



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

Διπλωματική Εργασία

**Πρωτόκολλο διεξαγωγής πειραματικών μετρήσεων σε ηλιοθερμικά
συστήματα ανοικτού και κλειστού κυκλώματος**

Συγγραφέας

ΘΩΜΟΠΟΥΛΟΣ ΣΥΜΕΩΝ

ΑΜ: 272017069

Επιβλέπων:

Κοσμάς Καββαδίας

Αναπληρωτής Καθηγητής

Αθήνα, Ιούνιος 2022



**UNIVERSITY OF WEST ATTICA
SCHOOL
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING**

Diploma Thesis

**Development of an experimental protocol for comparing open and closed circuit
solar thermal systems**

Student name and surname:

THOMOPOULOS SYMEON

Registration Number: 272017069

Supervisor name and surname:

Kosmas Kavadias

Associate Professor

Athens, June 2022



Τίτλος εργασίας

**Πρωτόκολλο διεξαγωγής πειραματικών μετρήσεων σε ηλιοθερμικά συστήματα
ανοικτού και κλειστού κυκλώματος**

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή

Η διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

Α/α	ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ	ΒΑΘΜΙΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ
	Κ.Α Καβαδιάς	Αναπληρωτής Καθηγητής	
	Κ.-Στ. Νίκας	Καθηγητής	
	Δ. Ζαφειράκης	Επίκουρος Καθηγητής	

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Συμεών Θωμόπουλος του Νικολάου-Ευάγγελου, με αριθμό μητρώου 272017069 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής/διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

**Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι και έπειτα από αίτηση μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση του επιβλέποντα καθηγητή*

Ο/Η Δηλών/ούσα



(Υπογραφή)

*** Ονοματεπώνυμο /Ιδιότητα**

Ψηφιακή Υπογραφή Επιβλέποντα

** Σε εξαιρετικές περιπτώσεις και μετά από αιτιολόγηση και έγκριση του επιβλέποντα, προβλέπεται χρονικός περιορισμός πρόσβασης (embargo) 6-12 μήνες. Στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να υπογράψει ψηφιακά ο/η επιβλέπων/ούσα καθηγητής/τρια, για να γνωστοποιεί ότι είναι ενημερωμένος/η και συναινεί. Οι λόγοι χρονικού αποκλεισμού πρόσβασης περιγράφονται αναλυτικά στις πολιτικές του Ι.Α. (σελ. 6):*

https://www.uniwa.gr/wp-content/uploads/2021/01/%CE%A0%CE%BF%CE%BB%CE%B9%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%B5%CC%81%CF%82_%CE%99%CE%B4%CF%81%CF%85%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%BF%CF%85%CC%81_%CE%91%CF%80%CE%BF%CE%B8%CE%B5%CF%84%CE%B7%CF%81%CE%B9%CC%81%CE%BF%CF%85_final.pdf.

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κύριο Κοσμά Καββαδία, για την υπομονή, την επιμονή και τις συμβουλές που προσέφερε για την υλοποίηση της παρούσας διπλωματικής. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την βοήθεια και στήριξη που μου παρείχε στη διάρκεια διεκπεραίωσης της διπλωματικής. Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στους ανθρώπους που ήταν κοντά μου σε όλη την διάρκεια φοίτησης και ειδικότερα στον Νίκο για την φιλία και την συνεργασία όλα αυτά τα χρόνια.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στη παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική ανασκόπηση σε κάθε είδος ηλιακού συλλέκτη, με επίκεντρο τον επίπεδο ηλιακό συλλέκτη ελεύθερης και βεβιασμένης ροής. Αρχικά, περιγράφονται εισαγωγικά στοιχεία περί της ηλικιακής ενέργειας. Συγκεκριμένα, αναλύονται η ιστορική αναδρομή των ηλιακών συλλεκτών, οι κατηγορίες που υπάρχουν στην αγορά, οι συνθήκες λειτουργίας τους, καθώς και τα τεχνικά τους χαρακτηριστικά. Γίνεται η σύγκριση των διαφόρων τύπων συλλεκτών, ειδικότερα των θερμοσιφωνικών συστημάτων ελεύθερης και βεβιασμένης ροής, όσον αφορά την μέγιστη απόδοση τους και τη συνάφεια της αντίστοιχης θεωρίας σφάλματος για τον εκάστοτε συλλέκτη. Ερευνάται μια θεωρία σφάλματος μετάδοσης η οποία υποθετικά θα μπορούσε να εισαχθεί στις πειραματικές μετρήσεις. Αυτή η θεωρία μπορεί να εξακριβώσει τη διάδοση του σφάλματος και την διακύμανση του βαθμού απόδοσης. Εν συνεχεία, παρουσιάζεται η ενδεικτική πειραματική διάταξη στον ερευνητικό χώρο του πανεπιστημίου, για την καταγραφή των απαιτούμενων μετρήσεων. Συμπληρωματικά, αναλύεται η μεθοδολογία λήψης των πειραματικών μετρήσεων καθώς και οι εξισώσεις που συμπεριλαμβάνονται σε αυτήν. Καταλήγοντας, αναλύονται τα συμπεράσματα και προτεινόμενες ιδέες για την υλοποίηση του πειράματος.

Λέξεις κλειδιά: θερμοσιφωνικό σύστημα, βεβιασμένης ροής, ελεύθερης ροής ,ηλιακός συλλέκτης, σφάλμα, τυπική απόκλιση, βαθμός απόδοσης.

ABSTRACT

In the present dissertation, a bibliographic review was performed on each type of solar collector, focusing on the flat solar collector of natural and forced circulation. Firstly, introductory data on the solar energy are described. Specifically, the historical background of solar panels, the categories that are available in the market, their operating conditions, as well as their technical characteristics are analyzed. The different types of collectors are compared, in particular the natural and forced circulation water heating systems, in terms of their maximum efficiency and the relevance of the respective error theory for each collector. A transmission error theory is being investigated which could hypothetically be introduced into the experimental measurements. This theory can determine the propagation of the error and the variation of the degree of performance. Furthermore, the indicative experimental layout in the research area of the university is presented, for the recording of the required measurements. Additionally, the methodology of taking experimental measurements as well as the equations included are analyzed. Finally, the conclusions and suggested ideas for the implementation of the experiment are analyzed.

Keywords: Thermosiphonic system, forced circulation, natural circulation, solar collector, error, standard deviation, efficiency.

Περιεχόμενα

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ	10
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	11
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	12
ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ.....	13
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	14
1. ΗΛΙΟΘΕΡΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ	15
1.1. Ο ΉΛΙΟΣ.....	15
1.2. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΣΤΑ ΗΛΙΟΘΕΡΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ.....	16
1.3. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	17
<i>1.3.1. Άμεσα ενεργητικά συστήματα.....</i>	<i>19</i>
<i>1.3.2. Έμμεσα ενεργητικά συστήματα</i>	<i>21</i>
1.4. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΩΝ ΗΛΙΟΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ	22
1.5. ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	24
<i>1.5.1. Επίπεδοι συλλέκτες</i>	<i>24</i>
<i>1.5.2. Συλλέκτες κενού</i>	<i>25</i>
<i>1.5.3. Συγκεντρωτικοί συλλέκτες</i>	<i>27</i>
1.6. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΗΛΙΟΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ	28
1.7. ΣΥΝΟΨΗ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ.....	29
2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΗΛΙΟΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ 32	
2.1. ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΚΑΙ ΑΠΟΔΟΣΗ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ	35
<i>2.1.1. Απόδοση και συντελεστής απωλειών επίπεδου συλλέκτη με επιλεκτική</i> <i>επιφάνεια.....</i>	<i>36</i>
<i>2.1.2. Απόδοση και συντελεστής απωλειών επίπεδου συλλέκτη με μονό</i> <i>μάυρο τζάμι.....</i>	<i>37</i>
<i>2.1.3. Απόδοση και συντελεστής απωλειών επίπεδου συλλέκτη χωρίς τζάμι</i> <i>38</i>	<i>38</i>
<i>2.1.4. Απόδοση και συντελεστής απωλειών επίπεδου συλλέκτη κενού</i> <i>(Evacuated tubular)</i>	<i>39</i>
2.2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΛΛΩΝ ΕΡΕΥΝΩΝ.....	43
<i>2.2.1. Σύγκριση F.P.T.U και I.C.S.....</i>	<i>43</i>
<i>2.2.2. Πειραματική μελέτη ενός FTPU και χρήση TRNSYS.....</i>	<i>46</i>
<i>2.2.3. Πειραματική ανάλυση θερμικής απόδοσης ηλιακών συλλεκτών</i> <i>επίπεδης πλάκας και κενού σωλήνα σε σταθερές τυπικές και καθημερινές</i> <i>συνθήκες.....</i>	<i>47</i>
<i>2.2.5. Αριθμητική και πειραματική μελέτη θερμοσιφωνικού συστήματος</i> <i>βεβιασμένης ροής.....</i>	<i>50</i>
<i>2.2.6. Πειραματική μελέτη σε κλειστό θερμοσιφωνικό σύστημα.....</i>	<i>52</i>

2.2.7. Πειραματική μελέτη ηλιακού θερμοσίφωνα με σταθερή ροή για χειμερινές μέρες στο Μπαχρέιν.....	54
2.3. ΣΥΝΟΨΗ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ.....	55
3. ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	58
3.1. ΤΙ ΟΡΙΖΕΤΑΙ ΣΦΑΛΜΑ	58
3.2. ΣΥΣΤΗΜΑΤΙΚΟ ΣΦΑΛΜΑ.....	60
3.3. ΤΥΧΑΙΟ ΣΦΑΛΜΑ	61
3.4. ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΣΦΑΛΜΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	63
3.4.1. Σφάλμα οριζόμενο από τον κατασκευαστή.....	63
3.5. ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ ΣΕ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	64
4. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	67
4.1. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΤΙΚΑ ΟΡΓΑΝΑ.....	67
4.3. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	78
4.4. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	79
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	84
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	86

