέκτη. Ένα οριζόντια τοποθετημένο πυρανόμετρο μετρά την παγκόσμια ακτινοβολία βραχέων κυμάτων από τον ήλιο και τον ουρανό με τρόπο που είναι εύκολα συγκρίσιμος με πληροφορίες που βρίσκονται σε διάφορες βάσεις δεδομένων ηλιακής ενέργειας [34].

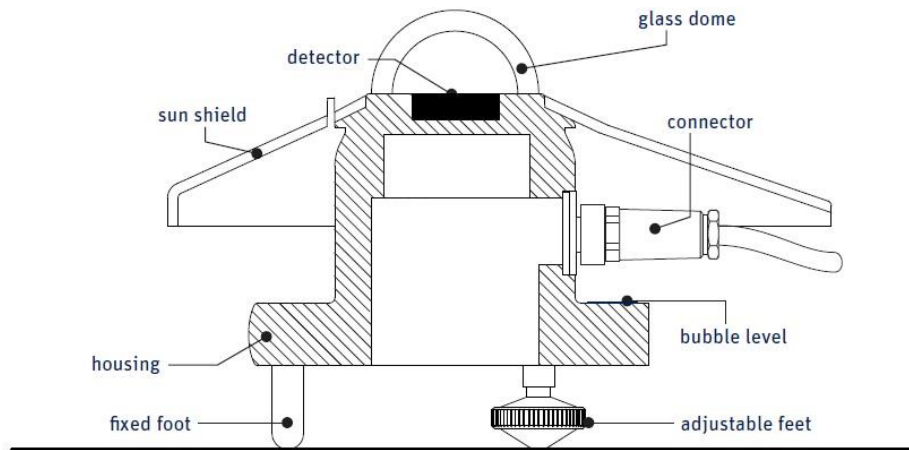


Figure 2.58: Τομή πυρανόμετρου [34]

2.4.8. Ανεμόμετρο Windspeed A100K

Το ανεμόμετρο A100K που χρησιμοποιείται στην διάταξη, είναι ειδικά κατασκευασμένο με πλαστικά, τα οποία είναι ανθεκτικά στις καιρικές συνθήκες, ιωδιούχο αλουμίνιο και ανοξείδωτο χάλυβα που του επιτρέπει να αντέχει στη συνεχή έκθεση στον καιρό, συμπεριλαμβανομένου του θαλάσσιου περιβάλλοντος, καθιστώντας το κατάλληλο για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών όπου η ακρίβεια και η ευαισθησία είναι πολύ σημαντικές.

Τα ανεμόμετρα της σειράς A100 μοιράζονται όλα την ίδια βασική κατασκευή και χρησιμοποιούν τους ίδιους ρότορες σειράς R30. Χρησιμοποιούνται διαφορετικές εσωτερικές μονάδες και εξαρτήματα για την παροχή διαφόρων σημάτων εξόδου. Η χρήση ενός άξονα με σφαίρα ακριβείας εξασφαλίζει ουσιαστικά την χαμηλή οριακή ταχύτητα και την καλή επαναληψιμότητα. Το περίγραμμα και ο μηχανικός σχεδιασμός, κοινός σε όλες τις σειρές A100, παραμένει σε μεγάλο βαθμό αμετάβλητος από την εισαγωγή του αρχικού Porton TM Anemometer, ενώ οι ηλεκτρονικές μονάδες αναπτύσσονται συνεχώς κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου και παρέχουν ένα καλά δοκιμασμένο, ανθεκτικό και αξιόπιστο προϊόν [35].



Figure 2.59: Ανεμόμετρο Windspeed A100K [35]

Βασικές προδιαγραφές ανεμόμετρου Windspeed A100K:

Μέγιστη ταχύτητα αέρα	πάνω από 75m/s
Εύρος θερμοκρασίας	-50 με 70°C
Ακρίβεια	1% των δεδομένων μεταξύ 10 and 55m/s, 2% πάνω από 55m/s

2.4.9. Θερμοζεύγη– Εμβαπτιζόμενα κυάθια

Ένα θερμοστοιχείο είναι ένας αισθητήρας κατάλληλος για μέτρηση της θερμοκρασίας. Αυτός ο αισθητήρας αποτελείται από δύο ανόμοια μεταλλικά σύρματα, τα οποία ενώνονται στο ένα άκρο και συνδέονται στο άλλο άκρο με θερμόμετρο ή άλλη συσκευή με δυνατότητα θερμομέτρησης. Όταν ρυθμιστούν σωστά, τα θερμοστοιχεία μπορούν να παρέχουν μετρήσεις με μεγάλο εύρος θερμοκρασιών.

Τα θερμοζεύγη είναι γνωστά για την ευελιξία τους ως αισθητήρες θερμοκρασίας και χρησιμοποιούνται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, από εφαρμογές βιομηχανικής χρήσης έως και βοηθητικά προγράμματα και σε κανονικές συσκευές. Τα θερμοστοιχεία τοποθετούνται σε εμβαπτιζόμενα κυάθια σε περιπτώσεις που βυθίζονται σε σωλήνες και έρχονται σε επαφή με το ρευστό που χρησιμοποιείται.

Σε αυτήν την πειραματική διάταξη χρησιμοποιείται ένα τυπικό θερμοστοιχείο τύπου T. Ο τύπος T είναι πολύ σταθερός και χρησιμοποιείται συχνά σε εφαρμογές εξαιρετικά χαμηλής θερμοκρασίας με το εύρος θερμοκρασίας να κυμαίνεται από -270°C έως 370°C .

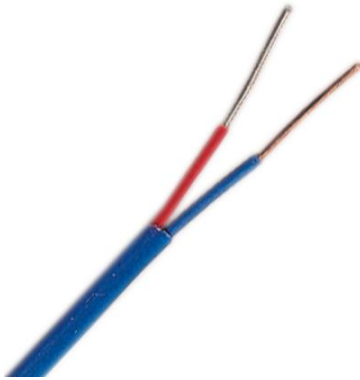


Figure 2.60: Θερμοστοιχείο τύπου T



Figure 2.61: Εμβαπτιζόμενο καύθιο

2.4.10. Βασικός υδραυλικός εξοπλισμός

• Μανόμετρο Bourdon

Οι μετρητές πίεσης Bourdon χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση σχετικής πίεσης από 0,6 έως 7,000 bar. Κατατάσσονται ως μηχανικά όργανα μέτρησης πίεσης, και λειτουργούν χωρίς να χρειάζονται καμία ηλεκτρική ισχύ.

Οι σωλήνες Bourdon είναι ακτινικά διαμορφωμένοι σωλήνες με οβάλ ή ελλειπτική διατομή. Η πίεση του μέσου μέτρησης γίνεται στο εσωτερικό του σωλήνα και παράγει μια κίνηση στο ελεύθερο άκρο του σωλήνα. Αυτή η κίνηση είναι το μέτρο της πίεσης.

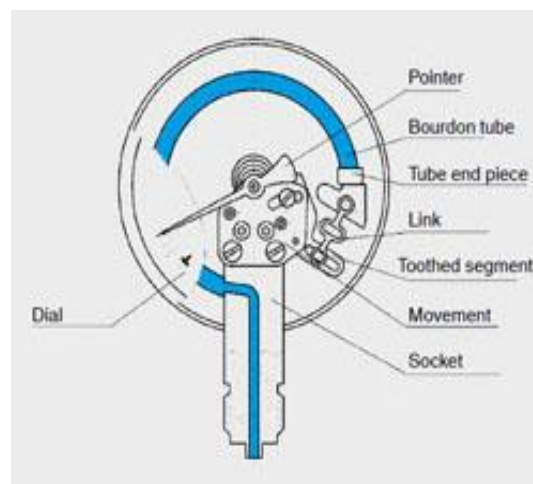


Figure 2.62: Σχεδιάγραμμα μανόμετρου τύπου Bourdon

Ο σωλήνας Bourdon σχήματος C, κατασκευασμένος υπό γωνία περίπου 250 °, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πιέσεις έως 60 bar. Για υψηλότερες πιέσεις, χρησιμοποιούνται σωλήνες Bourdon με αρκετές περιελίξεις της ίδιας γωνιακής διαμέτρου (ελικοειδείς σωλήνες) ή με σπειροειδές πηνίο στο ένα επίπεδο (σπειροειδείς σωλήνες).

Ένας τυπικός μετρητής πίεσης σωλήνα Bourdon είναι κατάλληλος για υγρά ή αέρια μέσα, τα οποία δεν είναι πολύ ιξώδη ή κρυσταλλοποιημένα. Το εύρος μέτρησης καλύπτει 0.6 έως 1.000 bar [36].



Figure 2.63: Ένα τυπικό μανόμετρο Bourdon

• Δοχείο διαστολής

Το δοχείο διαστολής είναι μια μικρή δεξαμενή, η οποία συνδέεται με το σωλήνα παροχής νερού του ηλιακού συλλέκτη. Το δοχείο διαστολής έχει σχεδιαστεί για να χειρίζεται τη θερμική διαστολή του νερού καθώς θερμαίνεται στον ηλιακό συλλέκτη, αποτρέποντας έτσι την υπερβολική πίεση του νερού. Εάν η πίεση του νερού αυξηθεί, μπορεί να προκαλέσει βλάβη στις βαλβίδες, στα υδραυλικά εξαρτήματα, στους συνδέσμους, στους σωλήνες τροφοδοσίας μέχρι και στον ίδιο τον συλλέκτη. Το διαστελλόμενο ρευστό ρέει μέσω του κυκλώματος στο δοχείο διαστολής, και έτσι ανακουφίζει το σύστημα από την περίσσεια πίεση. Το δοχείο διαστολής είναι μερικώς γεμάτο με αέρα, του οποίου η συμπιεστότητα μετριάξει το σοκ που προκαλείται από την πίεση του ρευστού και απορροφά την υπερβολική πίεση ρευστού που προκαλείται από τη θερμική διαστολή.



Figure 2.64: Κοινό δοχείο διαστολής (αριστερά), δοχείο διαστολής της διάταξης (δεξιά)

• Βαλβίδα αντεπιστροφής

Η βαλβίδα αντεπιστροφής ή ελέγχου γενικά αποτρέπει την επιστροφή του χρησιμοποιημένου νερού από το εσωτερικό του σπιτιού στην παροχή νερού όπου μπορεί να μολύνει την παροχή γλυκού νερού.

Οι βαλβίδες αντεπιστροφής είναι βαλβίδες δύο θυρών, που σημαίνει ότι έχουν δύο ανοίγματα, ένα για την είσοδο του υγρού και το άλλο για την έξοδο. Υπάρχουν διάφοροι τύποι που χρησιμοποιούνται με μεγάλη ποικιλία εφαρμογών. Αν και διατίθενται σε ένα ευρύ φάσμα μεγεθών και κόστους, οι βαλβίδες αντεπιστροφής είναι γενικά πολύ μικρές, απλές ή φθηνές. Λειτουργούν αυτόματα και οι περισσότερες δεν ελέγχονται από άτομο ή εξωτερικό έλεγχο. Κατά συνέπεια, οι περισσότερες δεν έχουν λαβή ή κάποια βάση. Τα σώματα (εξωτερικά κελύφη) των περισσότερων βαλβίδων είναι κατασκευασμένα από πλαστικό ή μέταλλο.

Μια σημαντική παράμετρος στις βαλβίδες αντεπιστροφής είναι η οριακή πίεση που είναι ουσιαστικά η ελάχιστη προκαθορισμένη πίεση μεταξύ της εισόδου και της εξόδου στην οποία μπορεί να λειτουργήσει η βαλβίδα. Συνήθως, η βαλβίδα ελέγχου έχει σχεδιαστεί και καθοριστεί για μια συγκεκριμένη οριακή πίεση.

Για την αποτροπή της ροής προς τα εμπρός ή προς τα πίσω τη νύχτα συνιστώνται βαλβίδες ελέγχου τύπου ελατηρίου. Στην περίπτωση όμως της συγκεκριμένης ηλιακής διάταξης και γενικά για ηλιακά συστήματα, συνιστώνται βαλβίδες ελέγχου τύπου ταλάντευσης, καθώς ενδέχεται να μην παράγεται αρκετή δύναμη για το άνοιγμα της βαλβίδας αντεπιστροφής τύπου ελατηρίου [14].



Figure 2.65: Βαλβίδα αντεπιστροφής

- **Βαλβίδα εκτόνωσης**

Ο πρωταρχικός σκοπός μιας βαλβίδας εκτόνωσης είναι να ανακουφίσει το σύστημα από την υπερβολική πίεση, και στην συνέχεια να ξανακλείσει και να αποτρέψει περαιτέρω ροή ρευστού μετά την αποκατάσταση των κανονικών συνθηκών. Ένας δευτερεύων σκοπός είναι να ελαχιστοποιήσει την ζημιά σε άλλα εξαρτήματα του συστήματος μέσω της λειτουργίας της [37].



Figure 2.66: Βαλβίδα εκτόνωσης

- **Βαλβίδα εξαερισμού**

Όταν το υγρό αντλείται μέσω του συστήματος κατά την εκκίνηση, ο αέρας που υπάρχει μέσα στις σωληνώσεις, λόγω της πίεσης που δέχεται από το ρευστό, ωθείται προς την βαλβίδα εξαερισμού. Ο πλωτήρας παραμένει στο κατώτερο μέρος της βαλβίδας, επιτρέποντας της να παραμένει ανοιχτή και να αδειάζει συνεχώς τον αέρα.

Μετά τον αρχικό εξαερισμό, το υγρό ρέει στον αεραγωγό. Ο πλωτήρας ανεβαίνει με το ανερχόμενο υγρό και κλείνει τη βαλβίδα. Εάν αέρας εισέρχεται στον αεραγωγό ενώ είναι κλειστή η βαλβίδα, η στάθμη του υγρού πέφτει και ο πλωτήρας χαμηλώνει, επιτρέποντας στη βαλβίδα να ανοίξει και να εκφορτώσει τον αέρα για άλλη μια φορά.



Figure 2.67: Βαλβίδα εξαερισμού

2.4.11. Σύστημα καταγραφής δεδομένων (Data Logger)

Ένα σύστημα καταγραφής δεδομένων (data logger) είναι μια ηλεκτρονική συσκευή που χρησιμοποιείται για την καταγραφή και την αποθήκευση της εξόδου ενός ή περισσότερων αισθητήρων. Γενικά, το σύστημα καταγραφής δεδομένων ερμηνεύει το ηλεκτρικό σήμα από τον αισθητήρα και το μετατρέπει σε μονάδες. Σε περιπτώσεις όπου ο αισθητήρας παρέχει ψηφιακή έξοδο, η συσκευή καταγράφει απλώς τα δεδομένα. Τα πρώτα τέτοια συστήματα ήταν καταγραφείς διαγραμμάτων που κατέγραφαν τα δεδομένα μέτρησης σε χαρτί. Με την πάροδο του χρόνου, τα συστήματα καταγραφής δεδομένων εξελίχθηκαν για την αποθήκευση δεδομένων ψηφιακά σε διάφορους τύπους

μέσων. Σήμερα, τα δεδομένα συνήθως αποθηκεύονται και μεταδίδονται συχνά μέσω ποικίλων μεθόδων τηλεμετρίας.

Ένα κοινό σύστημα καταγραφής δεδομένων αποτελείται από τα ακόλουθα μέρη και θύρες:

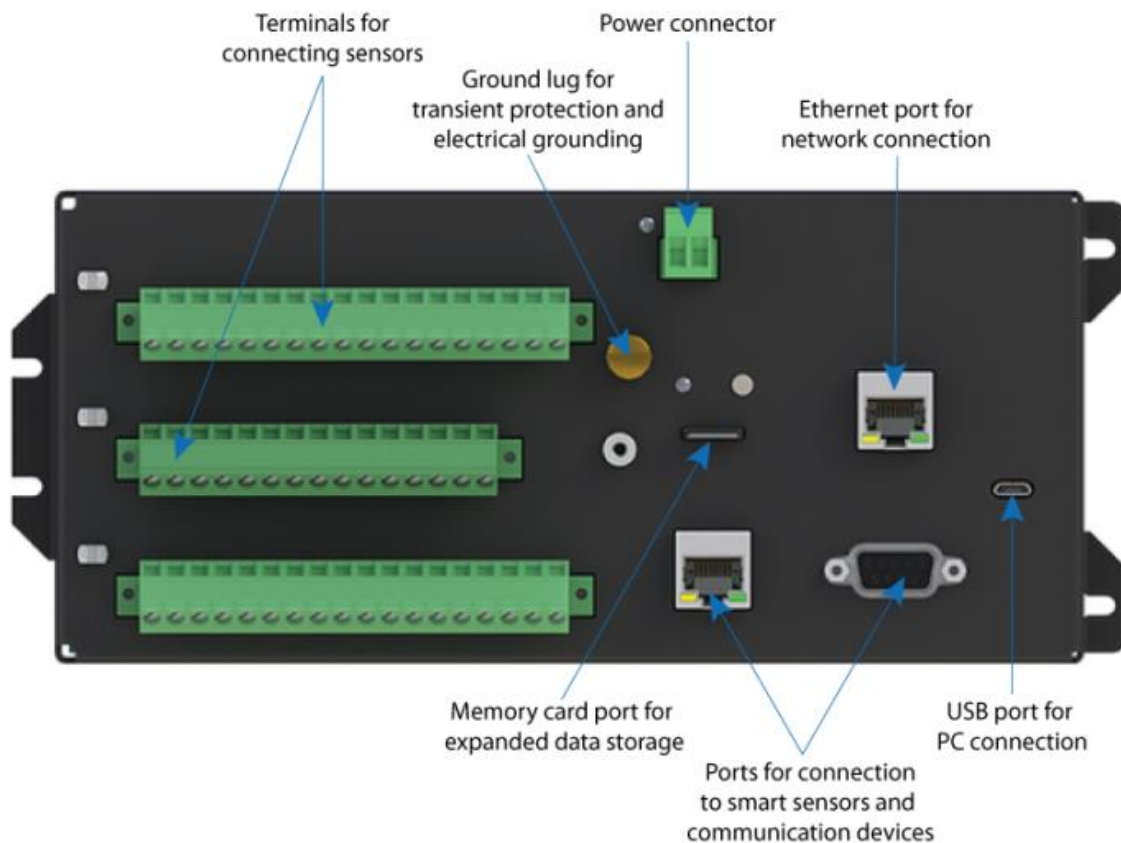


Figure 2.68: Μέρη βασικής μονάδας Data Logger [38]

Τα περισσότερα πιο σύγχρονα συστήματα καταγραφής δεδομένων γενικής χρήσης είναι ηλεκτρονικές συσκευές ελεγχόμενες από μικροεπεξεργαστές που μπορούν να συνδεθούν απευθείας με μια ποικιλία αισθητήρων και να κάνουν τα εξής:

- Παρέχει μετρήσεις σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα
- Επεξεργάζεται στατιστικά και μαθηματικά δεδομένα
- Αποθηκεύει δεδομένα
- Εισάγει μια ποικιλία τηλεπικοινωνιών
- Διαβιβάζει δεδομένα μέτρησης και υπολογίζει τιμές

Ένα σύστημα απόκτησης δεδομένων αποτελείται από ποικίλες ηλεκτρονικές συσκευές που λειτουργούν μαζί για να εξυπηρετήσουν τον

πρωταρχικό σκοπό της συλλογής δεδομένων. Το data logger γενικά θεωρείται συχνά ο εγκέφαλος του συστήματος απόκτησης δεδομένων, αλλά είναι μόνο ένα από τα συνδεδεμένα στοιχεία που χρησιμοποιούνται για την διαδικασία απόκτησης, καταγραφής, μετάδοσης και ανάλυσης των μετρήσεων [38].

Τα συστήματα καταγραφής δεδομένων μπορούν να συνδεθούν με μια ποικιλία αισθητήρων κατάλληλων για τη μέτρηση της έντασης της συνολικής πυκνότητας της ηλιακής ακτινοβολίας, της φασματικής κατανομής της (φασματικά όργανα), της ταχύτητας και της κατεύθυνσης του ανέμου, της υγρασίας (απόλυτη και σχετική), της βαρύτητας, του περιβάλλοντος θερμοκρασία, κ.λπ. Ταυτόχρονα, τα συστήματα έχουν τη δυνατότητα να λαμβάνουν εισόδους (σήματα) για τη μέτρηση των παλμών, τη διαφορά στο δυναμικό της έντασης του ρεύματος, τη θερμοκρασία (χώροι, επιφάνειες, υγρά), πίεση κ.λπ. Το κοινό χαρακτηριστικό όλων των πιθανών τύπων Data Logger είναι ο περιορισμός της τάσης εισόδου σήματος, η οποία ποικίλλει ανάλογα με την εφαρμογή.

Επιπλέον, όλα αυτά τα ηλεκτρονικά συστήματα έχουν τη δυνατότητα να υποστηρίζουν κατάλληλο λογισμικό τόσο για μετρήσεις ανάγνωσης όσο και για αποθήκευση και επεξεργασία των δεδομένων. Τέλος, ένα σημαντικό πλεονέκτημα των Data Logger μπορεί να θεωρηθεί η ικανότητα προγραμματισμού λήψης του κατάλληλου τύπου και της συχνότητας των μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο.

Για την εφαρμογή του συγκεκριμένου πειράματος, επιλέχθηκε ένα ηλεκτρονικό σύστημα καταγραφής δεδομένων από την Campbell Scientific. Το συγκεκριμένο μοντέλο είναι το CR1000X. Αυτό το σύστημα καταγραφής δεδομένων προορίζεται για εξωτερική χρήση και δεν απαιτεί συνεχή σύνδεση με υπολογιστή, επειδή διαθέτει ξεχωριστή μονάδα συλλογής και αποθήκευσης δεδομένων. Προσφέρει επίσης τη δυνατότητα σύνδεσης των οργάνων μέτρησης που χρησιμοποιούνται στο σύστημα. Τέλος, υπάρχει η δυνατότητα απομακρυσμένης σύνδεσης του χρήστη με τον υπολογιστή που είναι συνδεδεμένος στο Data Logger. Το μοντέλο CR1000X καθώς και τα περιφερειακά σύνδεσης υπολογιστή και επικοινωνίας παρουσιάζονται πιο λεπτομερώς παρακάτω.

• Βασική μονάδα Data Logger CR1000X

Το μοντέλο CR1000X είναι ένας σύστημα καταγραφής δεδομένων που παρέχει ακριβείς μετρήσεις και έλεγχο για μια μεγάλη ποικιλία εφαρμογών. Η αξιοπιστία και η ανθεκτικότητά του το καθιστούν μια εξαιρετική επιλογή για απομακρυσμένες περιβαλλοντικές εφαρμογές, όπως μετεωρολογικοί σταθμοί, δίκτυα παρακολούθησης, παρακολούθηση ποιότητας αέρα, υδρολογικά συστήματα, παρακολούθηση ποιότητας νερού και υδρομετεωρολογικούς σταθμούς.

Είναι μια συσκευή χαμηλής ισχύος που ανιχνεύει τους αισθητήρες, προωθεί την άμεση επικοινωνία και τις τηλεπικοινωνίες, αναλύει τα δεδομένα, ελέγχει για εξωτερικές συσκευές και αποθηκεύει τα δεδομένα και τα προγράμματα σε ενσωματωμένο, αποθηκευτικό χώρο. Τα ηλεκτρονικά μέρη είναι ηλεκτρομαγνητικά θωρακισμένα (RF-shielded) από ένα σφραγισμένο, ανοξείδωτο ατσάλινο μεταλλικό κουτί. Ένα αυτόνομο ρολόι εξασφαλίζει την ακριβή χρονομέτρηση. Η ενσωματωμένη γλώσσα προγραμματισμού τύπου BASIC, κοινή για όλους τους σύγχρονους καταγραφείς Campbell Scientific, υποστηρίζει την επεξεργασία και ανάλυση των δεδομένων [39].



Figure 2.69: CR1000X data logger [38]

Τα χαρακτηριστικά του μοντέλου CR1000X είναι τα παρακάτω:

Εύρος θερμοκρασίας κατά την λειτουργία	-40° με +70°C (πρότυπη), -55° με +85°C (πρόσθετη)
Θύρες εισόδου	16 απλές ή 8 διαφορικές
Μετρητές παλμών	10 (P1 με P2 και C1 με C8)
Θύρες διέγερσης τάσης	4 (VX1 με VX4)
Θύρες επικοινωνίας	Ethernet, USB Micro B, CS I/O, RS-232, RS-422, CPI, RS-485
Θύρες για αποθήκευση δεδομένων	microSD
Πηγές διαφοράς δυναμικού 12 Volt	2 θύρες
Επαναφορτιζόμενη SRAM για χρήση CPU και τελική αποθήκευση	4 MB
Αποθήκευση δεδομένων	4 MB SRAM + 72 MB flash (επέκταση χώρου αποθήκευσης έως και 16GB με αφαιρούμενη κάρτα μνήμης flash microSD.)

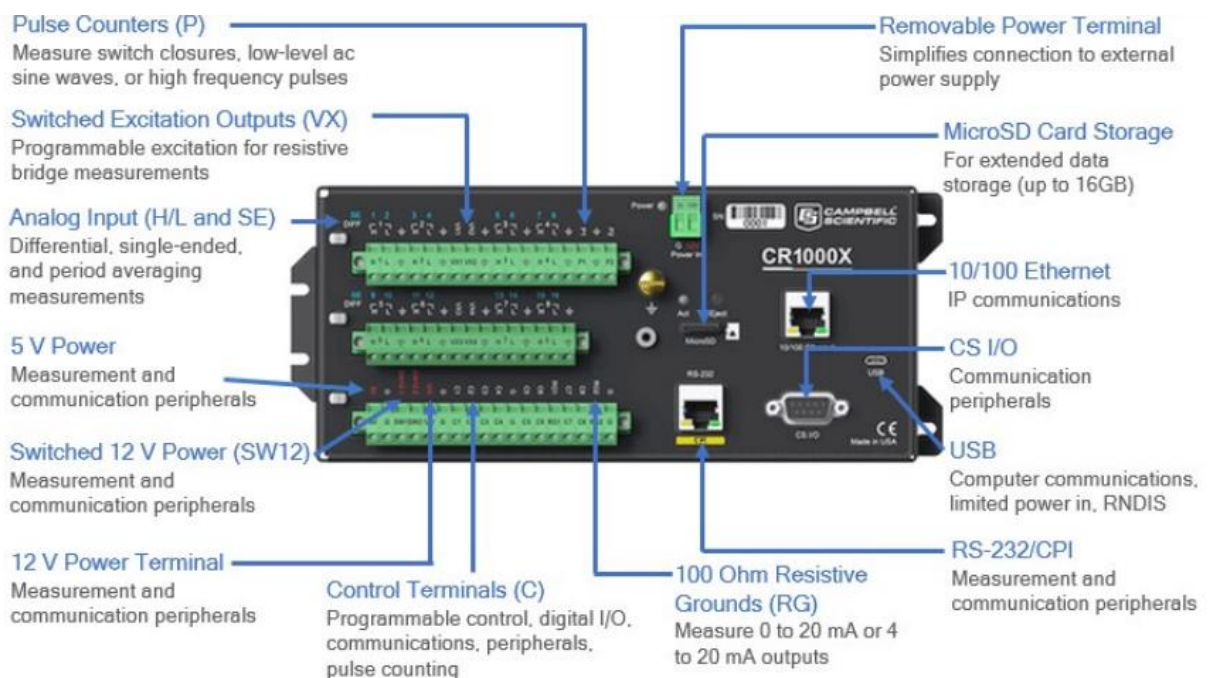


Figure 2.70: Οι θύρες του CR1000X [39]

- **Περιφερειακά σύνδεσης και επικοινωνίας με υπολογιστή**

Το CR1000X είναι συμβατό με όλα τα CDM (code division multiplexing), τους πολυπλέκτες, τις ενσύρματες διεπαφές, τις μονάδες εισόδου τερματικού και τους ηλεκτρονόμους (ρελέ).

Ακόμα, επικοινωνεί με τον υπολογιστή απευθείας μέσω θύρας USB, με θύρα Ethernet 10 / 100baseT, με διάφορα είδη μόντεμ (multidrop, τηλεφωνικά, μικρών αποστάσεων), ραδιοσυχνότητες (RF telemetry) και δορυφορικούς πομπούς (HDR GOES, Άργος, Meteosat, Iridium και Inmarsat). Τα δεδομένα μπορούν να προβληθούν στην οθόνη CR1000KD, στην οθόνη με δυνατότητα τοποθέτησης CD100 με πληκτρολόγιο, σε συσκευή iOS ή Android (μέσω της εφαρμογής Logger Link), σε οθόνη προβολής δεδομένων CD295 II ή σε άλλες συσκευές τρίτων [39].

- **Λογισμικό πρόγραμμα Loggernet**

Ο προγραμματισμός της λειτουργίας του ηλεκτρονικού συστήματος καταγραφής δεδομένων πραγματοποιήθηκε μέσω κατάλληλου λογισμικού. Σε κλειστό χώρο πίσω από την διάταξη τοποθετήθηκε ένας φορητός ηλεκτρονικός υπολογιστής στον οποίο εγκαταστάθηκε το πρόγραμμα Loggernet 4.6. της εταιρείας Campbell.

Το Loggernet είναι ένα λογισμικό πρόγραμμα που έχει πλήρη συμβατότητα με το CR1000X και με όλο το σύνολο των περιφερειακών που χρησιμοποιήθηκαν. Αρχικά, σκοπός του λογισμικού είναι η καθοδήγηση βήμα-βήμα στην ηλεκτρονική εγκατάσταση του συστήματος με τελικό στόχο τη λήψη μετρήσεων και την καταγραφή των δεδομένων. Μέσω των βημάτων αυτών καθορίζεται η σειρά με την οποία συνδέονται τα όργανα καθώς και ο τρόπος με τον οποίο πρέπει κάθε ένα από τα όργανα να συνδεθεί στο Data Logger ώστε να αναγνωριστεί από το πρόγραμμα. Έπειτα καθορίζεται η χρονική διάρκεια μεταξύ των διαδοχικών μετρήσεων, οι μονάδες μέτρησης αυτών και στην περίπτωση των ποτενσιόμετρων και των διαιρετών τάσης το πόσο υποβαθμισμένη θα είναι η τιμή εξόδου από την πραγματική.

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε έχει τη δυνατότητα για εποπτική εικόνα των αποτελεσμάτων σε πραγματικό χρόνο είτε μέσω πινάκων είτε μέσω

διαγραμμάτων χρονικής μεταβολής των ληφθέντων μεγεθών από την εγκατάστασή μας. Επίσης, παρουσιάζονται σε πραγματικό χρόνο τόσο οι πίνακες με τις μετρήσεις όσο και οι χρονικές μεταβολές αυτών μέσω διαγραμμάτων. Τέλος, τα δεδομένα που λαμβάνει το λογισμικό πρόγραμμα Loggernet από το Data Logger και την κάρτα πολυπλεξίας δύναται να αποθηκευτούν σε αρχείο μορφής .dat ή .csv και στη συνέχεια μέσω του λογισμικού Microsoft Excel να γίνεται περαιτέρω επεξεργασία τους [8].