Ευρετήριο Πινάκων

ΠΙΝΑΚΑΣ 1. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ.....	32
ΠΙΝΑΚΑΣ 2. ΠΡΟΤΥΠΕΣ ΤΙΜΕΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΚΑΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΟΥΣ ΤΥΠΟΥΣ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ.	36
ΠΙΝΑΚΑΣ 3. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΣΥΛΛΕΚΤΗ ΜΕ ΜΟΝΟ ΤΖΑΜΙ.	38
ΠΙΝΑΚΑΣ 4. ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ ΧΩΡΙΣ ΚΑΛΥΜΜΑ.	38
ΠΙΝΑΚΑΣ 5. ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ ΚΕΝΟΥ.	43
ΠΙΝΑΚΑΣ 6. ΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ ΣΥΓΚΡΙΣΗΣ.....	51
ΠΙΝΑΚΑΣ 7. ΜΕΤΡΗΤΙΚΑ ΟΡΓΑΝΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ.	53
ΠΙΝΑΚΑΣ 8. RME ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΠΟΥ ΜΠΟΡΟΥΝ ΝΑ ΕΧΟΥΝ ΟΙ ΤΙΜΕΣ.....	53
ΠΙΝΑΚΑΣ 9. ΣΥΜΠΤΥΞΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΠΟ ΤΙΣ ΕΡΕΥΝΕΣ.	57
ΠΙΝΑΚΑΣ 10. ΘΕΡΜΟΖΕΥΓΟΣ [31].	71
ΠΙΝΑΚΑΣ 11. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΥΡΑΝΟΜΕΤΡΟΥ [32].	73
ΠΙΝΑΚΑΣ 12. ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΤΑΓΡΑΦΙΚΟΥ ΙΣΧΥΟΣ [33].....	74
ΠΙΝΑΚΑΣ 13. ΤΥΠΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΓΙΑ ΕΠΙΠΕΔΟΥΣ ΗΛΙΑΚΟΥΣ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ (ΤΕΕ).	81
ΠΙΝΑΚΑΣ 14. ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.	83

Ευρετήριο Σχημάτων

ΣΧΗΜΑ 1. ΘΕΡΜΟΣΙΦΩΝΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ.....	20
ΣΧΗΜΑ 2. ΔΙΑΤΑΞΗ ICS.	21
ΣΧΗΜΑ 3. ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ.	23
ΣΧΗΜΑ 4. ΕΠΙΠΕΔΟΣ ΣΥΛΛΕΚΤΗΣ.....	25
ΣΧΗΜΑ 5. ΣΥΛΛΕΚΤΗΣ ΚΕΝΟΥ.....	26
ΣΧΗΜΑ 6. ΗΛΙΑΚΟΣ ΣΥΛΛΕΚΤΗΣ ΚΕΝΟΥ ΜΕ ΣΩΛΗΝΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ.	27
ΣΧΗΜΑ 7. ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ.....	28
ΣΧΗΜΑ 8. ΘΕΡΜΟΣΙΦΩΝΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ ΡΟΗΣ (ΘΕΡΜΟΣΙΦΩΝΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ).....	31
ΣΧΗΜΑ 9. ΘΕΡΜΟΣΙΦΩΝΑΣ ΒΕΒΙΑΣΜΕΝΗΣ ΡΟΗΣ.	31
ΣΧΗΜΑ 10. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.	35
ΣΧΗΜΑ 11. ΣΥΛΛΕΚΤΗΣ ΕΠΙΛΕΚΤΙΚΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ CALPAK M4.	37
ΣΧΗΜΑ 12. F.P.T.U. vs I.C.S.....	44
ΣΧΗΜΑ 13. ΜΕΤΡΗΤΙΚΑ ΟΡΓΑΝΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ.	44
ΣΧΗΜΑ 14. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ Z.....	45
ΣΧΗΜΑ 15. ΑΠΟΔΟΣΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ Z.....	46
ΣΧΗΜΑ 16. ΑΠΟΔΟΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕ ΤΟ TRNSYS ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ Z.	47
ΣΧΗΜΑ 17. ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ ΚΕΝΟΥ ΚΑΙ ΕΠΙΠΕΔΩΝ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ ΠΟΥ ΛΑΜΒΑΝΟΝΤΑΙ ΣΕ ΣΧΕΔΟΝ ΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΕ $G = 1000 \text{ W/m}^2$	48
ΣΧΗΜΑ 18. ΑΠΟΔΟΣΗ ΔΟΚΙΜΑΣΜΕΝΩΝ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ: ΣΤΑ ΑΡΙΣΤΕΡΑ, ΑΠΟΔΟΣΗ ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ, ΣΤΑ ΔΕΞΙΑ: ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΑΠΟΔΟΣΗ.....	49
ΣΧΗΜΑ 19. ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΟΥΣ ΤΥΠΟΥΣ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ.	50
ΣΧΗΜΑ 20. ΑΠΟΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΣΙΦΩΝΙΚΟΥ ΚΛΕΙΣΤΗΣ ΡΟΗΣ ΚΑΙ ΤΟΥ Z.	51
ΣΧΗΜΑ 21. ΒΑΘΜΟΙ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ Z ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΔΥΟ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ.....	52
ΣΧΗΜΑ 22. ΑΠΟΔΟΣΗ ΣΥΛΛΕΚΤΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ Z.	54
ΣΧΗΜΑ 23. ΜΕΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥ.	55
ΣΧΗΜΑ 24. ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΥΠΙΚΗΣ ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ.	60
ΣΧΗΜΑ 25. ΤΥΠΙΚΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΟΥΣ ΕΠΙΠΕΔΟΥΣ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ (ΤΕΕ).....	81

Ευρετήριο Εικόνων

ΕΙΚΟΝΑ 1. ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΘΕΡΜΟΣΙΦΩΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ (ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΤΥΠΟΥ).....	67
ΕΙΚΟΝΑ 2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΒΕΒΙΑΣΜΕΝΗΣ ΡΟΗΣ (ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ).....	68
ΕΙΚΟΝΑ 3. ΘΕΡΜΟΔΟΧΕΙΟ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ.....	69
ΕΙΚΟΝΑ 4. ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ.....	70
ΕΙΚΟΝΑ 5. ΘΕΡΜΟΖΕΥΓΟΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ [31].....	72
ΕΙΚΟΝΑ 6. ΠΥΡΑΝΟΜΕΤΡΟ.....	73
ΕΙΚΟΝΑ 7. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΛΑΚΕΤΑΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΙΣΧΥΟΣ.....	74
ΕΙΚΟΝΑ 8. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΟΡΓΑΝΟΥ ΠΑΡΟΧΗΣ [36].....	75
ΕΙΚΟΝΑ 9. ΑΝΕΜΟΜΕΤΡΟ ΚΑΙ Η ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΤΟΥ.....	76

Ονοματολογία

- ICS: Integrated Collector System
- FPTU: Flat Pate Thermosiphonic Unit
- FCP: Flat Plate Collector
- ETC: Evacuated Tube Collector
- CPC: Compound Parabolic Concentrator
- LFR: Linear Fresnel Reflectors
- PTC: Parabolic Trough Collector
- CTC: Cylindrical Trough Collector
- PDR: Parabolic Dish Reflector
- HFC: Heliostat Field Collector
- TRNSYS: Transient System Simulation Tool
- MLR: Multiple Linear Regression
- RMSE: Root Mean Square Error

Εισαγωγή

Στις μέρες μας η πλειονότητα του πληθυσμού χρησιμοποιεί ηλιακό θερμοσίφωνα τόσο κατά τη χειμερινή περίοδο, όσο και τη καλοκαιρινή. Οι θερμοσίφωνες διακρίνονται σε αρκετά είδη και έχουν μεγάλο φάσμα εγκαταστάσεων, όπως οικίες, βιομηχανίες, ξενοδοχειακές μονάδες κ.λπ. Ειδικότερα, είναι ένα σύστημα που με την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας, μπορεί να προσφέρει ζεστό νερό για χρήση σε κάθε νοικοκυριό, αλλά και ψύξη σε ορισμένες βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Είναι σύστημα, το οποίο όχι μόνο λειτουργεί με το ελάχιστο κόστος, διότι αξιοποιεί την ηλιακή ακτινοβολία, αλλά δεν χρειάζεται άμεση συντήρηση, παρά μόνο κάθε 3 χρόνια.

Η λειτουργία αυτού του συστήματος βασίζεται στη διαφορά της πυκνότητας του ρευστού, η οποία δημιουργείται μέσα σε έναν ηλιακό συλλέκτη, έχοντας ως αποτέλεσμα την κυκλοφορία του ρευστού. Το διεσταλμένο νερό (ζεστό νερό) οδηγείται στην δεξαμενή αποθήκευσης και κρύο νερό εισέρχεται ξανά στον συλλέκτη με σκοπό τη συνέχεια του κύκλου.

Οι ηλιακοί θερμοσίφωνες διαφοροποιούνται ανάλογα με τον τύπο ηλιακού συλλέκτη που είναι εγκατεστημένος, ο οποίος χαρακτηρίζεται από έναν συγκεκριμένο βαθμό απόδοσης. Ο βαθμός απόδοσης για όλους τους τύπους συλλεκτών κυμαίνεται από 10% έως 90%. Ο βαθμός απόδοσης μπορεί να επηρεαστεί σε μικρό ή μεγάλο βαθμό από την ύπαρξη σφάλματος. Το σφάλμα εκφράζει την αδυναμία του μετρητικού οργάνου να ανταποκριθεί στις πραγματικές τιμές. Στη βιβλιογραφία, εντοπίζονται αρκετοί συλλέκτες που παρουσιάζουν κοντινούς βαθμούς απόδοσης, γεγονός που διεγείρει προβληματισμούς σχετικά με την ενσωμάτωση της θεωρίας του σφάλματος για αυτούς τους συλλέκτες.

Η μέγιστη αξιοποίηση του ηλιακού θερμοσίφωνα είναι σημαντική, διότι η πηγή λειτουργίας του είναι η ηλιακή ακτινοβολία, μια πλήρως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, χωρίς περιβαλλοντολογικές επιπτώσεις.