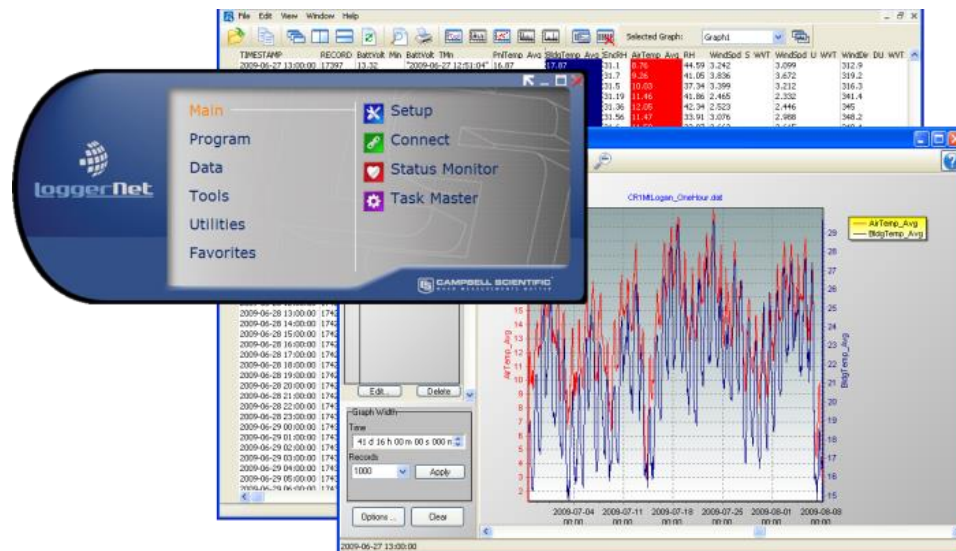


Figure 2.71: Λογισμικό πρόγραμμα Loggernet [38]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1. Σκοπός πειραματικών δοκιμών

Στα προηγούμενα κεφάλαια της διπλωματικής έγινε μια εκτενής ανάλυση των ηλιοθερμικών συστημάτων και μια αναλυτική κατηγοριοποίηση ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσης τους. Παρουσιάστηκε ο τρόπος λειτουργίας των συστημάτων καθώς και τα είδη των ηλιακών συλλεκτών που χρησιμοποιούνται στις διατάξεις. Στην συνέχεια, έγινε η περιγραφή της σχεδίασης, των διεργασιών συναρμολόγησης και της κατασκευής της πειραματικής διάταξης. Τέλος, έγινε η ανάλυση της αρχής λειτουργίας και τα χαρακτηριστικά των στοιχείων και μετρητικών οργάνων που εγκαταστάθηκαν.

Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι μέσω των μετρήσεων που θα πραγματοποιηθούν στην πειραματική διάταξη να γίνει ο προσδιορισμός δύο βασικών στοιχείων:

- της στιγμιαίας θερμικής απόδοσης του ηλιακού συλλέκτη κενού.
- της ημερήσιας απόδοσης του συστήματος συλλέκτη - δεξαμενή θερμότητας.

Τέλος, μετά τον προσδιορισμό των παραπάνω, σκοπός των πειραματικών δοκιμών είναι να προκύψουν:

- οι καμπύλες διακύμανσης των θερμοκρασιών του θερμαντικού μέσου συναρτήσει του χρόνου λειτουργίας.
- οι καμπύλες διακύμανσης της θερμοκρασίας του νερού αποθήκευσης της δεξαμενής συναρτήσει του χρόνου λειτουργίας.
- οι καμπύλες μέσης ημερήσιας απόδοσης του συστήματος συλλέκτης – αποθήκη θερμότητας συναρτήσει των συνθηκών λειτουργίας.

3.2. Μέθοδοι πειραματικής μελέτης ηλιοθερμικών συστημάτων

Η πειραματική μελέτη των διατάξεων έχει σαν σκοπό την αξιολόγηση της λειτουργίας τους και τον υπολογισμό της αποδοτικότητας τους σε σχέση με τον μέσο όρο των ηλιακών εγκαταστάσεων θέρμανσης νερού. Η αποδοτικότητα ενός ηλιοθερμικού συστήματος σχετίζεται με την εποχή των μετρήσεων, τις κλιματολογικές συνθήκες και τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά της περιοχής, αφού καθορίζουν το θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας τους.

Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζονται οι βασικές μέθοδοι πειραματικής μελέτης του ηλιοθερμικού συστήματος που περιλαμβάνει τόσο τον συλλέκτη κενού, όσο και την δεξαμενή αποθήκευσης. Στόχος είναι ο προσδιορισμός της στιγμιαίας και ημερήσιας απόδοσης λειτουργίας.

3.2.1. Προσδιορισμός στιγμιαίας θερμικής απόδοσης ηλιακού συλλέκτη

Ως βαθμός απόδοσης ενός ηλιακού συλλέκτη, ορίζεται ο στιγμιαίος βαθμός απόδοσής του, για δεδομένη τιμή έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας και εξωτερική θερμοκρασία. Η στιγμιαία απόδοση ενός ηλιακού συλλέκτη γενικά υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\eta = \frac{Q_u}{Q_s} = \frac{Q_u}{A_\alpha \times G_t}$$

όπου Q_u : η ισχύς της ωφέλιμης ενέργειας ή απολαβής (W), A_α : η επιφάνεια του συλλέκτη (m^2), G_t : ολική προσπίπτουσα ακτινοβολία (W/m^2).

Ως ισχύς ωφέλιμης ενέργειας (Q_u), θεωρείται η διαφορά μεταξύ της απορροφημένης ισχύος ηλεκτρικής ενέργειας (Q_o) και της θερμότητας λόγω απωλειών (Q_L), οπότε:

$$Q_u = Q_o - Q_L \Rightarrow Q_u = A_\alpha \times [S - U_L \times (T_{p,m} - T_\alpha)]$$

όπου το γινόμενο $U_L \times (T_{p,m} - T_\alpha)$, αναφέρεται στις θερμικές απώλειες.

Ο όρος S αναφέρεται στην ανά μονάδα επιφάνειας απορροφούμενη ενέργεια του συλλέκτη και υπολογίζεται ως:

$$S = (\tau\alpha)_{ave} \times G_t$$

όπου το γινόμενο $(\tau\alpha)_{ave}$ είναι η μέση τιμή του γινομένου διαπερατότητας απορροφητικότητας του συστήματος διαφανές κάλυμμα – απορροφητής.

Ο συγκεκριμένος τύπος της ισχύος ωφέλιμης ενέργειας δουλεύει σε αυτήν την μορφή στην περίπτωση που χρησιμοποιείται η μέση θερμοκρασία απορροφητή ($T_{p,m}$). Επειδή, όμως, είναι δύσκολος ο συνεχής προσδιορισμός της μέσης θερμοκρασίας απορροφητή, καθώς εξαρτάται από την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και το ρευστό που χρησιμοποιείται στον συλλέκτη, τις περισσότερες φορές στην θέση του να χρησιμοποιείται η θερμοκρασία εισόδου του ρευστού (T_{in}), μέσω της εξίσωσης:

$$T_{p,m} = T_{in} + \frac{Q_u}{A_\alpha \times U_L \times F_R} \times (1 - F_R)$$

οπότε η εξίσωση της ισχύος ωφέλιμης ενέργειας μετατρέπεται ως:

$$Q_u = A_\alpha \times F_R \times [S - U_L \times (T_{in} - T_\alpha)] \quad \text{ή}$$

$$Q_u = A_\alpha \times F_R \times [(\tau\alpha)_{ave} \times G_t - U_L \times (T_{in} - T_\alpha)]$$

Ο όρος F_R , που χρησιμοποιείται στις παραπάνω εξισώσεις, είναι ο συντελεστής απόδοσης κατά την εναλλαγή θερμότητας μεταξύ απορροφητή και ρευστού. Ο παράγοντας αυτός είναι ισοδύναμος με τον λόγο της ωφέλιμης ισχύος του συλλέκτη για συγκεκριμένη τιμή της θερμοκρασίας του ρευστού προς την ωφέλιμη ισχύ του ίδιου αν αυτός βρισκόταν στη θερμοκρασία εισόδου του ρευστού. Ο παράγοντας F_R , ο οποίος έχει την διεθνή ονομασία Heat Removal Factor, παίρνει μέγιστη τιμή 1 όταν ο συλλέκτης έχει μέγιστη απόδοση.

Αυτό πραγματοποιείται όταν συλλέκτης φτάσει σε θερμοκρασία ίση με τη θερμοκρασία εισόδου του ρευστού. Η θεμελιώδης εξίσωσή του είναι:

$$F_R = \frac{\dot{m} \times C_p \times (T_{out} - T_{in})}{A_\alpha \times [S - U_L \times (T_{in} - T_\alpha)]}$$

Με την χρήση της παραπάνω εξίσωσης, η εξίσωση της ωφέλιμης ισχύος του συλλέκτη γίνεται:

$$Q_u = \dot{m} \times C_p \times (T_{out} - T_{in})$$

Η βασική μέθοδος προσδιορισμού της στιγμιαίας απόδοσης ενός ηλιακού συλλέκτη, είναι η έκθεση του συλλέκτη στην ηλιακή ακτινοβολία για αρκετές ώρες και σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης, να γίνει μέτρηση της θερμοκρασίας εισόδου (T_{in}) και εξόδου (T_{out}) του ρευστού, της συνολικής ακτινοβολίας (G_t) και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος (T_α) στο συγκεκριμένο διάστημα. Συνθήκες μόνιμης κατάστασης υπάρχουν όταν για ένα χρονικό διάστημα επιτυγχάνονται σταθερές θερμοκρασίες εισόδου, εξόδου του ρευστού στον συλλέκτη.

Έπειτα από την μέτρηση των παραπάνω, χρησιμοποιείται η παρακάτω σχέση και υπολογίζεται η στιγμιαία απόδοση του ηλιακού συλλέκτη:

$$\eta = \frac{Q_u}{Q_s} = \frac{\dot{m} \times C_p \times (T_{out} - T_{in})}{A_\alpha \times G_t}$$

Η στιγμιαία θερμική απόδοση του συλλέκτη μπορεί να αναπαρασταθεί γραφικά ως προς το πηλίκο $(T_{in} - T_\alpha)/G_t$, δημιουργώντας έτσι μια γραμμική προσέγγιση για σταθερές θερμικές απώλειες, η οποία είναι η:

$$\eta = A - B \times \left(\frac{T_{in} - T_\alpha}{G_t} \right)$$

Ο συντελεστής A περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο η ενέργεια απορροφάται από τον συλλέκτη ($A = F_R(T_a)$), ενώ ο συντελεστής B περιγράφει τις θερμικές απώλειες του συλλέκτη ($B = F_R U_L$). Η κλίση της ευθείας είναι η $F_R U_L$ ενώ η τιμή $\eta = F_R(T_a)$ αποτελεί τη μέγιστη θεωρητική απόδοση του επιπέδου ηλιακού συλλέκτη [40].

3.2.2. Πειραματικός προσδιορισμός ημερήσιας απόδοσης συστήματος [41]

Ο προσδιορισμός της ημερήσιας απόδοσης ενός ηλιακού συστήματος είναι ο πιο συνηθισμένος τρόπος σύγκρισης της σε σχέση με άλλες ηλιακές συσκευές που υπάρχουν στην αγορά. Με το τρόπο αυτό γίνεται εξακρίβωση της λειτουργίας τους σε εξωτερικές συνθήκες και εκτιμάται η επιτυχία της σχεδίασής τους. Υπάρχουν διάφορες παραλλαγές της μεθόδου προσδιορισμού της ημερήσιας απόδοσης. Οι πιο γνωστές είναι η μέθοδος ωφέλιμης απόδοσης (Maximum Useful Efficiency, MUE), και η μέθοδος που προτείνεται από το European Solar Collector and System Testing Group (CSTG) και τα Πρότυπα ΕΛΟΤ 879 και EUR 11606 EN. Από αυτές τις δύο μεθόδους συνηθέστερη είναι η δεύτερη, η οποία εφαρμόζεται από πολλά ερευνητικά κέντρα και διεθνή κέντρα πιστοποίησης ηλιακών συλλεκτών. Παρακάτω περιγράφονται πιο αναλυτικά αυτοί οι δύο μέθοδοι υπολογισμού της ημερήσιας απόδοσης.

➤ Μέθοδος ωφέλιμης απόδοσης (MUE)

Σύμφωνα με αυτήν την μέθοδο, η ηλιακή διάταξη δοκιμάζεται σε εξωτερικές συνθήκες λειτουργίας και ο υπολογισμός της μέγιστης ημερήσιας απόδοσης (η_{max}), υπολογίζεται ως εξής:

Αρχικά, σε μια αρχική χρονική στιγμή t_{in} , γίνεται μέτρηση της μέσης αρχικής θερμοκρασίας του νερού που βρίσκεται στην δεξαμενή του συστήματος $T_{in,m}$. Στην συνέχεια, η διάταξη αφήνεται σε λειτουργία χωρίς να γίνεται απομάστευση νερού μέχρι κάποια χρονική στιγμή t_{out} στην οποία η μέση θερμοκρασία του νερού $T_{out,m}$, έχει φτάσει στην μέγιστη τιμή του. Ταυτόχρονα κατά την διάρκεια της όλης διαδικασίας γίνεται μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας G που προσπίπτει στην επιφάνεια του ηλιακού συλλέκτη, καθώς

και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος T_a . Κατά το χρονικό διάστημα Δt υπολογίζεται η ωφέλιμη ενέργεια που αποθηκεύτηκε στο σύστημα και η συνολική προσπίπτουσα σε αυτήν ηλιακή ακτινοβολία. Ο λόγος της αυτών των δύο, ισούται με τη μέγιστη ημερήσια απόδοση της συσκευής, η_{\max} . Ακόμα, υπολογίζεται ο λόγος της διαφοράς της μέσης θερμοκρασίας του νερού μείον τη μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος ($T_{a,m}$) προς τη μέση ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας:

$$\Delta T_m / G_m = [(T_{in,m} + T_{out,m}) / 2 - T_{a,m}] / G_m.$$

Με αυτόν τον τρόπο σχηματίζεται ένα πειραματικό ζεύγος τιμών ($\eta_{\max}, \Delta T_m / G_m$). Επαναλαμβάνοντας πολλές φορές τη διαδικασία αυτή για διαφορετικές τιμές της μέσης θερμοκρασίας του νερού του συστήματος και της έντασης της ακτινοβολίας, χαράσσεται η καμπύλη της μέγιστης ημερήσιας απόδοσης σε γραμμική προσέγγιση με την παράμετρο $\Delta T_m / G_m$.

➤ Μέθοδος CSTG

Σύμφωνα με αυτήν την μέθοδο, το σύστημα δοκιμάζεται σε εξωτερικές συνθήκες με μετρήσεις που απαιτούν χρονικό διάστημα 12 ωρών και πιο συγκεκριμένα από 6 ώρες πριν το μεσημέρι μέχρι 6 ώρες μετά το μεσημέρι.

Αρχικά, λαμβάνεται η τοπική μέση αρχική τιμή της θερμοκρασίας $T_{in,m}$ του νερού στην δεξαμενή της διάταξης και εν συνεχεία το σύστημα αφήνεται να λειτουργήσει για το χρονικό διάστημα 12 ωρών. Κατά τη διάρκεια των 12 ωρών γίνονται μετρήσεις για την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία G και την θερμοκρασία περιβάλλοντος T_a . Όταν ολοκληρωθεί η ημερήσια λειτουργία του συστήματος, εισάγεται στην δεξαμενή νερό, θερμοκρασίας ίσης προς τη πρωινή μέση τιμή της θερμοκρασίας $T_{in,m}$ του νερού και με παροχή 600 lt^{-1} . Τότε εξέρχεται το θερμό νερό από την έξοδο της δεξαμενής και γίνεται συνεχής μέτρηση της θερμοκρασίας του T_{out} και του όγκο του, μέχρι ο συνολικός όγκος του εξερχόμενου νερού να είναι ίσος με τρεις φορές τον όγκο του νερού εντός της δεξαμενής. Από τις μετρούμενες τιμές T_{out} και τις τιμές του όγκου, υπολογίζεται η θερμική ενέργεια Q_{out} του εξερχόμενου νερού συνολικού όγκου

$3V_T$, όπου V_T είναι ο όγκος του νερού που περιέχεται στην δεξαμενή. Ακόμα, από τις τιμές της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας που καταγράφεται κατά τη διάρκεια της 12ωρης λειτουργίας της συσκευής, υπολογίζεται η συνολική ενέργεια Q_{input} που προσέπεσε στον ηλιακό συλλέκτη. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται και άλλες μέρες με διαφορετικές αρχικές μέσες τιμές $T_{in,m}$ του νερού, αλλά κάθε φορά στο τέλος του 12ωρου πειράματος το εισερχόμενο νερό έχει θερμοκρασία, ίση με την αρχική μέση θερμοκρασία $T_{in,m}$ του νερού, το πρωί της ημέρας που πραγματοποιείται το πείραμα. Τα πειραματικά ζεύγη των τιμών (Q_{input}, Q_{out}) καταχωρούνται σε ομάδες με ίδια διαφορά ($\Delta T_m = T_{a,m} - T_{in,m}$), όπου $T_{a,m}$ η μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος στη διάρκεια του 12ωρου πειράματος, και για κάθε ομάδα προσδιορίζεται η σχέση μεταξύ τους με μια πρωτοβάθμια εξίσωση. Η γραφική παράσταση των πειραματικών σημείων και η χάραξη των ευθειών που αντιστοιχούν, δίνει το καλούμενο διάγραμμα input – output του συστήματος. Ο λόγος των ενεργειών Q_{out} / Q_{input} καθορίζει την ημερήσια απόδοση (η) της συσκευής.

$$Q_{input} = G \times A_\alpha,$$

$$Q_{out} = \dot{m} \times C_p \times (T_{out} - T_{in}),$$

όπου A_α : η επιφάνεια του συλλέκτη (m^2), C_p : ειδική θερμότητα υγρού απολαβής της θερμότητας (J/Kg K) και \dot{m} : παροχή ρευστού (Kg/s)

$$\eta = (Q_{out} / Q_{input})$$

$$\eta = (\dot{m} \times C_p \times (T_{out} - T_{in})) / (G \times A_\alpha)$$

Βέβαια στην πράξη, τόσο η μέθοδος MUE, όσο και η μέθοδος CSTG παρουσιάζουν κάποια μειονεκτήματα στον προσδιορισμό της ημερήσιας απόδοσης. Αρχικά, η μέθοδος MUE παρουσιάζει αρκετές αποκλίσεις ως προς τον προσδιορισμό της ημερήσιας απόδοσης συγκριτικά με τη μέθοδο CSTG η οποία πλεονεκτεί γιατί τα συστήματα αποκρίνονται στη διατήρηση της θερμοκρασίας

για κάποιο χρονικό διάστημα. Από την άλλη πλευρά η μέθοδος CSTG, που είναι ακριβέστερη μέθοδος, παρουσιάζει κάποια πρακτικά προβλήματα όσο αφορά την απομάστευση του όγκου νερού του δοχείου, σταθερής θερμοκρασίας σε μικρό χρονικό διάστημα, ενώ δίνει πιο ευνοϊκά αποτελέσματα για συσκευές με μεγάλο λόγο V_T/A_a .

Για αυτούς τους λόγους στην συγκεκριμένη πειραματική διάταξη χρησιμοποιείται μια άλλη πειραματική μέθοδος, η οποία είναι παραλλαγή των προηγούμενων δύο και αναφέρεται ως Mean Daily Efficiency (MDE) και η οποία περιγράφεται αναλυτικά παρακάτω.

➤ Μέθοδος μέσης ημερήσιας απόδοσης (MDE)

Στην συγκεκριμένη μέθοδο, η ημερήσια απόδοση προσεγγίζεται υπολογίζοντας την θερμότητα που προσέλαβε το νερό στην δεξαμενή, μέσω των τιμών που προκύπτουν από την μέση αρχική και τελική θερμοκρασία του, κατά τη διάρκεια 12ωρης πειραματικής λειτουργίας του συστήματος. Το χρονικό διάστημα των 12 ωρών καθορίζεται από 6 ώρες πριν το μεσημέρι μέχρι 6 ώρες μετά το μεσημέρι όπως και στην μέθοδο CSTG.

Αρχικά, το πρωί της ημέρας των μετρήσεων, η δεξαμενή της διάταξης περιέχει νερό μέσης αρχικής θερμοκρασίας $T_{in,m}$ και ξεκινά η καταγραφή των μετρήσεων της θερμοκρασίας του νερού μέσα στην δεξαμενή T_{mean} , 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 νερού ή άλλη παρέμβαση. Η πειραματική αυτή λειτουργία επαναλαμβάνεται πολλές ημέρες και κάθε φορά η θερμοκρασία εκκίνησης είναι διαφορετική ώστε να περιλαμβάνεται ένα όσο το δυνατό μεγαλύτερο εύρος θερμοκρασιών. Η πειραματική διαδικασία πραγματοποιείται με λειτουργία της συσκευής για δύο έως τέσσερις συνεχόμενες ημέρες χωρίς απομάστευση του νερού αποθήκευσης ώστε η θερμοκρασία εκκίνησης για κάθε ημερήσια λειτουργία να είναι διαφορετική και αυξανόμενη μέχρι την τελευταία ημέρα λειτουργίας, όπου πλέον η συσκευή φτάνει σε θερμοκρασιακό κόρο. Η πειραματική αυτή

διαδικασία επαναλαμβάνεται με σκοπό τη συλλογή αρκετών πειραματικών στοιχείων για τον προσδιορισμό της μέσης ημερήσιας απόδοσης και τη γραφική απεικόνισή της, συναρτήσει της ποσότητας

$$\frac{\Delta T_m}{G_m} = [(T_{in,m} + T_{out,m})/2 - T_{a,m}]/G_m$$

Τα μεγέθη που χρειάζονται για τον υπολογισμό της μέσης ημερήσιας απόδοσης (η_d), είναι η μέση θερμοκρασία του νερού στην δεξαμενή $T_{in,m}$ την χρονική στιγμή t_{in} της έναρξης του πειράματος, η μέση θερμοκρασία του νερού της δεξαμενής $T_{out,m}$, την χρονική στιγμή τέλους t_{out} των μετρήσεων, καθώς και η θερμοκρασία περιβάλλοντος T_a και η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας G καθόλη τη διάρκεια του 12ωρου πειράματος. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος καθώς και η ακτινοβολία δίνουν την δυνατότητα της παρακολούθησης των εξωτερικών συνθηκών κατά την διάρκεια των μετρήσεων. Ακόμα μεγάλες επιδράσεις στις μετρήσεις της διάταξης έχει ο άνεμος καθώς και το ποσοστό νέφωσης, καθώς σε μεγάλες ταχύτητες ανέμου οι θερμικές απώλειες αυξάνονται, ενώ σε υψηλό ποσοστό νέφωσης υπάρχει μείωση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.

Σύμφωνα με τα παραπάνω μπορεί να υπολογιστεί η θερμότητα Q_w (J) του νερού μάζας M_w (kg) και ειδικής θερμότητας $C_{p,w}$ (J/Kg⁻¹ K⁻¹) στο χρονικό διάστημα των 12 ωρών (43,200sec), καθώς και η θερμότητα Q_T (J) της άδειας δεξαμενής νερού μάζας M_T (kg) και ειδικής θερμότητας $C_{p,T}$ (J/Kg⁻¹ K⁻¹) στο ίδιο χρονικό διάστημα, οπότε:

$$Q_w = M_w \times C_{p,w} \times (T_{out,m} - T_{in,m})$$

$$Q_T = M_T \times C_{p,T} \times (T_{out,m} - T_{in,m})$$

Επίσης, η μέση ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας G_m , στο χρονικό διάστημα $\Delta t = t_{out} - t_{in}$, προσδιορίζεται από την ολοκλήρωση της στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, διαιρώντας την με αυτό, οπότε:

$$G_m = \frac{\int_{t_{in}}^{t_{out}} [G(t)dt]}{t_{out} - t_{in}}$$

Επομένως, η συνολική προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια Q_R στην επιφάνεια του συλλέκτη, το χρονικό διάστημα των 12 ωρών, προσδιορίζεται από την ολοκλήρωση της μετρούμενης ακτινοβολίας $G(t)$:

$$Q_R = A_\alpha \int_{t_{in}}^{t_{out}} G(t)dt = A_\alpha \times G_m \times \Delta t$$

Έχοντας υπολογίσει τις παραπάνω εξισώσεις, εύκολα υπολογίζεται τελικά η μέση ημερήσια απόδοση (η_d) της διάταξης για την θέρμανση του νερού που περιέχεται στην δεξαμενή:

$$\eta_d = \frac{Q_w + Q_T}{Q_R} = \frac{((M_w \times C_{p,w}) + (M_T \times C_{p,T})) \times (T_{out,m} - T_{in,m})}{A_\alpha \times G_m \times \Delta t}$$

Κάθε πειραματική τιμή της μέσης ημερησίας απόδοσης (η_d) του συστήματος καθορίζεται από τις μέσες τιμές της θερμοκρασίας του νερού δεξαμενής τις χρονικές στιγμές t_{in} και t_{out} και τη μέση τιμή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας G_m κατά τη διάρκεια της 12ωρης ημερήσιας λειτουργίας. Με αυτόν τον τρόπο ορίζεται ένα πειραματικό ζεύγος τιμών (**η_d , $\Delta T_m/G_m$**) από τις εξισώσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Η μέση ημερήσια απόδοση μπορεί να ληφθεί συναρτήσει του $\Delta T_m/G_m$ με γραμμική προσέγγιση της μορφής:

$$\eta_d = A + B \times (\Delta T_m/G_m)$$

Ο συντελεστής A εκφράζει την μέγιστη ημερήσια απόδοση της διάταξης όταν μέση θερμοκρασία του νερού στο 12ωρο (T_{mean}), είναι ίση προς τη μέση

θερμοκρασία περιβάλλοντος ($T_{a,m}$) για το ίδιο χρονικό διάστημα, οπότε ισχύει ότι:

$$T_{mean} = T_{a,m} = (T_{in,m} + T_{out,m})/2 \Rightarrow \Delta T_m / G_m = 0$$

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

Τέλος, μια πιο ακριβής προσέγγιση της μέσης ημερήσιας απόδοσης σε συνάρτησι του $\Delta T_m / G_m$, δημιουργείται με την βοήθεια του παρακάτω δευτεροβάθμιου πολυωνύμου:

$$\eta_d = A + B \times (\Delta T_m / G_m) + C \times (\Delta T_m / G_m)^2$$

Όπως και παραπάνω ο συντελεστής A εκφράζει την μέγιστη ημερήσια απόδοση της διάταξης και ο συντελεστής B ($WK^{-1}m^{-2}$) εκφράζει τις θερμικές απώλειες της συσκευής ανά επιφάνεια συλλέκτη (A_a) κατά τη διάρκεια της ημερήσιας λειτουργίας, ενώ ο συντελεστής C εκφράζει την μεταβολή του συντελεστή B .

Με τη χρήση είτε της γραμμικής, είτε της δευτεροβάθμιας προσέγγισης, η καμπύλη που προκύπτει είναι μια καμπύλη χαρακτηριστική για την διάταξη. Τα δύο ακραία σημεία, $\Delta T_m / G_m = 0$, $\eta_d = 0$, επιδρούν στην σχεδίαση του συστήματος, ενώ η κλίση της καμπύλης (συντελεστές B, C) καθορίζουν την θερμική της συμπεριφορά (είδος και πάχος θερμικής μόνωσης, διαφανές κάλυμμα κ.α.).

3.2.3. Πειραματικός Προσδιορισμός Θερμικών Απωλειών Δεξαμενής

Η παρούσα διπλωματική, δεν έχει σαν σκοπό τον υπολογισμό των θερμικών απωλειών της πειραματικής διάταξης, αφού σκοπός της είναι η βελτιστοποίηση της ημερήσιας λειτουργίας της. Εντούτοις, επειδή έχει ενδιαφέρον, παρακάτω παρουσιάζεται συνοπτικά η μέθοδος υπολογισμού των θερμικών απωλειών της δεξαμενής.

Η διατήρηση της θερμοκρασίας του νερού στην δεξαμενή, τόσο κατά την διάρκεια λειτουργίας του συστήματος, όσο και κατά την διάρκεια της νύχτας, είναι ένας από τους σημαντικότερους λόγους που γίνονται μελέτες και βελτιστοποιήσεις στα ηλιοθερμικά συστήματα. Οι θερμικές απώλειες της διάταξης εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες, όπως η χρονική διάρκεια της λειτουργίας της, αφού οι περιβαλλοντολογικές συνθήκες διαφέρουν μεταξύ ημερήσιας και νυχτερινής λειτουργίας. Η μέθοδος προσδιορισμού των θερμικών απωλειών ο οποίος προτείνεται, μοιάζει με τον προσδιορισμό της ημερήσιας απόδοσης που αναλύθηκε παραπάνω. Χρησιμοποιεί την γραμμική προσέγγιση της μέγιστης ημερήσιας απόδοσης σε σχέση με την ποσότητα $\Delta T_m = T_{\max,m} - T_{a,m}$ (όπου $T_{\max,m}$ είναι η μέση μέγιστη θερμοκρασία του νερού και $T_{a,m}$ η μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος). Η συγκεκριμένη διαδικασία είναι ανάλογη με αυτήν που προτείνεται από τα πρότυπα ΕΛΟΤ 879 και EUR 11606 EN.

Αρχικά, το νερό στην δεξαμενή του συστήματος, θερμαίνεται σε θερμοκρασία από 40°C έως 80°C και στην συνέχεια το σύστημα αφήνεται να δουλέψει όλο το βράδυ για ένα 12ωρο χωρίς απομάστευση νερού ανταλλάσσοντας ενέργεια με το περιβάλλον. Οι χρονικές στιγμές t_{in} και t_{out} που λαμβάνονται υπόψιν ταυτίζονται με τις χρονικές στιγμές που χρησιμοποιήθηκαν στον προσδιορισμό της ημερήσιας απόδοσης. Η πειραματική διαδικασία επαναλαμβάνεται αρκετές ημέρες με διαφορετική μέση θερμοκρασία εκκίνησης ($T_{in,m}$) κάθε φορά. Ο προσδιορισμός των θερμικών απωλειών στο σύστημα συνδέεται άρρηκτα με την διαδικασία προσδιορισμού της ημερήσιας απόδοσης και υπολογίζονται για το ίδιο χρονικό διάστημα.

Έχουμε ότι $T_{in,m}$ είναι η μέση αρχική θερμοκρασία του νερού της δεξαμενής την χρονική στιγμή t_{in} , $T_{out,m}$ είναι η μέση τελική θερμοκρασία του

νερού της δεξαμενής την χρονική στιγμή t_{out} και $T_{a,m}$ είναι η μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά την διάρκεια του 12ωρου πειράματος, οπότε ο συντελεστής των νυχτερινών θερμικών απωλειών U_s (WK^{-1}), υπολογίζεται ως εξής:

$$U_s = \frac{(M_w \times C_{p,w}) + (M_T \times C_{p,T})}{\Delta t} \times \ln \left[\frac{T_{in,m} - T_{a,m}}{T_{out,m} - T_{a,m}} \right]$$

όπου M_w (kg) η μάζα του νερού ειδικής θερμότητας $C_{p,w}$ ($J/Kg^{-1} K^{-1}$) στο χρονικό διάστημα των 12 ωρών (43,200sec), καθώς και M_T (kg) η μάζα της άδειας δεξαμενής νερού και ειδικής θερμότητας $C_{p,T}$ ($J/Kg^{-1} K^{-1}$) στο ίδιο χρονικό διάστημα. Από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι η τιμή του συντελεστή των θερμικών απωλειών U_s δεν είναι σταθερή, αλλά αυξάνεται λογαριθμικά με το λόγο της διαφοράς της τοπικής μέσης θερμοκρασίας $T_{in,m}$ εκκίνησης του νερού μείον τη μέση τιμή της θερμοκρασίας περιβάλλοντος $T_{a,m}$ κατά τη διάρκεια του 12ωρου πειράματος προς τη διαφορά της τοπικής μέσης τελικής θερμοκρασίας $T_{out,m}$ του μείον τη μέση τιμή της θερμοκρασίας περιβάλλοντος $T_{a,m}$ κατά τη διάρκεια του ίδιου χρονικού διαστήματος.