Κεφάλαιο 1

1. Ηλιοθερμικά Συστήματα

1.1. Ο Ήλιος

Ο ήλιος υπήρξε μια ισχυρή παρουσία και δύναμη σε όλη την ιστορία της ανθρώπινης ύπαρξης στη Γη. Έχει θεωρηθεί από πολλούς πολιτισμούς ως θεότητα και οι περισσότεροι κατανοούν ότι είναι η απόλυτη πηγή ζωής σε αυτόν τον πλανήτη, ενώ η ζωογόνος ενέργειά του έχει γίνει εκμεταλλεύσιμη από τον άνθρωπο με διάφορους τρόπους ανά τους αιώνες. Είναι ο αστέρας του ηλιακού μας συστήματος και απέχει 149.6 εκατομμύρια χιλιόμετρα από τον πλανήτη Γη. Η επιφάνειά του έχει θερμοκρασία που ανέρχεται στα 5800K. Επίσης, κάθε χρονική στιγμή προσπίπτουν στην ατμόσφαιρα της Γης 173000W ηλιακής ακτινοβολίας, από την οποία μόνο ένα μικρό ποσοστό από αυτήν καταφέρνει να περάσει μέσα στην επιφάνειά της. Η ηλιακή ενέργεια που φτάνει στην επιφάνεια της Γης είναι 7000W, υπό τις μορφές φωτός, θερμότητας και ακτινοβολίας. Έτσι λοιπόν ο άνθρωπος στράφηκε προς την αξιοποίηση αυτής της ενέργειας δημιουργώντας συστήματα που τη συλλέγουν και άλλοτε την μετατρέπουν σε άλλη μορφή ενέργειας (πχ ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρισμό) ή την αξιοποιούν αυτούσια (πχ θερμότητα του ηλίου σε θέρμανση νερού).

Όσον αφορά τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, αυτές διακρίνονται σε αιολική, υδραυλική, βιομάζα, γεωθερμική και ηλιακή. Η ηλιακή ενέργεια είναι η σημαντικότερη από αυτές, καθώς είναι άφθονη, σταθερή και μπορεί να μετατραπεί σε άλλες μορφές ενέργειας. Εν ολίγοις αποτελεί την τέλεια πηγή ενέργειας. Μία μορφή αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας είναι η θέρμανση τόσο των χώρων, όσο και του νερού. Ο ηλιακός θερμοσίφωνας είναι μια συσκευή που χρησιμοποιείται για τη θέρμανση του νερού καθώς και για την παραγωγή ατμού τόσο για οικιακούς όσο και για βιομηχανικούς σκοπούς με τη χρήση της ηλιακής ενέργειας. Τα σύγχρονα συστήματα που έχουν σχεδιαστεί για τη συλλογή της ηλιακής ενέργειας με σκοπό τη θέρμανση του νερού, είτε για άμεση χρήση είτε για την αποθήκευσή του, έχουν μελετηθεί και τεθεί σε χρήση από τη δεκαετία του 1970, όταν χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά για θέρμανση πισίνας στην Καλιφόρνια. Η συνεχής έρευνα και η καινοτομία έχουν οδηγήσει σε προϊόντα τα οποία είναι πια εφικτά σε πολύ ψυχρότερα και λιγότερο ηλιόλουστα κλίματα [1].

1.2. Ιστορική αναδρομή στα Ηλιοθερμικά Συστήματα

Η ιστορία της αξιοποίησης του ήλιου για την παραγωγή ενέργειας χρονολογείται από τους Αρχαίους Έλληνες και τους Ρωμαίους καθώς τα κτίριά τους κατασκευάζονταν έτσι ώστε οι ακτίνες του ήλιου να παρέχουν φως και θερμότητα στους εσωτερικούς χώρους. Ο Έλληνας φιλόσοφος Σωκράτης έγραψε: «Στα σπίτια που βλέπουν προς το νότο, ο ήλιος διαπερνά την είσοδο τον χειμώνα». Οι Ρωμαίοι εξέλιξαν αυτή την ευρεσιτεχνία καλύπτοντας με γυαλί τα ανοίγματα προς το νότο του κτιρίου, προκειμένου να διατηρήσουν τη ζέστη του χειμερινού ήλιου.

Η ιστορία της εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας στους πρόσφατους χρόνους χρονολογείται από το 1861 όταν ο Mouchout ανέπτυξε ατμομηχανή η οποία τροφοδοτείτο εξ ολοκλήρου από τον ήλιο και το 1883 ο Αμερικανός εφευρέτης Τσαρλς Φριτς περιέγραψε τα πρώτα ηλιακά κύτταρα από δισκία πυριτίου.

Το αραβικό εμπάργκο πετρελαίου το 1973 επιβεβαίωσε τον βαθμό στον οποίο η δυτική οικονομία εξαρτιόταν από τις αραβικές χώρες, καθώς παρείχαν μια φθηνή και αξιόπιστη ροή πετρελαίου. Στη δεκαετία του 1970 θεωρήθηκε ότι μέσω τεράστιων επενδύσεων στη χρηματοδότηση και την έρευνα, το κόστος των ηλιακών φωτοβολταϊκών θα μπορούσε να μειωθεί δραστικά, έτσι ώστε τελικά τα ηλιακά κύτταρα να γίνουν ανταγωνιστικά με τα ορυκτά καύσιμα.

Στα μέσα της δεκαετίας του '50, ο Ισραηλινός μηχανικός, Levi Yissar, πρότεινε τη χρήση ηλιακής ενέργειας για τη θέρμανση του οικιακού νερού, με τους Ισραηλινούς να ανταποκρίνονται με τη μαζική αγορά ηλιακών θερμοσίφωνων. Μέχρι το 1983, το 60% του πληθυσμού ζέσταινε το νερό του από τον ήλιο. Σήμερα, πάνω από το 90% των ισραηλινών νοικοκυριών διαθέτουν ηλιακούς θερμοσίφωνες.

Μέχρι τη δεκαετία του 1990, το κόστος της ηλιακής ενέργειας είχε μειωθεί όπως είχε προβλεφθεί. Η τεράστια ανάπτυξη της αγοράς φωτοβολταϊκών, στη Γερμανία και την Ιαπωνία από τη δεκαετία του 1990 έως σήμερα, έχει τονώσει τη βιομηχανία της ηλιακής ενέργειας, ενώ παράλληλα τέτοιες μεγάλες παραγωγές φωτοβολταϊκών δημιουργούν σταθερά χαμηλότερο κόστος. Εν τω μεταξύ, η θέρμανση του νερού με ηλιακή ενέργεια αποτελεί το πιο αποδοτικό μέσο μείωσης της ζήτησης αερίου και ηλεκτρικής ενέργειας [2].

Τον 19ο αιώνα, οι άνθρωποι χρησιμοποιούσαν μια σόμπα για να ζεστάνουν νερό καίγοντας κομμάτια ξύλου ή κάρβουνου. Στις πόλεις, οι πλουσιότεροι ζέσταιναν το νερό τους με αέριο παραγόμενο από άνθρακα. Σε πολλές περιοχές, το ξύλο, ο άνθρακας ή το φυσικό αέριο δεν μπορούσαν να βρεθούν εύκολα και ως εκ τούτου τέτοια καύσιμα ήταν συχνά ακριβά. Για να αποφευχθούν αυτά τα προβλήματα, δημιουργήθηκε ένας πολύ ευκολότερος και ασφαλέστερος τρόπος θέρμανσης του νερού, ο οποίος στηριζόταν στην τοποθέτηση στον εξωτερικό χώρο ενός κτιρίου, μιας μαύρης μεταλλικής δεξαμενής γεμάτης νερό προκειμένου αυτή να απορροφά ηλιακή ενέργεια. Το μειονέκτημα ήταν ότι ακόμη και σε αρκετά ζεστές μέρες, συνήθως απαιτείτο η λεκάνη να είναι στον ήλιο πολλές ώρες (από νωρίς το πρωί έως το απόγευμα) προκειμένου να ζεσταθεί το νερό. Καθώς ο ήλιος έδυε, η δεξαμενή έχανε γρήγορα τη θερμότητά της επειδή δεν είχε μόνωση [3].

Η ιστορία των Ηλιακών Συλλεκτών Νερού στην Ελλάδα ξεκίνησε όταν οι πρώτοι συλλέκτες εισήχθησαν από το Ισραήλ στα μέσα της δεκαετίας του '70. Ο Σύνδεσμος Ελληνικής Ηλιακής Βιομηχανίας ιδρύθηκε το 1978 και την ίδια περίοδο ξεκίνησε η προώθηση των ηλιακών συστημάτων. Η τεχνολογία των Ηλιακών Θερμοσίφωνων έγινε σε μεγάλο βαθμό αποδεκτή από την αγορά και εγκαταστάθηκαν μικρές μονάδες της τάξης των 2m^2 για να καλύψουν τις ανάγκες ενός νοικοκυριού.

1.3. Συστήματα αξιοποίησης ηλιακής ενέργειας

Οι ηλιακές τεχνολογίες συνήθως ομαδοποιούνται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες, που γενικά διαφέρουν ως προς τον τρόπο συλλογής, αποθήκευσης και χρήσης της ενέργειας. Αυτές οι κατηγορίες είναι: i) φωτοβολταϊκά συστήματα ii) παθητικά συστήματα iii) ενεργητικά συστήματα.

I. Φωτοβολταϊκά συστήματα

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι τα συστήματα εκείνα τα οποία μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική. Πρόκειται για ηλεκτρογεννήτριες, οι οποίες αποτελούνται από ηλιακούς συλλέκτες, συστήματα στήριξης, συσσωρευτές, αντιστροφείς τάσης, μετρητές ενέργειας και ρυθμιστές φόρτισης.

II. Παθητικά ηλιακά συστήματα

Τα παθητικά ηλιακά συστήματα περιλαμβάνουν άμεση χρήση της ακτινοβολίας του ήλιου ως φως ή πιθανώς θερμότητα. Παραδείγματα των παθητικών ηλιακών συστημάτων αποτελούν τα ενεργειακά αποδοτικά παράθυρα, φεγγίτες, θερμοκήπια και υβριδικά φωτιστικά, τα οποία χρησιμοποιούν καλώδιο οπτικών ινών για τη μετάδοση του ηλιακού φωτός στα εσωτερικά δωμάτια [1].

III. Ενεργητικά ηλιακά συστήματα (Ηλιοθερμικά)

Ακολουθούν τα ηλιοθερμικά, τα οποία συλλέγουν και χρησιμοποιούν την ενέργεια του ήλιου ως θερμότητα. Διαφέρουν από την άμεση θέρμανση ως προς την ικανότητά τους να αποθηκεύουν θερμική ενέργεια για μελλοντική χρήση. Οι σύγχρονες εφαρμογές περιλαμβάνουν οικιακή και βιομηχανική θέρμανση νερού, θέρμανση αέρα και χώρων, θέρμανση πλακών με ακτινοβολία, ακόμη και λειτουργία αντλιών θερμότητας και κινητήρων sterling.