Επομένως, κατά την διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας, τα ζεύγη τιμών **(U_s , $T_{in,m} - T_{a,m}$)**, αποτελούν τα πειραματικά δεδομένα υπολογισμού των νυχτερινών θερμικών απωλειών του συστήματος. Ο συντελεστής νυχτερινών θερμικών απωλειών U_s στην πράξη μεταβάλλεται βραδύτερα συναρτήσει του $T_{in,m} - T_{a,m}$ και αυτή η μεταβολή μπορεί να προσεγγιστεί με την γραμμική σχέση:

$$U_s = A + B \times (T_{in,m} - T_{a,m})$$

Στην παραπάνω σχέση, ο συντελεστής A εκφράζει τις θερμικές απώλειες της διάταξης όταν η θερμοκρασία του νερού στην δεξαμενή ισούται με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και ο συντελεστής B εκφράζει το ρυθμό μεταβολής των νυχτερινών θερμικών απωλειών συναρτήσει της διαφοράς $T_{in,m} - T_{a,m}$. Η συγκεκριμένη γραμμική προσέγγιση δίνει την δυνατότητα εκτίμησης των νυχτερινών θερμικών απωλειών του συστήματος.

3.3. Πειραματική διάταξη και διαδικασία μετρήσεων του ηλιακού συστήματος

Το ηλιακό σύστημα θέρμανσης νερού που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διαδικασία είναι ένα σύστημα εξαναγκασμένης ροής, κλειστού βρόγχου, το οποίο αποτελείται από ένα συλλέκτη κενού και μια δεξαμενή αποθήκευσης τύπου μανδύα. Η συναρμολόγηση και η λειτουργία του συστήματος, καθώς και τα όργανα μέτρησης, ο εξοπλισμός με τα οποία αποτελείται, αναλύθηκαν διεξοδικά στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Η μέτρηση της θερμοκρασίας του νερού στην δεξαμενή αποθήκευσης έγινε με την βοήθεια θερμοζεύγων, τα οποία τοποθετήθηκαν σε τρεις διαφορετικές θέσεις της δεξαμενής. Ακόμα, δύο θερμοζεύγη τοποθετήθηκαν εντός των σωλήνων στην είσοδο και έξοδο του συλλέκτη με σκοπό την μέτρηση των θερμοκρασιών του νερού-αντιψυκτικού που ήταν απαραίτητες για την μελέτη του συστήματος. Για την μέτρηση της ακτινοβολίας χρησιμοποιήθηκε το πυρανόμετρο CMP 3 της εταιρίας Kipp & Zonen και για την μέτρηση του ανέμου χρησιμοποιήθηκε το ανεμόμετρο A100K της εταιρίας Vector instruments. Για να γίνει η καταγραφή και η αποθήκευση των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε ένα αυτόματο καταγραφικό (Data Logger) της εταιρίας Campbell Scientific με την εμπορική ονομασία CR1000X.

Για την καταχώρηση των πειραματικών δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Loggernet, το οποίο υποστηρίζει την λειτουργία του CR1000X, ενώ ο έλεγχος λειτουργίας γινόταν μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή. Τέλος η επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων και η παρουσίαση των διαγραμμάτων μεταβολής όλων των παραμέτρων λειτουργίας που θα παρουσιαστούν παρακάτω, πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια του λογισμικού Microsoft Excel.

3.4. Αποτελέσματα μετρητικών δοκιμών του συστήματος

Οι πειραματικές μετρήσεις του συστήματος πραγματοποιήθηκαν από τις 7 έως τις 20 Ιουλίου 2020 στα Χανιά στο χώρο του Πολυτεχνείου Κρήτης. Συνολικά οι ημέρες μετρήσεων ήταν 11 και πιο αναλυτικά, οι μετρήσεις έγιναν το τριήμερο 7-9 Ιουλίου, το διήμερο 11-12 Ιουλίου, το τριήμερο 14-16 Ιουλίου και το τριήμερο 18-20 Ιουλίου. Οι ώρες κατά τις οποίες το σύστημα βρισκόταν σε λειτουργία ήταν από τις 9.00 το πρωί μέχρι τις 17.00 το απόγευμα για αυτό τον λόγο και οι μέθοδοι υπολογισμού των αποδόσεων προσαρμόστηκαν στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Τέλος, το σύστημα είχε προσανατολισμό προς τα νότια και η κλίση του συλλέκτη ήταν στις 45°.

3.4.1. Διαγράμματα ημερήσιας λειτουργίας του συστήματος

Παρακάτω παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις διακύμανσης της θερμοκρασίας του ρευστού κατά την είσοδο του στον συλλέκτη (T_{in}), κατά την έξοδο του από αυτόν (T_{out}), την μεταβολή της μέσης θερμοκρασίας του νερού εντός της δεξαμενής (T_{mean}), καθώς και η διακύμανση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος (T_a) και της ηλιακής ακτινοβολίας (G).

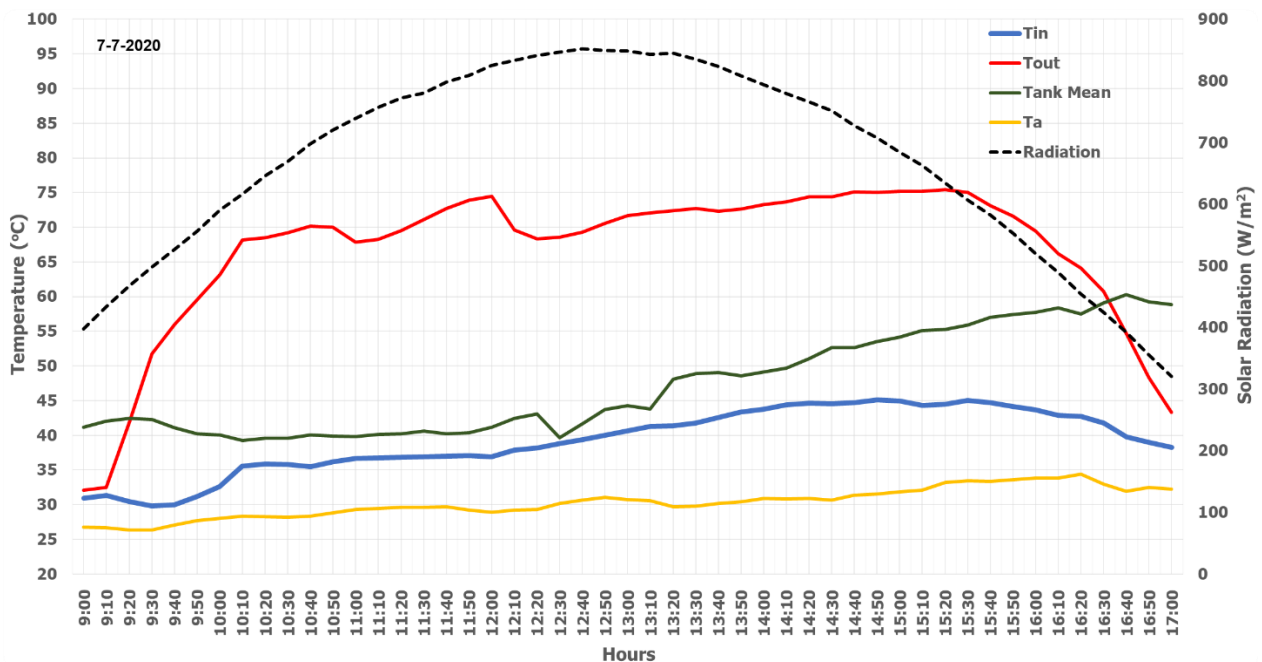


Figure 3.72: Διάγραμμα μεταβολής των θερμοκρασιών και της έντασης της ακτινοβολίας κατά την διάρκεια της 1ης ημέρας λειτουργίας του συστήματος

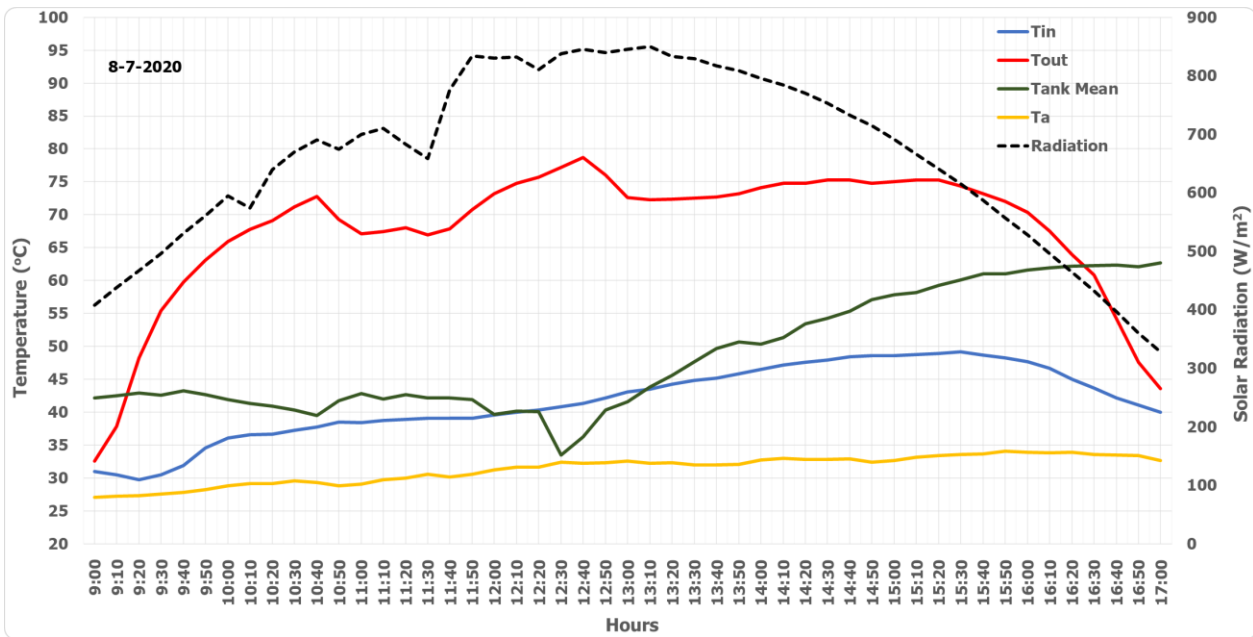


Figure 3.73: Διάγραμμα μεταβολής των θερμοκρασιών και της έντασης της ακτινοβολίας κατά την διάρκεια της 2ης ημέρας λειτουργίας του συστήματος

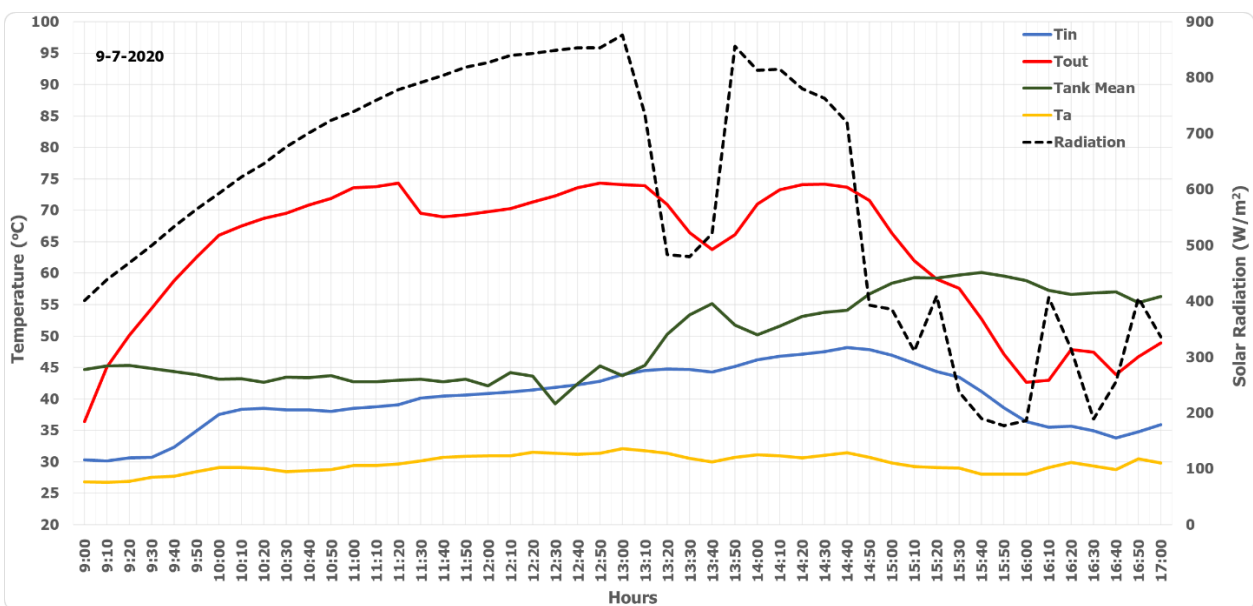


Figure 3.74: Διάγραμμα μεταβολής των θερμοκρασιών και της έντασης της ακτινοβολίας κατά την διάρκεια της 3ης ημέρας λειτουργίας του συστήματος

Στο πρώτο τριήμερο λειτουργίας 7-9 Ιουλίου, παρατηρείται ότι με εξαίρεση την πρώτη ημέρα λειτουργίας που η ακτινοβολία έχει μια ομαλή διακύμανση, τις άλλες δύο ημέρες η ακτινοβολία παρουσιάζει μια ασυνέχεια για κάποιες ώρες. Αυτή η ασυνέχεια σχετίζεται με τις καιρικές συνθήκες που υπήρχαν εκείνο το διήμερο, και έχει αντίκτυπο στις θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου του ρευστού, καθώς και στην χρονική στιγμή κατά την οποία υπάρχει

μεγιστοποίηση του νερού στην δεξαμενή. Το νερό στην δεξαμενή φτάνει στην μέγιστη τιμή του στο τέλος της δεύτερης ημέρας λειτουργίας (17.00) εμφανίζοντας χρονική υστέρηση, αφού η ακτινοβολία και η μέγιστη τιμή της θερμοκρασίας του δοχείου αποθήκευσης δεν επιτυγχάνονται ταυτόχρονα κυρίως λόγω της θερμικής αδράνειας του συστήματος και της μίξης στο εσωτερικό της δεξαμενής.

Στο διήμερο 11-12 Ιουλίου (Fig. 3.4-3.5) παρατηρείται μια ομαλή διακύμανση της θερμοκρασίας του νερού στην δεξαμενή, η οποία σχετίζεται άμεσα με την ακτινοβολία, η οποία κατά την διάρκεια των ημερών είναι παρόμοια. Ακόμα, η ομαλή διακύμανση του νερού στην δεξαμενή σχετίζεται και με την θερμοκρασία περιβάλλοντος που δεν μεταβάλλεται δραματικά αυτές τις δύο ημέρες. Τέλος, το νερό στην δεξαμενή φτάνει στην μέγιστη τιμή του προς το τέλος της δεύτερης ημέρας (16.40).

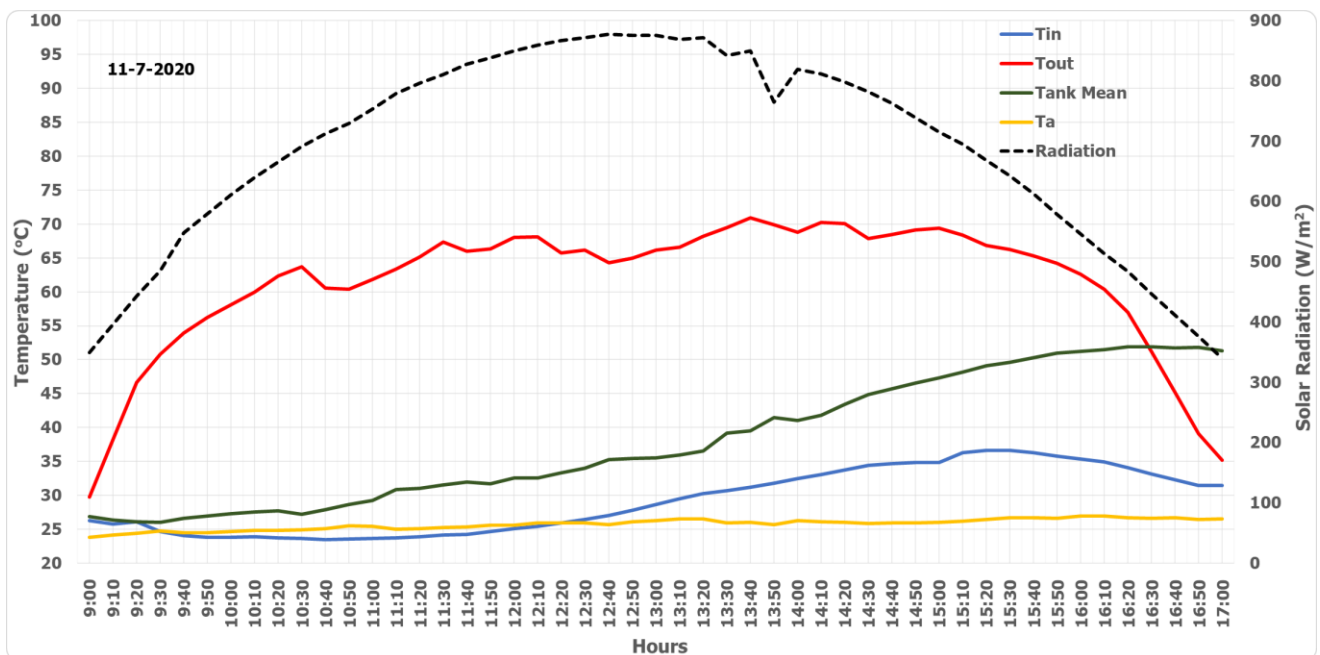


Figure 3.75: Διάγραμμα μεταβολής των θερμοκρασιών και της έντασης της ακτινοβολίας κατά την διάρκεια της 4ης ημέρας λειτουργίας του συστήματος

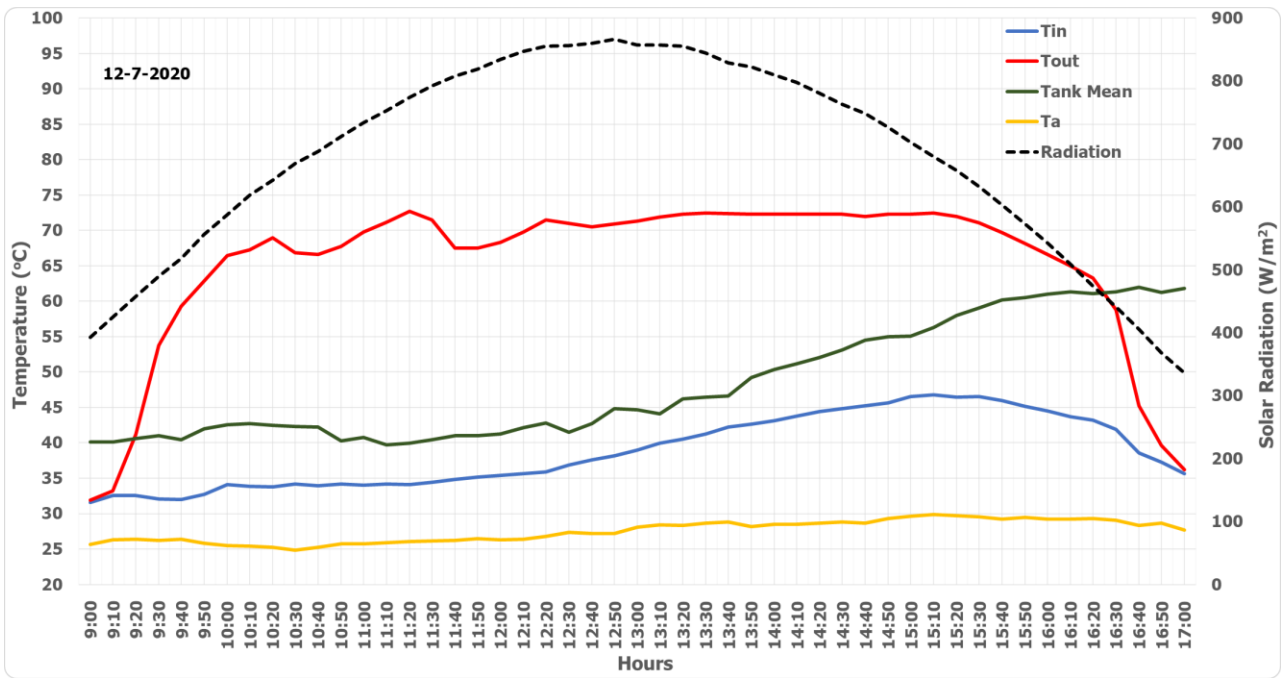


Figure 3.76: Διάγραμμα μεταβολής των θερμοκρασιών και της έντασης της ακτινοβολίας κατά την διάρκεια της 5ης ημέρας λειτουργίας του συστήματος

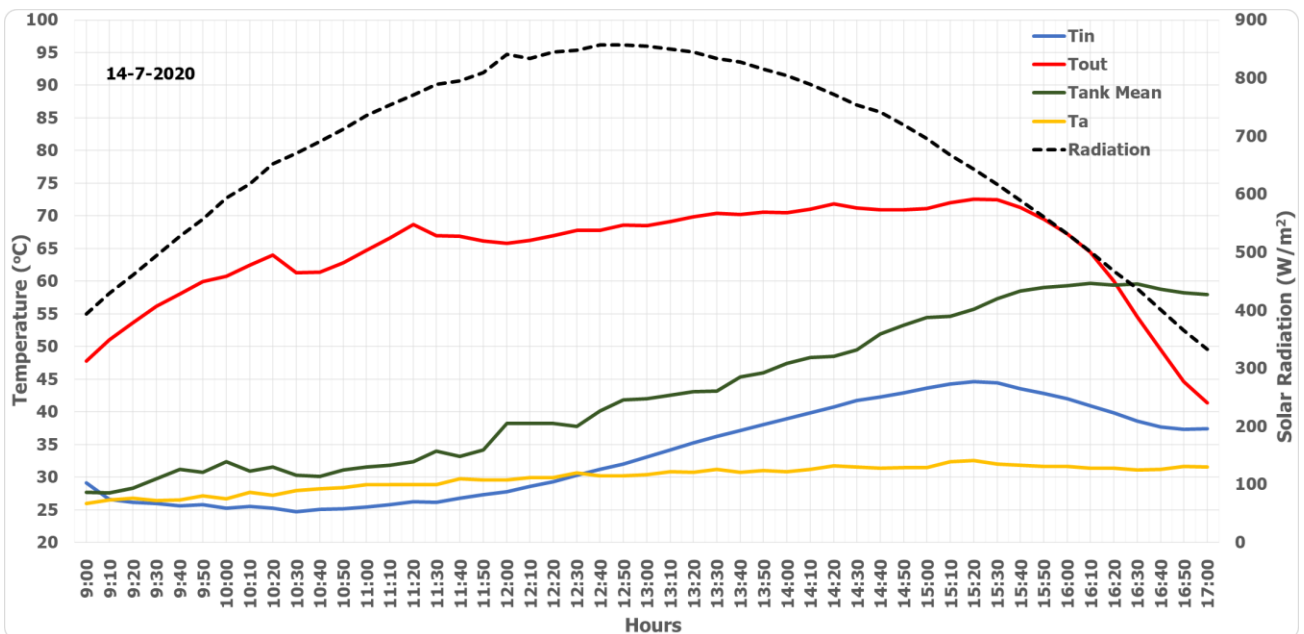


Figure 3.77: Διάγραμμα μεταβολής των θερμοκρασιών και της έντασης της ακτινοβολίας κατά την διάρκεια της 6ης ημέρας λειτουργίας του συστήματος

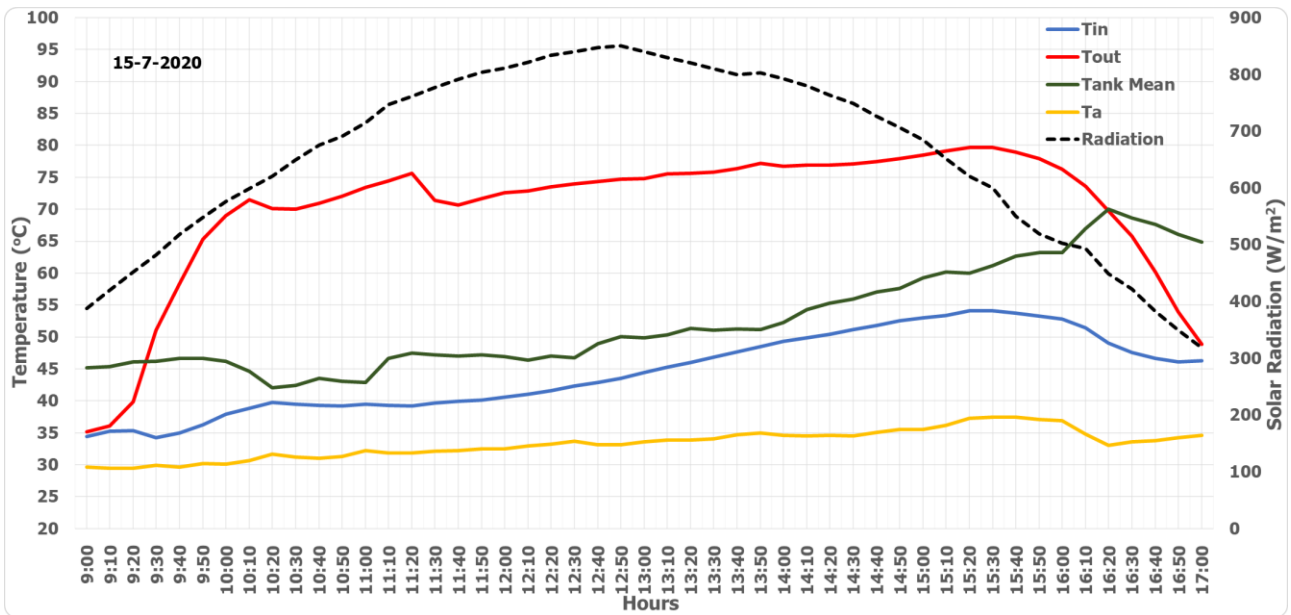


Figure 3.78: Διάγραμμα μεταβολής των θερμοκρασιών και της έντασης της ακτινοβολίας κατά την διάρκεια της 7ης ημέρας λειτουργίας του συστήματος

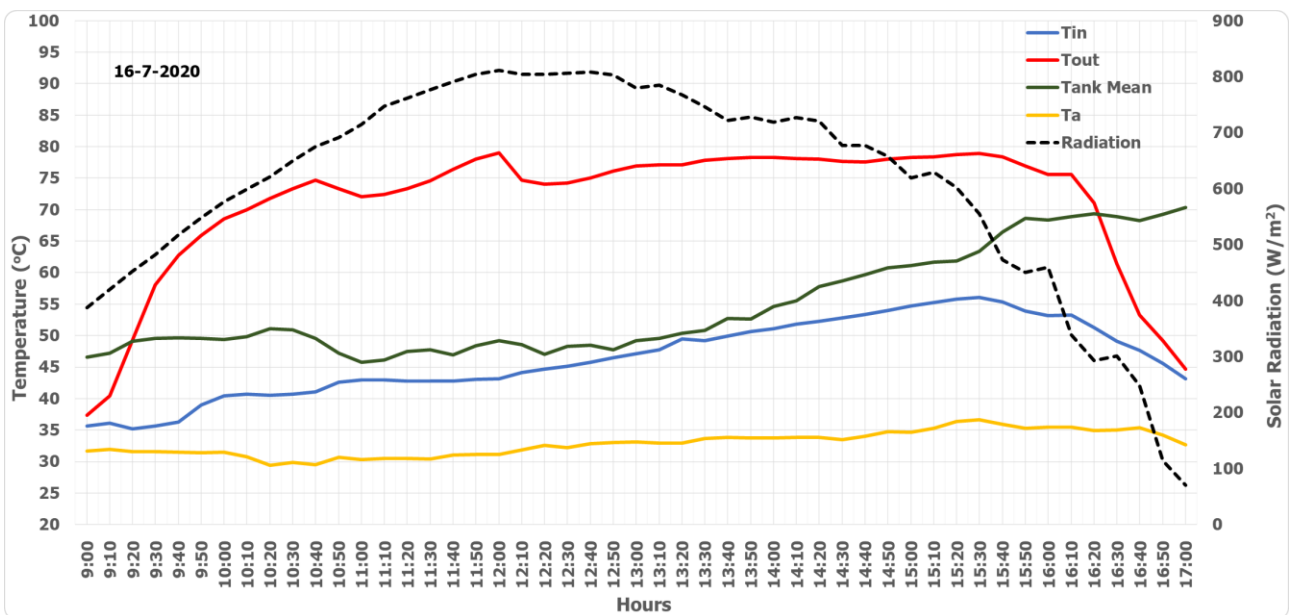


Figure 3.79: Διάγραμμα μεταβολής των θερμοκρασιών και της έντασης της ακτινοβολίας κατά την διάρκεια της 8ης ημέρας λειτουργίας του συστήματος

Τα παραπάνω τρία διαγράμματα (Fig. 3.6-3.8), αντιπροσωπεύουν το τριήμερο 14-16 Ιουλίου, στο επικρατούσαν υψηλές τιμές θερμοκρασίας περιβάλλοντος και με εξαίρεση την τελευταία ημέρα, υψηλές τιμές ακτινοβολίας. Στο πρώτο διάγραμμα παρατηρείται ότι έχει προηγηθεί απομάστευση, δηλαδή εξαγωγή ποσότητας νερού από την δεξαμενή και συμπλήρωσή της με νερό από το δίκτυο. Αυτή η διεργασία σε συνδυασμό με

τις καλές καιρικές συνθήκες επιτυγχάνουν μια απότομη και γρήγορη αύξηση της θερμοκρασίας του νερού στην δεξαμενή. Το νερό στην δεξαμενή φτάνει στην μέγιστη τιμή του χωρίς το απόγευμα της δεύτερης ημέρας (16.30), ενώ την τρίτη ημέρα παραμένει σε πολύ υψηλές τιμές παρά τις αυξομειώσεις της ακτινοβολίας.