Η ενέργεια και το επίπεδο θερμοκρασίας που απαιτείται για την εκτέλεση καθημερινών εργασιών ποικίλλουν. Γενικά, μια παροχή ζεστού νερού οικιακής χρήσης σε θερμοκρασίες από 50 έως 60 βαθμούς Κελσίου θεωρείται ότι είναι αποδεκτή [1].

Τα ηλιακά συστήματα θέρμανσης νερού ταξινομούνται ανάλογα με τον τρόπο θέρμανσης του νερού οικιακής χρήσης ή τον τρόπο με τον οποίο το υγρό μεταφοράς θερμότητας (νερό ή αντιψυκτικό) ρέει μέσα στον συλλέκτη. Με βάση αυτό, υπάρχουν δύο τύποι ηλιακών συστημάτων θέρμανσης νερού: τα άμεσα (ανοιχτός βρόχος) και τα έμμεσα (κλειστό βρόχος) συστήματα.

Τα άμεσα συστήματα (ελεύθερης ροής) θερμαίνουν το νερό καθώς αυτό ρέει απευθείας στον συλλέκτη. Ακόμη, δεν έχουν ηλεκτρικές αντλίες αλλά βασίζονται στη συναγωγή για την κυκλοφορία ζεστού νερού μέσω του συλλέκτη και της δεξαμενής αποθήκευσης (Duffie, 1991). Αντίθετα, τα έμμεσα συστήματα (βεβιασμένης ροής) θερμαίνουν το νερό μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας που χρησιμοποιείται μεταξύ του συλλέκτη και της δεξαμενής αποθήκευσης ζεστού νερού. Συνήθως, χρησιμοποιούν ηλεκτρικά κινούμενες αντλίες για την κυκλοφορία νερού ή άλλου ρευστού απορρόφησης θερμότητας και μερικές φορές χρησιμοποιούν ηλεκτρικές βαλβίδες για προστασία από τον παγετό [4].

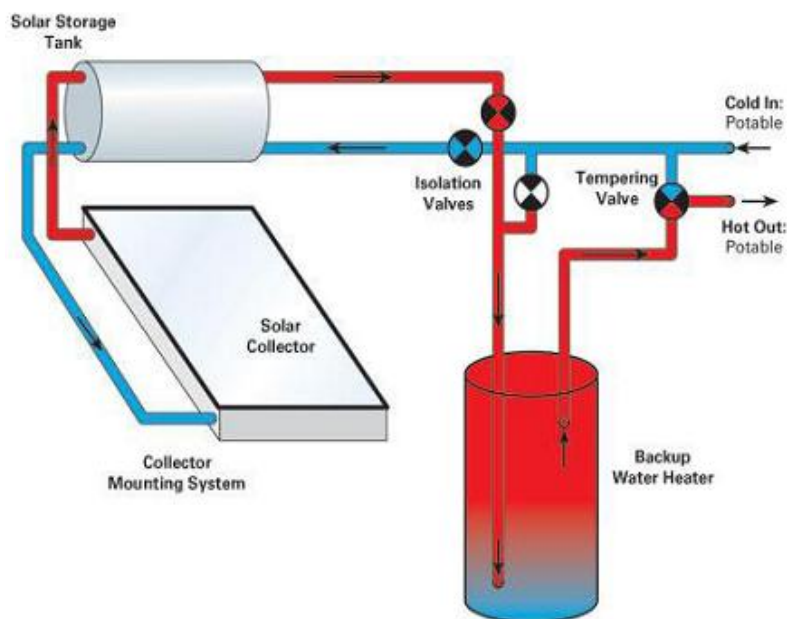
Στα ενεργητικά συστήματα, το ζεστό νερό είτε αποθηκεύεται στον ίδιο τον συλλέκτη είτε μεταφέρεται σε μια δεξαμενή αποθήκευσης που βρίσκεται πάνω από τους συλλέκτες. Υπάρχουν δύο τύποι ενεργητικών συστημάτων: τα άμεσα και τα έμμεσα.

1.3.1. Άμεσα ενεργητικά συστήματα

Τα άμεσα ενεργητικά συστήματα (ανοικτού βρόχου) είναι παρόμοια με τα θερμοσιφωνικά συστήματα, επειδή χρησιμοποιούν ηλιακό συλλέκτη ξεχωριστά από τη δεξαμενή αποθήκευσης. Η διαφορά μεταξύ του απλού θερμοσιφωνικού συστήματος με τα άμεσα ενεργητικά συστήματα, είναι ότι χρησιμοποιούν μια ηλεκτρική αντλία για την κυκλοφορία του νερού από τη δεξαμενή αποθήκευσης στον συλλέκτη και πίσω στη δεξαμενή αποθήκευσης. Αυτά τα συστήματα απαιτούν πάντα μια βαλβίδα αντεπιστροφής για την πρόληψη της αντίστροφης απαγωγής θερμότητας κατά τη διάρκεια της νύχτας [5]. Στα άμεσα συστήματα συμπεριλαμβάνονται τα θερμοσιφωνικά συστήματα και τα συστήματα συλλεκτών πλήρους αποθήκευσης (ICS) τα οποία περιγράφονται συνοπτικά παρακάτω. Τα συστήματα αυτά δεν χρησιμοποιούν αντλίες για την κυκλοφορία νερού ή υγρού συλλέκτη.

A) Θερμοσιφωνικά συστήματα

Ένα τυπικό θερμοσιφωνικό σύστημα παρουσιάζεται στο **Σχήμα 1**. Καθώς η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει στον συλλέκτη, το νερό μέσα στους σωλήνες του συλλέκτη, θερμαίνεται. Καθώς θερμαίνεται, το νερό διαστέλλεται ελαφρώς και γίνεται πιο ελαφρύ (μείωση πυκνότητας) από το κρύο νερό στη δεξαμενή αποθήκευσης που είναι τοποθετημένη πάνω από τον συλλέκτη. Στη συνέχεια, λόγω της βαρύτητας κατεβαίνει το κρύο νερό από τη δεξαμενή και εισέρχεται μέσα στην είσοδο του συλλέκτη. Το κρύο νερό ωθεί το θερμαινόμενο νερό δια της εξόδου του συλλέκτη προς την κορυφή της δεξαμενής, θερμαίνοντας έτσι το νερό στη δεξαμενή, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 1**.



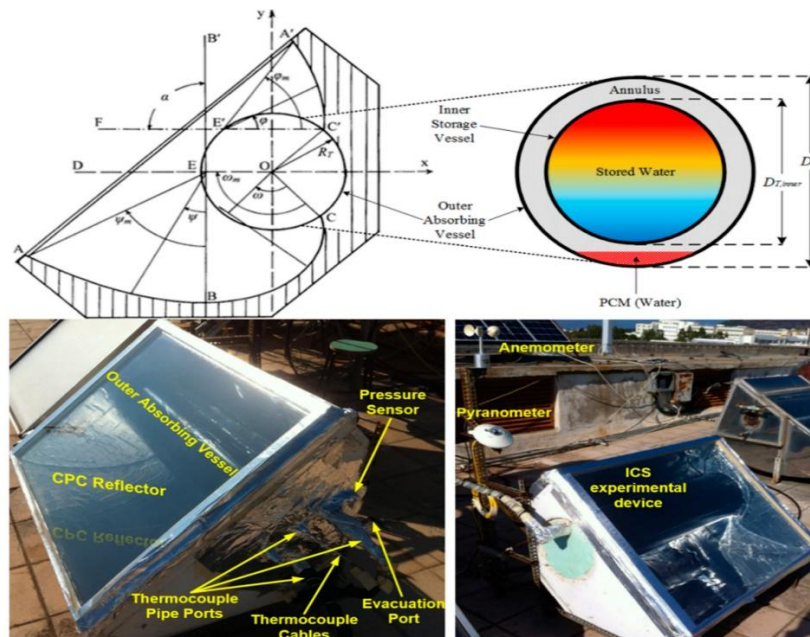
Σχήμα 1. Θερμοσιφωνικό σύστημα.

Ένα θερμοσιφωνικό σύστημα δεν απαιτεί αντλία. Το κρύο νερό από τη γραμμή ύδρευσης του δικτύου ρέει απευθείας στη δεξαμενή της οροφής. Το ηλιακά θερμαινόμενο νερό ρέει από τη δεξαμενή της οροφής στη βοηθητική δεξαμενή που είναι εγκατεστημένη στο επίπεδο του εδάφους κάθε φορά που χρησιμοποιείται νερό εντός της οικίας. Αυτό το σύστημα διαθέτει μια θερμική βαλβίδα που προστατεύει τον συλλέκτη από το παγετό. Περιλαμβάνει επίσης βαλβίδες απομόνωσης, οι οποίες επιτρέπουν στο ηλιακό σύστημα να απομονώνεται χειροκίνητα σε περίπτωση πάγου ή να παρακάμπτεται πλήρως [5].

B) Μονάδες συλλεκτών πλήρους αποθήκευσης (ICS)

Σε συστήματα συλλεκτών πλήρους αποθήκευσης (ICS), το νερό θερμαίνεται απευθείας από τον ήλιο και η δεξαμενή αποθήκευσης χρησιμεύει ως ηλιακός συλλέκτης (Σχήμα 2). Οι συγκεκριμένοι θερμοσίφωνες είναι σχεδόν πάντα άμεσα συστήματα, στα οποία το ζεστό νερό παρέχεται από την ηλιακά θερμαινόμενη δεξαμενή σε μια εφεδρική δεξαμενή ή με τη βοήθεια της πίεσης στο σημείο χρήσης μέσα στο σπίτι. Τις περισσότερες φορές χρησιμοποιείται η τοπική κύρια πίεση νερού από το δίκτυο της περιοχής για την κυκλοφορία του νερού στον συλλέκτη. Το νερό μπορεί επίσης να ρέει λόγω των δυνάμεων άνωσης που δημιουργούνται εξαιτίας της διαφοράς θερμοκρασίας στον συλλέκτη ενώ οι βαλβίδες ελέγχουν την κατεύθυνση ροής.