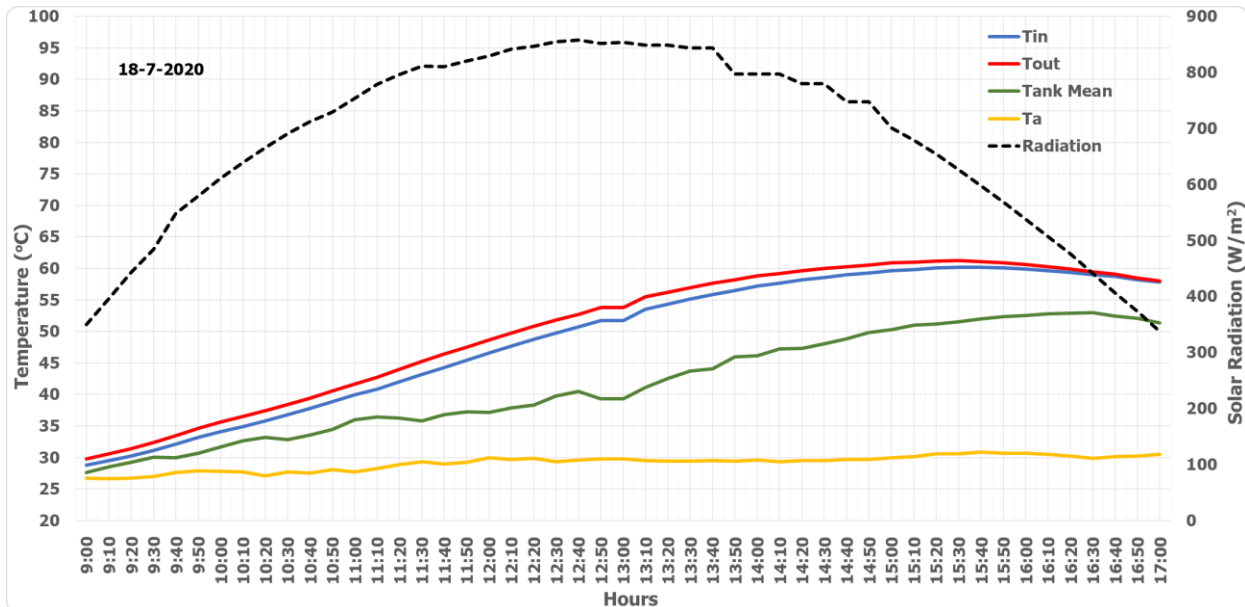


Figure 3.80: Διάγραμμα μεταβολής των θερμοκρασιών και της έντασης της ακτινοβολίας κατά την διάρκεια της 9ης ημέρας λειτουργίας του συστήματος

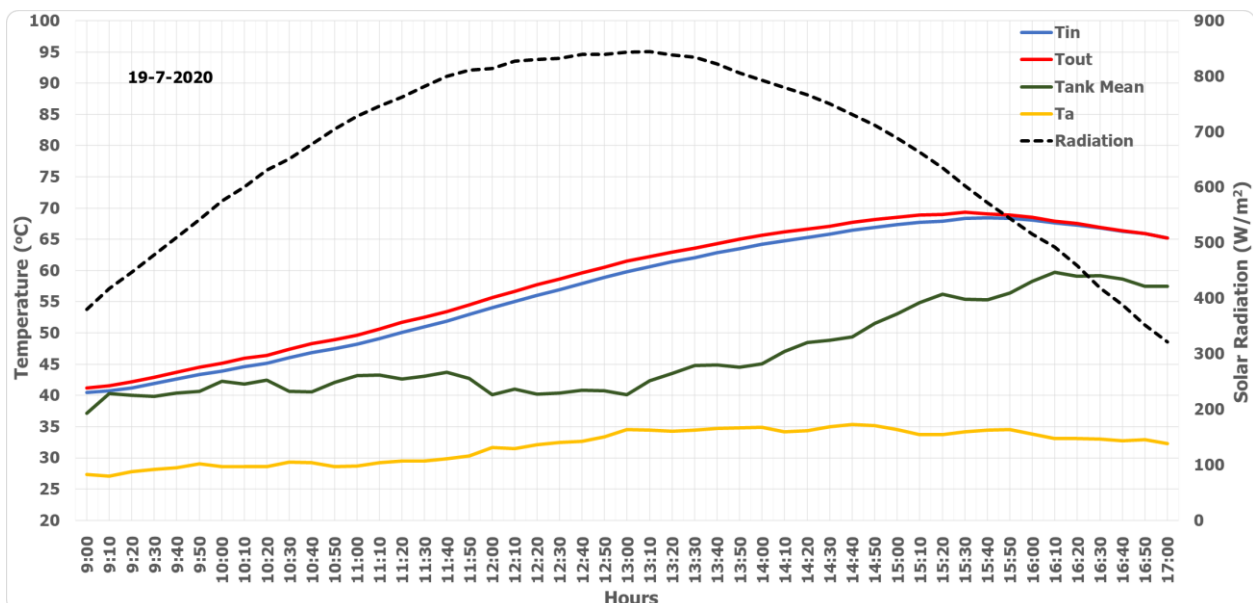


Figure 3.81: Διάγραμμα μεταβολής των θερμοκρασιών και της έντασης της ακτινοβολίας κατά την διάρκεια της 10ης ημέρας λειτουργίας του συστήματος

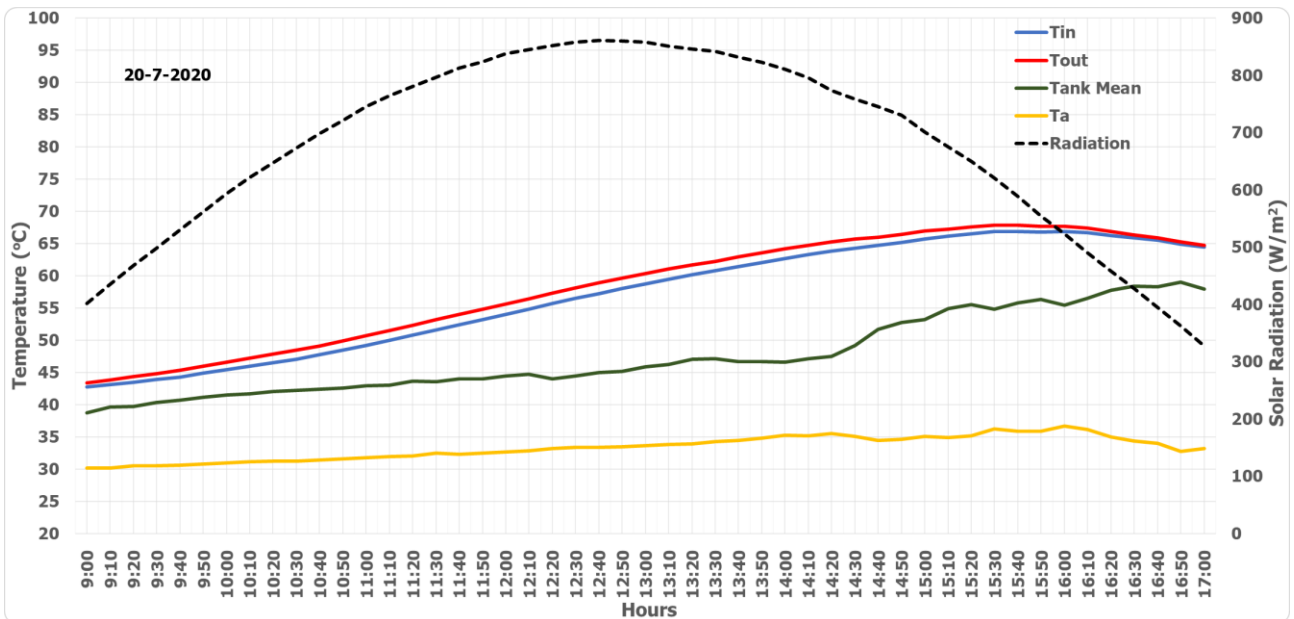


Figure 3.82: Διάγραμμα μεταβολής των θερμοκρασιών και της έντασης της ακτινοβολίας κατά την διάρκεια της 11ης ημέρας λειτουργίας του συστήματος

Τα τελευταία τρία διαγράμματα, αντιπροσωπεύουν το τελευταίο τριήμερο λειτουργίας της διάταξης, 18-20 Ιουλίου, στο οποίο υπήρχαν πολύ καλές καιρικές συνθήκες, όπως φαίνεται από τις τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Η θερμοκρασία του νερού στην δεξαμενή έφτασε στην υψηλότερη τιμή της προς το απόγευμα της δεύτερης ημέρας (16.10), ενώ και την τελευταία ημέρα διατήρησε τις υψηλές τιμές της. Τέλος, η ομαλή διακύμανση της θερμοκρασίας του νερού που παρατηρείται αυτές τις ημέρες, σχετίζεται άμεσα με την ακτινοβολία, η οποία κατά την διάρκεια των ημερών είναι παρόμοια.

Με την παραπάνω παρουσίαση των διαγραμμάτων μεταβολής της θερμοκρασίας του θερμαντικού μέσου και του νερού στην δεξαμενή, κατά την διάρκεια διήμερης ή τριήμερης πειραματικής λειτουργίας, διαπιστώνεται αν η διάταξη ικανοποιεί τις απαιτήσεις για την παραγωγή και την διατήρηση ζεστού νερού. Η επιλογή των δύο ή τριών συνεχόμενων ημερών που ήταν οι μετρήσεις, έγινε καθώς δεν εμφανίζεται περαιτέρω αύξηση της τοπικής μέσης θερμοκρασίας του νερού εντός της δεξαμενής πέραν του διημέρου ή τριημέρου αντίστοιχα.

3.4.2. Υπολογισμός στιγμιαίας απόδοσης συλλέκτη

Για τον υπολογισμό της στιγμιαίας απόδοσης του συλλέκτη, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος που αναλύθηκε παραπάνω στην ενότητα 3.2.1.

Αρχικά, από τις συνολικές ημέρες που έγιναν οι πειραματικές μετρήσεις του συστήματος, επιλέγονται αυτές οι οποίες έχουν σταθερές συνθήκες λειτουργίας. Επομένως, την δεύτερη, τρίτη και όγδοη ημέρα μετρήσεων, στις οποίες η ηλιακή ακτινοβολία παρουσιάζει ασυνέχεια για μεγάλα χρονικά διαστήματα, επηρεάζοντας την θερμοκρασία του θερμαντικού μέσου στο κλειστό κύκλωμα και την θερμοκρασία του νερού στην δεξαμενή, δεν γίνεται υπολογισμός στιγμιαίας απόδοσης.

Για τις υπόλοιπες ημέρες μετρήσεων, σύμφωνα με την μέθοδο, σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης, γίνεται μέτρηση της θερμοκρασίας εισόδου (T_{in}) και εξόδου (T_{out}) του ρευστού, της συνολικής ακτινοβολίας (G_t) και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος (T_a) στο συγκεκριμένο διάστημα. Επίσης, υπολογίζονται οι στιγμιαίες αποδόσεις (η) και τα αντίστοιχα πηλίκια $(T_{in} - T_a)/G_t$, σχηματίζοντας έτσι τα πειραματικά ζεύγη τιμών (η , $(T_{in} - T_a)/G_t$). Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται η γραφική παράσταση που εκφράζει την μεταβολή της στιγμιαίας απόδοσης του συλλέκτη συναρτήσει της παραμέτρου $(T_{in} - T_a)/G_t$.

Τα δεδομένα που χρειάζονται για τον υπολογισμό της στιγμιαίας απόδοσης και του πηλίκου $(T_{in} - T_a)/G_t$, είναι η ροή του ρευστού απολαβής $\dot{m} = 0.07 \text{ kg/s}$, η οποία είναι μικρή για να διαπιστωθεί η δυνατότητα άμεσης αύξησης της θερμοκρασίας του νερού αποθήκευσης κατά την λειτουργία της διάταξης. Ακόμα, η επιφάνεια του συλλέκτη κενού είναι $A_a = 2.09 \text{ m}^2$, ενώ η ειδική θερμότητα του νερού έχει οριστεί ως $C_{p,w} = 4220 \text{ J/kg}^{-1}\text{K}^{-1}$.

Τα πειραματικά ζεύγη τιμών που υπολογίστηκαν, καθώς και η γραφική παράσταση μεταβολής της στιγμιαίας απόδοσης του συλλέκτη την περίοδο λειτουργίας του, φαίνονται παρακάτω:

η	0.36	0.38	0.42	0.46	0.50	0.46	0.47	0.39	0.35	0.36	0.52
$(T_{in} - T_a)/G_t$	0.014	0.018	0.019	0.018	0	0.012	0.013	0.011	0.020	0.024	0

η	0.43	0.46	0.41	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02
$(T_{in} - T_a)/G_t$	0.019	0.013	0.027	0.047	0.049	0.052	0.051	0.057	0.059	0.056	0.058

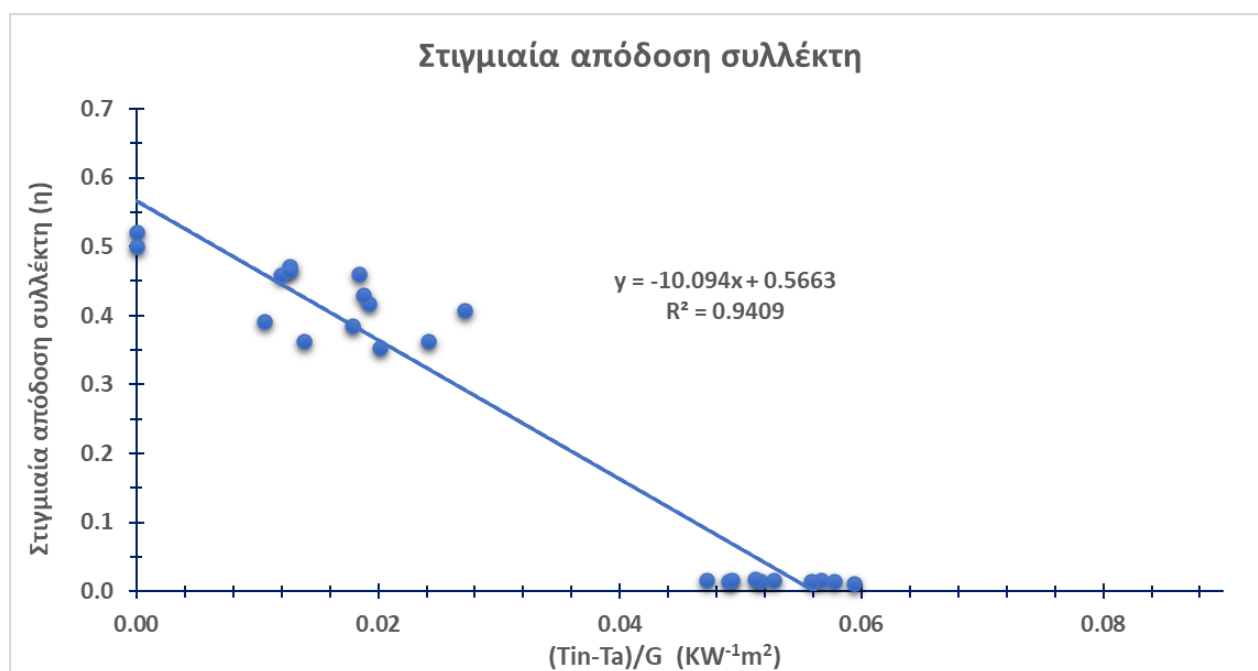


Figure 3.83: Γραφική παράσταση μεταβολής στιγμιαίας απόδοσης συλλέκτη

Από το διάγραμμα παραπάνω προκύπτει ότι, αν θεωρήσουμε ότι οι απώλειες του συλλέκτη παραμένουν σταθερές ($U_L = 0$), η μέγιστη θεωρητική απόδοση του συλλέκτη κενού $\eta = 0.57$, ενώ διαπιστώνεται ότι ο συλλέκτης λειτουργεί στα όρια του κατασκευαστή και είναι σύμφωνος με τις προδιαγραφές.