Αυτά τα συστήματα είναι σχετικά φθηνότερα από τα θερμοσιφωνικά. Το σύστημα είναι απλό γιατί δεν απαιτούνται αντλίες. Κατόπιν ζήτησης ζεστού νερού, κρύο νερό εισέρχεται στον συλλέκτη και ζεστό νερό από τον συλλέκτη πηγαίνει σε μια τυπική βοηθητική δεξαμενή ζεστού νερού μέσα στο σπίτι. Μια βαλβίδα προστασίας από το πάγο, εγκατεστημένη στην υδραυλική εγκατάσταση κοντά στον συλλέκτη, ανοίγει για να επιτρέψει στο σχετικά ζεστό νερό την κυκλοφορία μέσω του συλλέκτη, ώστε να αποτραπεί η ψύξη του [5].



Σχήμα 2. Διάταξη ICS.

1.3.2. Έμμεσα ενεργητικά συστήματα

Τα αντιψυκτικά συστήματα γλυκόλης είναι έμμεσα ενεργητικά συστήματα με εναλλάκτη θερμότητας. Η ανθεκτική στο πάγο, προπυλενογλυκόλη κυκλοφορεί μέσω των ηλιακών συλλεκτών και του εναλλάκτη θερμότητας, ενώ το νερό οικιακής χρήσης κυκλοφορεί από τη δεξαμενή αποθήκευσης μέσω του εναλλάκτη θερμότητας. Το νερό θερμαίνεται μέσα στον εναλλάκτη και στη συνέχεια αποθηκεύεται στη δεξαμενή. Το αντιψυκτικό και το νερό (εάν χρησιμοποιείται εξωτερικός εναλλάκτης θερμότητας) κυκλοφορούν είτε με αντλίες εναλλασσόμενου ρεύματος, που τροφοδοτούνται από το δίκτυο κοινής ωφέλειας, είτε με αντλίες συνεχούς ρεύματος που τροφοδοτούνται από ηλιακή ηλεκτρική φωτοβολταϊκή μονάδα.

Οι πιο συνηθισμένοι τύποι ηλιακών συστημάτων θέρμανσης νερού είναι τα έμμεσα ενεργητικά συστήματα, διότι προσφέρουν αρκετά καλή προστασία από τον πάγο. Τα άμεσα ενεργητικά συστήματα χρησιμοποιούνται σε τροπικά κλίματα, όπου ο παγετός δεν αποτελεί πρόβλημα και τα οικιακά ύδατα έχουν υποστεί επεξεργασία για τις περιπτώσεις που το νερό τροφοδοτείται απευθείας από τη γραμμή ύδρευσης (η οποία συνήθως επεξεργάζεται τα οικιακά ύδατα) [5].

1.4. Παράγοντες που Επηρεάζουν την Απόδοση των Ηλιοθερμικών Συστημάτων

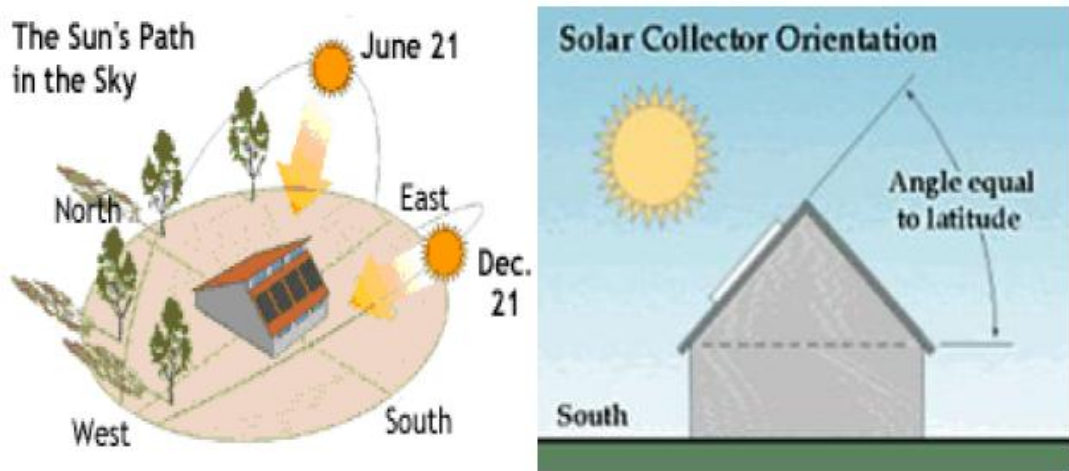
Όπως είναι αναμενόμενο, σε ένα σύστημα το οποίο μετατρέπει ένα είδος ενέργειας (ηλιακή ακτινοβολία) σε ένα άλλο είδος ενέργειας (θερμότητα) και που είναι τοποθετημένο σε εξωτερικό μέρος, δε θα μπορούσαν να λείπουν οι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση αυτού του συστήματος. Η απόδοση ενός ηλιακού συστήματος θέρμανσης νερού εξαρτάται από τους ακόλουθους παράγοντες:

A) Συνθήκες Περιβάλλοντος

Η ποσότητα της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας καθορίζει την απορροφούμενη ηλιακή ακτινοβολία από τον συλλέκτη, ενώ η θερμοκρασία περιβάλλοντος καθορίζει τις θερμικές απώλειες από τον συλλέκτη. Οι συννεφιασμένες ημέρες περιορίζουν τα επίπεδα απομόνωσης της ακτινοβολίας που απορροφάται από τον συλλέκτη, ειδικά στην περίπτωση των συγκεντρωτικών συλλεκτών [4].

B) Προσανατολισμός και κλίση του συλλέκτη

Ο γεωγραφικός προσανατολισμός και η κλίση του συλλέκτη μπορεί να επηρεάσουν την ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται το σύστημα. Ο προσανατολισμός του συλλέκτη είναι σημαντικός για την επίτευξη της μέγιστης απόδοσης ενός ηλιακού συστήματος ενέργειας. Για παράδειγμα, ο βέλτιστος προσανατολισμός για έναν ηλιακό συλλέκτη στο βόρειο ημισφαίριο, είναι ο πραγματικός νότος (αζιμούθιο 180°), όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3**. Ωστόσο, πρόσφατες μελέτες έχουν δείξει ότι, ανάλογα με τη θέση και την κλίση του συλλέκτη, ο συλλέκτης μπορεί να κοιτά προς τα επάνω έως 90° ανατολικά ή δυτικά του αληθινού νότου χωρίς να μειώνεται σημαντικά η απόδοσή του. Η βέλτιστη γωνία κλίσης για τον ηλιακό συλλέκτη είναι μια γωνία ίση με το γεωγραφικό πλάτος της αντίστοιχης περιοχής [4].



Σχήμα 3. Προσανατολισμός ηλιακού συλλέκτη.

Γ) Διάταξη συστοιχίας συλλεκτών

Η απόδοση της συστοιχίας συλλεκτών εξαρτάται από τον τρόπο σύνδεσης των μονάδων συλλέκτη. Σε παράλληλη σύνδεση, οι θύρες εισόδου και εξόδου της μονάδας, τροφοδοτούνται στις κοινές αντίστοιχες κεφαλίδες (σημεία εισόδου και εξόδου του νερού). Υποθέτοντας πανομοιότυπες μονάδες, τόσο η θερμοκρασία εισόδου του ρευστού όσο και η θερμοκρασία εξόδου, είναι η ίδια σε όλες τις μονάδες της συστοιχίας. Η απόδοση της συστοιχίας συλλεκτών είναι η ίδια με την απόδοση του μεμονωμένου συλλέκτη. Σε σύνδεση σε σειρά, η απόδοση της δεύτερης και των επόμενων μονάδων δεν θα είναι ίδια με την πρώτη, επειδή η θερμοκρασία εισόδου στην δεύτερη είναι η θερμοκρασία εξόδου της πρώτης [4].

Δ) Παροχή μάζας του ρευστού μεταφοράς

Η χαμηλή παροχή μάζας του υγρού του συλλέκτη (περίπου 1 έως 15 λίτρα ανά λεπτό) αυξάνει τη θερμική απόδοση του συλλέκτη, η οποία έχει ως επακόλουθο την αύξηση του βαθμού θερμικής στρωματοποίησης της δεξαμενής αποθήκευσης. Σε μια στρωματοποιημένη δεξαμενή, η θερμοκρασία του ρευστού στο κάτω μέρος της δεξαμενής αποθήκευσης είναι χαμηλότερη από ό,τι στην κορυφή. Η θερμοκρασία εισόδου του συλλέκτη μειώνεται επειδή το ρευστό εισόδου του συλλέκτη τροφοδοτείται από το κάτω μέρος της δεξαμενής. Η χαμηλότερη θερμοκρασία του συλλέκτη στην είσοδο μειώνει τις θερμικές απώλειες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα αυξημένο κέρδος σε ωφέλιμη ενέργεια [4].

1.5. Συλλέκτες Ηλιακής Ενέργειας

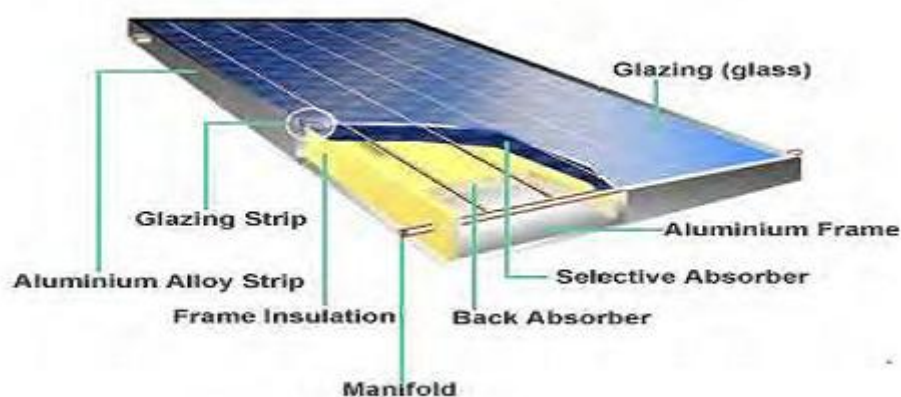
Οι συλλέκτες ηλιακής ενέργειας λειτουργούν με παρόμοιο τρόπο με τους εναλλάκτες θερμότητας, καθώς μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε θερμική ενέργεια. Ο ηλιακός συλλέκτης απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία και τη μετατρέπει σε θερμότητα. Αυτή η θερμότητα μεταφέρεται σε ένα ρευστό που συνήθως είναι νερό ή μίγμα γλυκόλης, το οποίο ρέει μέσω του συλλέκτη. Η ενέργεια που συλλέγεται από τη παραπάνω διαδικασία, μεταφέρεται από το ρευστό είτε απευθείας για χρήση είτε σε δεξαμενή αποθήκευσης θερμού νερού από την οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν είναι απαραίτητο. Υπάρχουν δύο τρόποι τοποθέτησης των ηλιακών συλλεκτών: i) σταθερή και ii) με παρακολούθηση (tracking). Εάν ο συλλέκτης πρόκειται να τοποθετηθεί σε σταθερή θέση, οι υπολογισμοί για την τοποθέτηση, πραγματοποιούνται στο στάδιο σχεδιασμού ως προς τη βέλτιστη κλίση των πάνελ. Οι συλλέκτες θα παραμείνουν σταθεροί σε αυτή τη γωνία κλίσης όλο το χρόνο και για όλη τη διάρκεια ζωής του συστήματος. Σε θέση παρακολούθησης, η κλίση του συλλέκτη θα αλλάζει καθώς η γωνία του ήλιου μεταβάλλεται ώρα με την ώρα και ημέρα με την ημέρα, για να απορροφήσει τη βέλτιστη ποσότητα ακτινοβολίας [6].