3.4.3. Υπολογισμός ημερήσιας απόδοσης συστήματος

Για τον υπολογισμό της ημερήσιας απόδοσης του συστήματος, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της μέσης ημερήσιας απόδοσης (MDE) , η οποία αναλύθηκε παραπάνω στην ενότητα 3.2.2.

Σύμφωνα με την μέθοδο, κάθε πειραματική τιμή της μέσης ημερησίας απόδοσης (η_d) του συστήματος καθορίζεται από τις μέσες τιμές της θερμοκρασίας του νερού δεξαμενής κατά την αρχή και το τέλος της πειραματικής διαδικασίας. Ακόμα, γίνεται μέτρηση της μέσης τιμής έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας G_m κατά τη διάρκεια της ημερήσιας λειτουργίας. Επίσης, υπολογίζεται το πηλίκο $\Delta T_m/G_m$, διαμορφώνοντας ένα πειραματικό ζεύγος τιμών ($\eta_d, \Delta T_m/G_m$). Με αυτόν τον τρόπο, δημιουργείται η γραφική παράσταση που εκφράζει την μεταβολή της στιγμιαίας απόδοσης του συλλέκτη συναρτήσει της παραμέτρου $\Delta T_m/G_m$.

Η ημερήσια λειτουργία της διάταξης για τον υπολογισμό της ημερήσιας απόδοσης του συστήματος με την συγκεκριμένη μέθοδο, ορίστηκε να διαρκεί 8 ώρες ($\Delta t=28800\text{sec}$) και αρχίζει από τις 9.00 το πρωί (t_{in}) έως τις 5.00 το απόγευμα (t_{out}). Επιλέχθηκαν οι μέρες στις οποίες υπήρχαν ομαλές συνθήκες λειτουργίας. Ακόμα, κάποια δεδομένα τα οποία χρειάζονται για τον υπολογισμό του πειραματικού ζεύγους τιμών είναι η επιφάνεια του συλλέκτη κενού $A_a=2.09\text{ m}^2$, η ειδική θερμότητα του νερού $C_{p,w}=4220\text{ J/kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ και μάζας $V_t=210\text{lt}$, όπως και η άδεια δεξαμενή νερού μάζας $M_T=70\text{kg}$, ειδικής θερμότητας $C_{p,T}=540\text{ J/Kg}^{-1}\text{K}^{-1}$.

Τα πειραματικά ζεύγη τιμών που υπολογίστηκαν, καθώς και η γραφική παράσταση της μέσης απόδοσης του συστήματος την περίοδο λειτουργίας του, φαίνονται παρακάτω:

η_d	0.03	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02
$\Delta T_m/G_m$	0.48	0.55	0.49	0.46	0.54	0.47

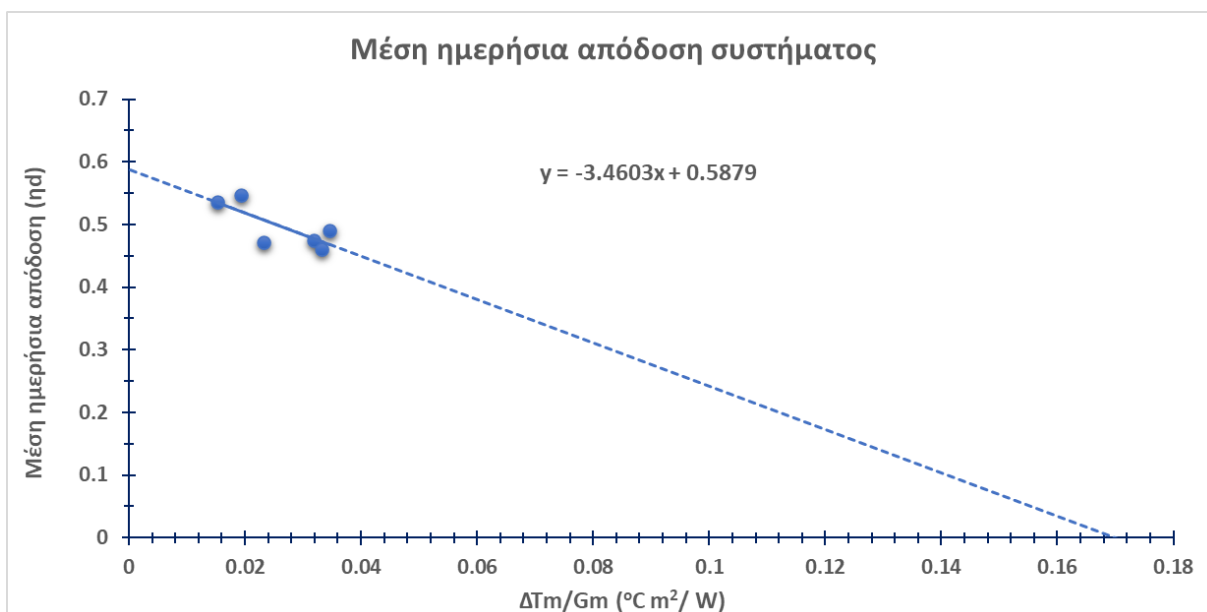


Figure 3.84: Γραφική παράσταση μεταβολής μέσης ημερήσιας απόδοσης συστήματος

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής έγινε η ανάπτυξη, σχεδίαση, κατασκευή και μελέτη ενός πειραματικού ηλιακού θερμικού συστήματος για θέρμανση ζεστού νερού χρήσης.

Το πειραματικό σκέλος της εργασίας, αποσκοπούσε στον υπολογισμό της στιγμιαίας απόδοσης του συλλέκτη και στην ημερήσια απόδοση του συστήματος συλλέκτη – δεξαμενή αποθήκευσης. Από το σύνολο των πειραματικών μετρήσεων επιλέχτηκε η παρουσίαση των διαγραμμάτων ημερήσιας λειτουργίας, στις οποίες υπήρξε η εύρυθμη λειτουργία της διάταξης. Από τα πειραματικά αποτελέσματα λοιπόν, διαπιστώνεται η σωστή λειτουργία της διάταξης με απόδοση η οποία κρίνεται ικανοποιητική, λαμβάνοντας υπόψιν τις κλιματολογικές και τοπικές συνθήκες της περιοχής των Χανίων κατά τον μήνα των μετρήσεων (Ιούλιος).

Ένας βασικός παράγοντας της επιστημονικής αξίας της πειραματικής διάταξης είναι η δυνατότητα της περαιτέρω μελέτης και εξέλιξης της. Αυτό ουσιαστικά σημαίνει ότι η πειραματική διάταξη μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βάση για περαιτέρω μελέτη και εξέλιξη, δημιουργώντας προοπτικές βελτίωσης είτε μέσω νέων διπλωματικών εργασιών, είτε μέσω διαφόρων εργαστηριακών πειραματικών ασκήσεων από τους φοιτητές του Πολυτεχνείου.

Καταρχάς, μια σημαντική προοπτική για εξέλιξη και ανάπτυξη του πειραματικού συστήματος είναι ο υπολογισμός των θερμικών απωλειών της δεξαμενής του νερού κατά την διάρκεια της νύχτας. Ακόμα, μέσω της παραμετροποίησης διάφορων δεδομένων, όπως της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, της ηλιακής ακτινοβολίας, της ογκομετρικής παροχής νερού, της γωνίας κλίσης του συλλέκτη, το είδος του συλλέκτη και της δεξαμενής, μπορούν να εξέλθουν χρήσιμα συμπεράσματα τα οποία θα οδηγήσουν στην περαιτέρω βελτιστοποίηση του θερμικού συστήματος.

Όλα τα στάδια υλοποίησης αυτού του θερμικού συστήματος, αποτέλεσαν μια χρονοβόρα και δύσκολη διαδικασία, από την οποία αποκτήθηκαν σημαντικές γνώσεις και εμπειρία. Η μελέτη του τρόπου

λειτουργίας των ηλιακών συλλεκτών και γενικότερα των ηλιακών θερμικών συστημάτων, η συναρμολόγηση, η υδραυλική – ηλεκτρολογική σύνδεση, η συστηματική παρατήρηση του τρόπου λειτουργίας της πειραματικής διάταξης καθώς και η διαδικασία συλλογής και επεξεργασίας των δεδομένων για τον υπολογισμό των αποδόσεων, δημιούργησε ένα ικανοποιητικό τεχνικό και θεωρητικό υπόβαθρο για την μελλοντική μου σταδιοδρομία.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, *Planning & Installing Solar Thermal Systems*. James & James, 2010.
- [2] "Solar Irradiance and Solar UV Field Measurements."
<https://www.avantes.com/applications/application/item/1165-solar-irradiance-and-solar-uv-field-measurements>.
- [3] Γ. Δ. Α. Καρβούνης Σωτήρης Κ., *Διαχείριση του περιβάλλοντος*. 2000.
- [4] "Solar Photovoltaic PV." <http://www.futuregreenenergy.co.uk/buy-solar/for-home/>.
- [5] "What is Passive House? A beginner's guide," *Insulation Superstore*, 2019.
- [6] Daviddarling, "Active solar energy system," *Active solar energy system*. [Online]. Available:
https://www.daviddarling.info/encyclopedia/A/AE_active_solar_energy_system.html.
- [7] Κ.Α.Π.Ε., "Θερμικά Ηλιακά Συστήματα." 2000.
- [8] Ι. Γκάτσης and Θ. Φουστέρης, "Ανάπτυξη Πειραματικής Συσκευής Ηλιακής Ενέργειας για Θέρμανση Νερού Χρήσης και Χώρου," 2016.
- [9] Δημήτρη Διαμαντίδης, "ΗΛΙΑΚΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ: ΔΕΥΤΕΡΗ ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΗ Η ΕΛΛΑΔΑ ΣΕ ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ," 2018.
<https://greenagenda.gr/ηλιακοί-συλλέκτες-δεύτερη-στην-ευρώπη/>.
- [10] Volker Quaschnig, "Solar thermal water heating," *Renewable Energy World*, pp. 95–99, 2004.
- [11] M. Souliotis, R. Singh, S. Papaefthimiou, I. J. Lazarus, and K. Andriosopoulos, "Integrated collector storage solar water heaters: survey and recent developments," *Energy Syst.*, vol. 7, no. 1, pp. 49–72, 2016, doi: 10.1007/s12667-014-0139-z.

- [12] "Sun Is The Future," 2020.
<http://www.sunisthefuture.net/tag/integrated-collector-storage/>.
- [13] Northern Lights, "Types of Solar Heating System," 2020.
<https://www.solartubs.com/types-of-solar-heating.html>.
- [14] C. Marken and K. Olson, "Closed Loop Antifreeze," pp. 42–49, 2003.
- [15] R. Bannerot, J. Howell, and G. Vliet, *Solar-Thermal Energy Systems, Analysis and Design*. .
- [16] "Stainless Steel Solar Water Tank." <http://www.solarproductcn.com/5-4-solar-water-tank.html>.
- [17] Β. Μελισσάρης, "ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΖΕΣΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΧΡΗΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΩΝ ΧΑΝΙΩΝ: ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ," 2013.
- [18] Greencoast, "Best Solar Pool Heaters 2020," 2019.
<https://greencoast.org/best-solar-pool-heaters/>.
- [19] Ρ. Χριστοδουλάκη, "Θερμικά Ηλιακά Συστήματα Ζεστού Νερού Χρήσης και Θέρμανσης Κολυμβητικών Δεξαμενών."
- [20] Passion Technology, "High Absorption Flat Plate Solar Thermal Collector Aluminum Alloy Frame." <http://www.thermalsolarwaterheater.com/sale-9831839-high-absorption-flat-plate-solar-thermal-collector-aluminum-alloy-frame.html>.
- [21] B. Norton, "Anatomy of a solar collector. Developments in Materials, Components and Efficiency Improvements in Solar Thermal Collector Systems," *Refocus*, vol. 7, no. 3, pp. 32–35, 2006, doi: 10.1016/S1471-0846(06)70570-4.
- [22] W. Fuqiang, C. Ziming, T. Jianyu, Y. Yuan, S. Yong, and L. Linhua, "Progress in concentrated solar power technology with parabolic trough collector system: A comprehensive review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 79, no. April 2020, pp. 1314–1328, 2017, doi:

- 10.1016/j.rser.2017.05.174.
- [23] W. Schiel and T. Keck, "Parabolic dish concentrating solar power (CSP) systems," in *Concentrating Solar Power Technology*, 2012, pp. 284–322.
 - [24] P. G. Jordan, "The Mechanics of Solar Power," in *Solar Energy Markets*, 2014, pp. 7–18.
 - [25] B. G. Miller, "Emerging Technologies for Reduced Carbon Footprint," in *Clean Coal Engineering Technology*, 2017, pp. 669–689.
 - [26] J. Hanania, K. Stenhouse, and J. Donev, "Solar power tower," *Energy Education*. University of Calgary, 2018, [Online]. Available: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Solar_power_tower.
 - [27] M. J. Atkins, M. R. W. Walmsley, and A. S. Morrison, "Integration of solar thermal for improved energy efficiency in low-temperature-pinch industrial processes," *Energy*, vol. 35, no. 5, pp. 1867–1873, 2010, doi: 10.1016/j.energy.2009.06.039.
 - [28] G. Stapleton, S. Neill, and G. Milne, "Photovoltaic systems," *Australia's guide to environmentally sustainable homes*, 2013. <https://www.yourhome.gov.au/energy/photovoltaic-systems>.
 - [29] Β. Μπιτσιώνης, *Εναλλακτικές Μορφές Ενέργειας*. ΕΚΔΟΣΕΙΣ Α. ΤΖΙΟΛΑ & ΥΙΟΙ Α.Ε., 2010.
 - [30] EMEKAT, "ESOL-U," 2020. <http://www.emelcat.gr/categories/14/proionta-iliakoi-syllektes-kenoyesol-u/>.
 - [31] Grundfos Product Center, "ALPHA SOLAR 25-75 180 - 98989300." <https://product-selection.grundfos.com/product-detail.product-detail.html?custid=BGP&lang=ELL&productnumber=98989300&qcid=881499347>.
 - [32] Topsflo, "Solar DC Circulation Pump TS5," 2017.

- <http://www.topsflo.com/special-pumps/ts5-solar-dc-circulation-pump.html#Specifications>.
- [33] Ifm Electronic, "ifm SM6000," 2020.
<https://www.ifm.com/gr/el/product/SM6000?tab=details>.
- [34] Omni instruments, "CMP3 Pyranometer," 2018.
<https://www.omniinstruments.co.uk/cmp3-pyranometer.html>.
- [35] Vector Instruments, "Anemometers," 2020.
<https://www.windspeed.co.uk/ws/index.php?option=displaypage&op=page&Itemid=48>.
- [36] WIKA Alexander Wiegand SE & Co., "Bourdon tube pressure gauge," 2020.
https://en.wika.com/landingpage_bourdon_tube_pressure_gauge_en_co.WIKA.
- [37] Mohammad A. Malek, "Introduction to Pressure Relief Devices - Part 1," *ValveMagazine*, 2016.
<https://www.valvemagazine.com/magazine/sections/back-to-basics/7322-pressure-relief-devices-part-1.html>.
- [38] Campbell Scientific, "Data Loggers," 2020.
<https://www.campbellsci.com/data-loggers>.
- [39] Campbell Scientific, "CR1000X," 2020.
- [40] Σ. Ανδριοπούλου, "ΜΕΛΕΤΗ ΘΕΡΜΟΣΙΦΩΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ TRNSYS," Πανεπιστήμιο Πατρών, 2009.
- [41] Ε. ΣΟΥΛΙΩΤΗΣ, "Ολοκληρωμένες Ηλιακές Συσκευές Θέρμανσης νερού με καμπύλα κάτοπτρα και κυλινδρικούς απορροφητές," Πανεπιστήμιο Πατρών, 2003.