1.5.1. Επίπεδοι συλλέκτες

Επί του παρόντος, οι επίπεδοι συλλέκτες κατασκευάζονται σε δύο διαφορετικές μορφές. Πρώτον, οι συλλέκτες οι οποίοι χρησιμοποιούν ρευστό χωρίς υαλοπίνακες, κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας μαύρη απορροφητική επίστρωση πολυμερούς χωρίς μονωμένο υπόστρωμα. Το κόστος κατασκευής αυτών των συγκεκριμένων συλλεκτών είναι μεν εξαιρετικά χαμηλό αλλά παρουσιάζουν υψηλές απώλειες θερμότητας στο περιβάλλον κάτι που τους καθιστά αναποτελεσματικούς. Τέτοιοι συλλέκτες είναι κατάλληλοι για εφαρμογές όπου απαιτούνται χαμηλές θερμοκρασίες, όπως στην περίπτωση της πισίνας και της βιομηχανικής θέρμανσης.

Η δεύτερη μορφή επίπεδου συλλέκτη χρησιμοποιεί υαλοπίνακες, όπως αποτυπώνεται στο παρακάτω **Σχήμα 4**, και μια απορροφητική πλάκα που απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία και με τη σειρά της θερμαίνει τους χάλκινους σωλήνες που περιέχουν το ρευστό μεταφοράς. Η πλευρά του περιβλήματος και η κάτω πλευρά της

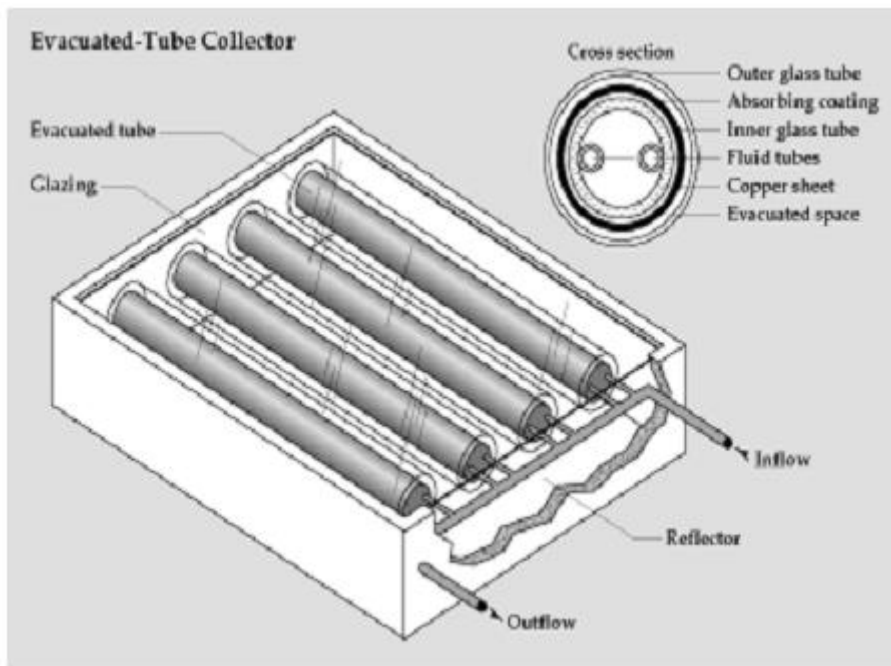
απορροφητικής πλάκας είναι καλά μονωμένες για τη μείωση των απωλειών αγωγής κατά τη λειτουργία. Οι σωλήνες ρευστού μερικές φορές συγκολλούνται στην απορροφητική πλάκα ή μπορούν να κατασκευαστούν ως μέρος της πλάκας. Στη συνέχεια, αυτοί οι σωλήνες συνδέονται και στα δύο άκρα με σωλήνες κεφαλής μεγάλης διαμέτρου. Αυτοί οι συλλέκτες χρησιμοποιούν επίσης ένα διαφανές κάλυμμα για να μειώσουν τις απώλειες μεταφοράς από την απορροφητική πλάκα, παγιδεύοντας ένα στρώμα στάσιμου αέρα μεταξύ της πλάκας και του γυαλιού [6].



Σχήμα 4. Επίπεδος συλλέκτης.

1.5.2. Συλλέκτες κενού

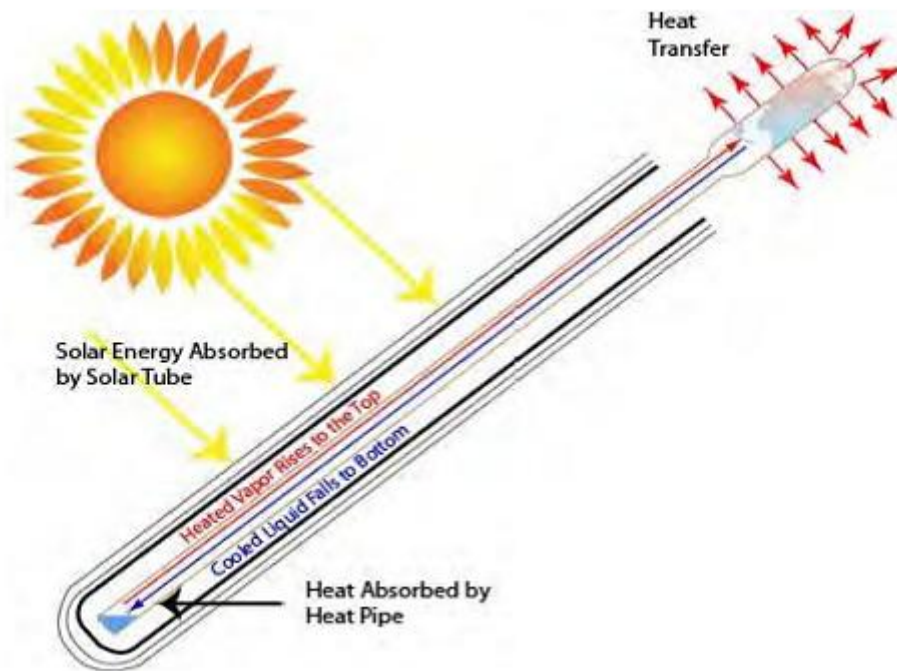
Οι συλλέκτες κενού, είναι στις περισσότερες περιπτώσεις πιο αποτελεσματικοί από τους περισσότερους επίπεδους συλλέκτες, κάτι φυσικά που τους καθιστά πιο ακριβούς εξαιτίας του πολύπλοκου σχεδιασμού τους. Λόγω του γεγονότος ότι ο απορροφητής είναι τοποθετημένος σε ανθεκτικό στην πίεση και γυάλινο σωλήνα κενού, οι θερμικές απώλειες ελαχιστοποιούνται αυξάνοντας την απόδοση. Οι συλλέκτες κενού, λειτουργούν αποτελεσματικά σε χαμηλά επίπεδα ακτινοβολίας με υψηλές θερμοκρασίες απορρόφησης. Βάση αυτού, μπορούν να παρέχουν υψηλότερες θερμοκρασίες εξόδου από τους επίπεδους συλλέκτες, ενώ επίσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές όπου η θερμοκρασία ζήτησης είναι 50–95 °C ή ακόμη και σε ψυχρότερα κλίματα. Υπάρχουν σήμερα δύο κύριοι τύποι συλλεκτών κενού στην τρέχουσα αγορά: ο σωλήνας άμεσης ροής και ο σωλήνας θερμότητας. Ο πρώτος τύπος είναι γνωστός ως σωλήνας κενού απευθείας ροής και όπως φαίνεται στο ακόλουθο **Σχήμα 5**, το ρευστό μεταφοράς θερμότητας κυκλοφορεί μέσω των σωλήνων.



Σχήμα 5. Συλλέκτης κενού.

Ο δεύτερος τύπος συλλέκτη που φαίνεται στο παρακάτω **Σχήμα 6** χρησιμοποιεί σωλήνες θερμότητας μέσα σε γυάλινους σωλήνες, σφραγισμένους υπό κενό με έναν ανακλαστήρα, που χρησιμοποιείται επίσης για την περαιτέρω αύξηση της ικανότητας απορρόφησης ακτινοβολίας. Ο συλλέκτης λειτουργεί με ατμό που ανέρχεται στον εναλλάκτη θερμότητας, απ' όπου η θερμότητα μεταφέρεται στο πρωτεύον κύκλωμα του συστήματος και το συμπυκνωμένο ρευστό ρέει πίσω στο σωλήνα θερμότητας. Η επιλογή του σωστού συλλέκτη μπορεί να εξαρτάται από τη θερμοκρασία του ζεστού νερού που απαιτείται στο σύστημα καθώς και από το κλίμα της περιοχής όπου είναι εγκατεστημένο το σύστημα. Επομένως, η καταλληλότητα ενός συλλέκτη σε ένα σύστημα εξαρτάται από την ονομαστική απόδοση του συλλέκτη. Τα σημεία του κενού αέρα στους συλλέκτες κενού, μειώνουν τις απώλειες αγωγής και μεταφοράς, γεγονός που επιτρέπει στους συλλέκτες να λειτουργούν σε υψηλότερες θερμοκρασίες από τους επίπεδους συλλέκτες με συνέπεια οι συλλέκτες αυτοί να θεωρούνται ιδανικοί για εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών. Χαρακτηρίζονται επίσης από την ικανότητα να απορροφούν τόσο την άμεση όσο και τη διάχυτη ακτινοβολία ακριβώς όπως οι επίπεδοι συλλέκτες, με τη διαφορά ότι για χαμηλότερες γωνίες πρόσπτωσης παρουσιάζουν μεγαλύτερη απόδοσή. Το γεγονός αυτό δίνει στους

συλλέκτες κενού ένα πλεονέκτημα έναντι των επίπεδων συλλεκτών όσον αφορά την ημερήσια απόδοση [6].



Σχήμα 6. Ηλιακός συλλέκτης κενού με σωλήνα θερμότητας.

1.5.3. Συγκεντρωτικοί συλλέκτες

Οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες ή παραβολικοί(οι οποίοι φαίνονται παρακάτω **Σχήμα 7** χρησιμοποιούνται σπάνια σε κλίματα όπως το ευρωπαϊκό, είναι όμως πολύ χρήσιμοι για εφαρμογές σε υψηλές θερμοκρασίες από 100-200°C, όπου η απόδοση του συλλέκτη υπερβαίνει εκείνη των συλλεκτών σωλήνων κενού. Σε πολύ θερμές χώρες όπου χρησιμοποιούνται συστήματα ηλιακής ψύξης, θερμοκρασίες της τάξης των 150°C ή ακόμη και υψηλότερες με τη χρήση τέτοιων συλλεκτών καθίστανται επιτεύξιμες.



Σχήμα 7. Συγκεντρωτικοί συλλέκτες.

Οι παραβολικοί συλλέκτες βασίζονται σε άμεση ακτινοβολία και ως εκ τούτου κλίματα που χαρακτηρίζονται από υψηλή αναλογία άμεσης ακτινοβολίας και μικρή νεφοκάλυψη είναι ιδανικά για τη χρήση αυτών των συλλεκτών. Σύμφωνα με τον Eicher [7] «Το επενδυτικό κόστος των παραβολικών συλλεκτών είναι περίπου 300€/m². Το κόστος ηλιακής θερμότητας μπορεί να είναι τόσο χαμηλό όσο 0,045 €/kWh σε μια τουρκική τοποθεσία με 1900 kWh/m² άμεση κανονική ακτινοβολία και 0,11 €/kWh σε μια τοποθεσία της Νότιας Γερμανίας με 890 kWh/m²» [7].

1.6. Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Ηλιοθερμικών Συστημάτων

- **Πλεονεκτήματα:**

Η ενέργεια που εξοικονομείται από τη χρήση ενός ηλιακού συστήματος θέρμανσης νερού συμβάλλει στη μείωση της οικιακής ζήτησης ενέργειας από τις επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας. Ένας ηλιακός θερμοσίφωνας είναι μια μακροπρόθεσμη επένδυση που αποσβένει τα χρήματα που δαπανώνται για θέρμανση νερού. Εκτός από τη μειωμένη ηλεκτρική ενέργεια και την εξοικονόμηση κόστους από τη θέρμανση του νερού, υπάρχουν πολλά άλλα οφέλη που προκύπτουν από τη χρήση της ηλιακής ενέργειας για τη θέρμανση του νερού. Οι περισσότεροι ηλιακοί θερμοσίφωνες διαθέτουν πρόσθετη δεξαμενή νερού, η οποία τροφοδοτεί τη συμβατική δεξαμενή ζεστού νερού. Οι χρήστες επωφελούνται από τη μεγάλη χωρητικότητα των δεξαμενών αποθήκευσης ζεστού νερού, με αποτέλεσμα την επάρκεια ζεστού νερού. Ορισμένοι ηλιακοί θερμοσίφωνες δεν χρειάζονται ρεύμα για να λειτουργήσουν, με αποτέλεσμα η παροχή ζεστού νερού να μην επηρεάζεται από διακοπές ρεύματος, εφόσον υπάρχει

αρκετό ηλιακό φως για τη λειτουργία τους. Τα ηλιακά συστήματα θέρμανσης νερού μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την άμεση θέρμανση του νερού της πισίνας.

- **Μειονεκτήματα:**

Ο ηλιακός θερμοσίφοντας είναι ένα αναπόσπαστο κομμάτι από κάθε νοικοκυριό. Τα προαναφερόμενα πλεονεκτήματα τον καθιστούν ελκυστικό και λόγω ότι λειτουργεί με ανανεώσιμη πηγή ενέργειας (ηλιακή ενέργεια) φανερώνει ελάχιστα μειονεκτήματα. Αρχικά, η εγκατάσταση ενός θερμοσιφωνικού συστήματος είναι συχνά στον χώρο της ταράτσας της εκάστοτε οικίας, γεγονός που αλλοιώνει την συνολική αισθητική του κτηρίου. Επιπροσθέτως, για να επιτευχθεί αυτή η εγκατάσταση, είναι αναγκαία η ύπαρξη του κεφαλαίου. Ειδικότερα μια καλή εγκατάσταση ηλιακού θερμοσίφωνα για μία τετραμελή οικογένεια ανέρχεται στο ποσό των 1000€ που σημαίνει ότι είναι λίγο κάτω από το μιστό εισόδημα του νοικοκυριού και ίσως υψηλό για τα τωρινά δεδομένα [8].

1.7. Σύνοψη κεφαλαίου

Η κύρια λειτουργία του ηλιακού θερμοσίφωνα είναι να εκμεταλλεύεται την ενέργεια του ήλιου και να την προσφέρει σε θέρμανση του νερού χρήσης. Ειδικότερα, όταν ο ηλιακός συλλέκτης απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία αρχίζει να αυξάνεται η θερμοκρασία του ρευστού εντός του συλλέκτη, το οποίο στη συνέχεια καταλήγει στο δοχείο αποθήκευσης (θερμοδοχείο). Όταν η θερμοκρασία του ρευστού στο συλλέκτη είναι ίδια με τη θερμοκρασία του ρευστού στο θερμοδοχείο, τότε το σύστημα διακόπτει τη λειτουργία του.

Όσον αφορά τη διαφοροποίηση των θερμοσιφωνικών κυκλωμάτων ως προς την διάταξή τους, διακρίνονται οι παρακάτω κατηγορίες :

- Ανοιχτό κύκλωμα: σε αυτή τη διάταξη του θερμοσίφωνα, το νερό που ρέει μέσα στις σωληνώσεις είναι το νερό που προέρχεται από το δίκτυο της περιοχής. Έτσι, καθώς θερμαίνεται ο συλλέκτης, μεταφέρεται η θερμότητα αυτή στο νερό, το οποίο αποθηκεύεται στο θερμοδοχείο. Για να μπορεί να

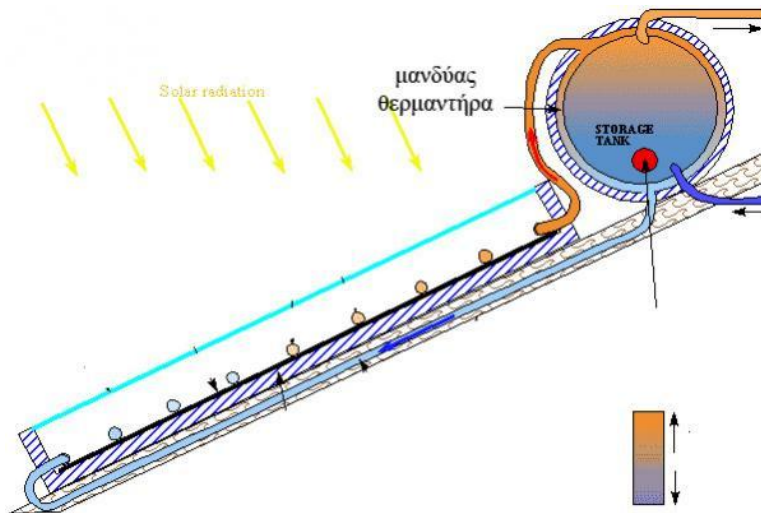
επιτευχθεί αυτή η λειτουργία, το θερμοδοχείο θα πρέπει να είναι τοποθετημένο σε ένα υψηλότερο σημείο από τον συλλέκτη, έτσι ώστε με την διαφορά θερμοκρασίας να πραγματοποιηθεί η κίνηση του ρευστού από τον συλλέκτη προς το θερμοδοχείο και αντιστρόφως. Τέλος, αυτή η λειτουργία βασίζεται στη διαφορά πυκνότητας που δημιουργείται μεταξύ του ζεστού νερού χρήσης και του κρύου.

- Κλειστό κύκλωμα: σε αυτή τη διάταξη δεν έχουμε ένα ενιαίο ρευστό σε όλο το μήκος της διάταξης μας, αλλά εκείνο διαχωρίζεται στο νερό χρήσης και το αντιψυκτικό. Έτσι, το ρευστό μέσα στους συλλέκτες πραγματοποιεί μια ανακυκλοφορία, δηλαδή θερμαίνεται και στη συνέχεια, λόγω της διαφοράς πυκνότητας, οδηγείται προς τα τοιχώματα του θερμοδοχείου και με τη σειρά του θερμαίνει το δοχείο και κατά συνέπεια το νερό χρήσης, με τη χρήση εναλλάκτη θερμότητας.
- Διπλής ενέργειας: αυτή η κατηγορία χαρακτηρίζεται από υποβοήθηση του ηλιακού θερμοσίφωνα με ηλεκτρική ενέργεια. Ειδικότερα, ο ηλιακός θερμοσίφοντας πραγματοποιεί την κανονική του λειτουργία, όμως σε περίπτωση συννεφιάς υπάρχει βοηθητική αντίσταση, για την θέρμανση του νερού (αυτό μπορεί να λειτουργήσει και με κάποιο υβριδικό σύστημα).
- Τριπλής ενέργειας: είναι η ίδια διάταξη με τον θερμοσίφωνα διπλής ενέργειας. Η διαφοροποίηση του από την διάταξη διπλής ενέργειας είναι ότι επεμβαίνει στο σύστημα θέρμανσης χώρου, μέσω καλοριφέρ. Ειδικότερα, το νερό από το θερμοδοχείο αναμιγνύεται με το νερό από τον καυστήρα, για εξοικονόμηση ενέργειας. Για να πραγματοποιηθεί αυτή η διάταξη είναι απαραίτητη η κατάλληλη υποδομή από σωληνώσεις.

Το θερμοσιφωνικό σύστημα διακρίνεται σε δύο κατηγορίες με βάση τη ροή οι οποίες είναι:

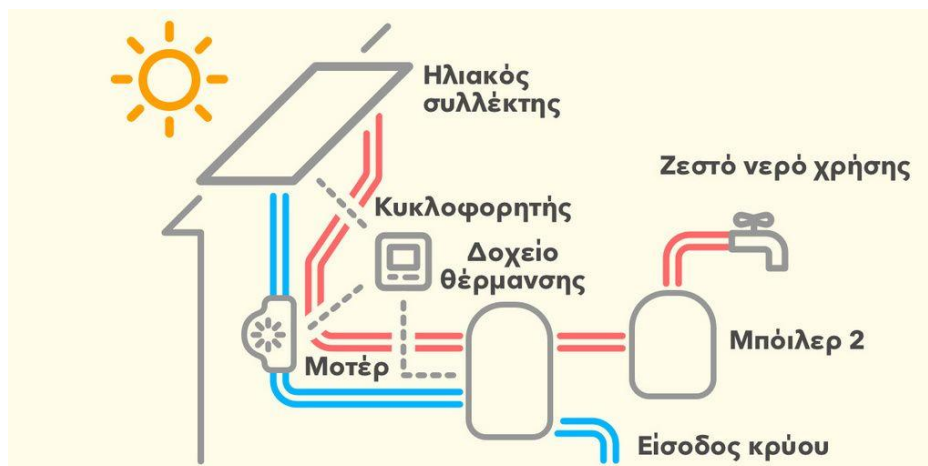
- Θερμοσιφωνικό κύκλωμα (ανοιχτό-ελεύθερης ροής): σε αυτό το κύκλωμα ροής, το νερό διαρρέει τον συλλέκτη με φυσική ροή. Ειδικότερα, το ρευστό μέσα στο συλλέκτη, θερμαίνεται, μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας και ξεκινά η κυκλοφορία του. Στη συνέχεια, οδηγείται στο δοχείο αποθήκευσης και συνεχίζεται η ίδια διαδικασία. Η διαδικασία αυτή, οφείλεται στην διαφορά

πυκνότητας μεταξύ του θερμού ρευστού, το οποίο είναι μέσα στο συλλέκτη, και του κρύου νερού μέσα στο δοχείο.



Σχήμα 8. θερμοσίφωνα φυσικής ροής (θερμοσίφωνικό σύστημα)

- Άμεσα ενεργό κύκλωμα (κλειστό-βεβιασμένης ροής): σε αυτή τη διάταξη, παρατηρείται μια διαφοροποίηση από την προαναφερθείσα. Ειδικότερα, στην έξοδο του ρευστού από τον συλλέκτη προς το θερμοδοχείο, είναι τοποθετημένη μία αντλία (κυκλοφορητής), με σκοπό την συνεχή και σταθερή κυκλοφορία του ρευστού. Αυτό εφαρμόζεται με σκοπό το ρευστό να πραγματοποιεί τον κύκλο του μέσα στο θερμοσίφωνικό σύστημα ακόμα και σε λιγότερο ευνοϊκές συνθήκες (χαμηλές θερμοκρασίες και χαμηλή ηλιοφάνεια).



Σχήμα 9. θερμοσίφωνα βεβιασμένης ροής.

Κεφάλαιο 2

2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση ηλιοθερμικών συστημάτων

Ο Καλογήρου [6] παρουσίασε μια έρευνα βασισμένη πάνω στους διάφορους τύπους ηλιακών συλλεκτών και εφαρμογών. Όλα τα ηλιοθερμικά συστήματα καθώς και οι εφαρμογές τους εξαρτώνται από τον ηλιακό συλλέκτη. Οι ηλιακοί συλλέκτες χρησιμοποιούνται για οικιακούς, εμπορικούς και βιομηχανικούς σκοπούς και ανάμεσα στις εφαρμογές τους περιλαμβάνουν: ηλιακή θέρμανση νερού (η οποία περιλαμβάνει θερμοσυσσωρευτή, ολοκληρωμένη αποθήκευση συλλεκτών, άμεσα και έμμεσα συστήματα και συστήματα αέρα), θέρμανση και ψύξη χώρων (θέρμανση χώρου και υπηρεσία ζεστού νερού, συστήματα αέρα και νερού και αντλίες θερμότητας, ψύξη), θερμότητα βιομηχανικής διεργασίας (συστήματα αέρα και νερού και συστήματα παραγωγής ατμού, αφαλάτωση), συστήματα θερμικής ενέργειας (ηλιακούς φούρνους και εφαρμογές χημείας).

Πίνακας 1. Σύγκριση των συλλεκτών.

Κίνηση	Τύπος συλλέκτη	Τύπος απορροφητή	Βαθμός συγκέντρωσης *	Εύρος θερμοκρασίας (°C)
Στατικός	FPC	επίπεδος	1	30-80
	ETC	επίπεδος	1	50-200
	CPC	σωληνοειδής	(1-5)	60-240
Παρακολούθησης μονού άξονα	LFR	σωληνοειδής	(15-45)	60-250
	PTC	σωληνοειδής	(15-45)	60-300
	CTC	σωληνοειδής	(10-50)	60-300
Παρακολούθησης διπλού άξονα	PDR	Σημείο	(100-1000)	100-500
	HFC	Σημείο	(100-1000)	150-2000

* ο βαθμός συγκέντρωσης ορίζεται ως η ανοιγμένη επιφάνεια διαιρούμενη με την πραγματική επιφάνεια του δέκτη-απορροφητήρας του συλλέκτη

Ο Sivakumar [9] παρουσίασε το σχέδιο επίπεδου ηλιακού συλλέκτη ελλειπτικού σωλήνα θερμότητας, ο οποίος δοκιμάστηκε υπό γωνία κλίσης συλλέκτη 11°. Παρουσιάστηκε η πειραματική ανάλυση της επίδρασης του λόγου μήκους

συμπυκνωτή/μήκος εξατμιστή (L_c/L_e) του σωλήνα θερμότητας, διαφορετικών παροχών μάζας νερού ψύξης και διαφορετικής θερμοκρασίας νερού ψύξης εισόδου. Πέντε ελλειπτικοί σωλήνες θερμότητας με φυτίλι από ανοξείδωτο χάλυβα έχουν κατασκευαστεί και χρησιμοποιούνται ως σωλήνες μεταφοράς στον συλλέκτη. Ο χάλκινος σωλήνας έχει χρησιμοποιηθεί ως υλικό δοχείου, με μεθανόλη ως εργαζόμενο ρευστό του σωλήνα θερμότητας. Αυτοί οι σωλήνες θερμότητας στερεώθηκαν στην πλάκα απορρόφησης του ηλιακού συλλέκτη, μελετήθηκε η απόδοση του ηλιακού συλλέκτη ελλειπτικού σωλήνα θερμότητας και πραγματοποιήθηκε σύγκριση των αποτελεσμάτων. Από τις πειραματικές δοκιμές διαπιστώθηκε ότι ο ηλιακός συλλέκτης με ελλειπτικό σωλήνα θερμότητας με αναλογία L_c/L_e 0,1764 πέτυχε υψηλότερη στιγμιαία απόδοση, συγκριτικά με τις περιπτώσεις υψηλότερης αναλογίας L_c/L_e .

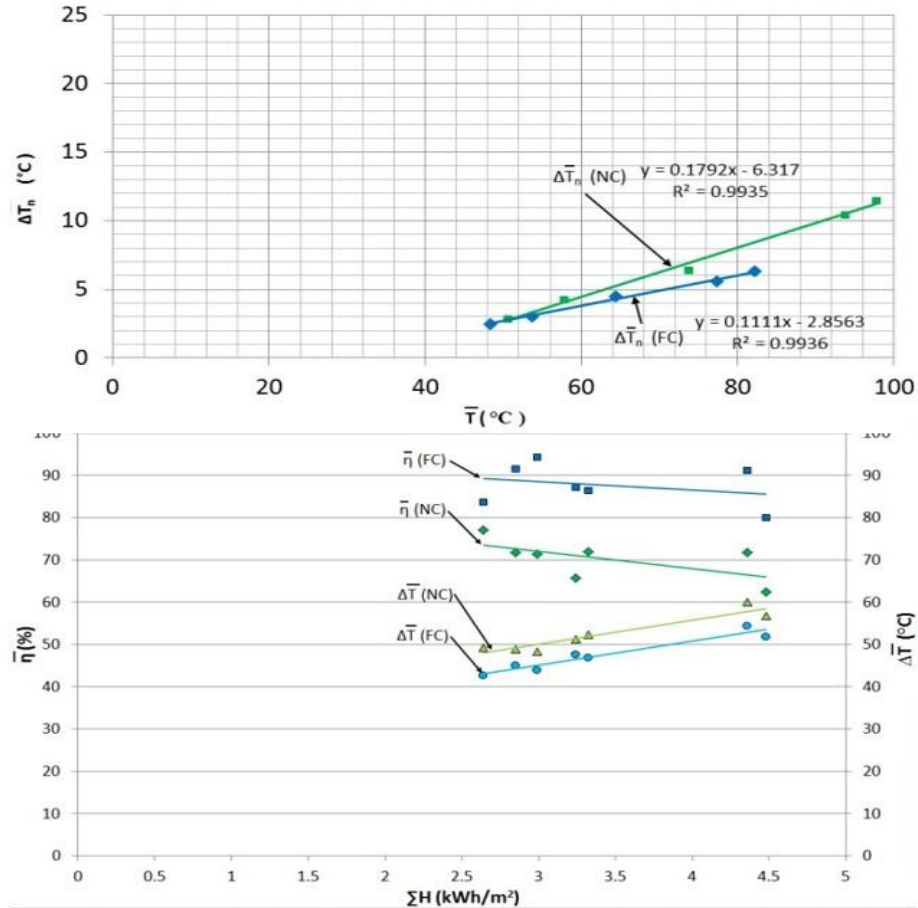
Ο Sivakumar και άλλοι παρουσία [9] σαν πειράματα σχετικά με την επίδραση του λόγου L/d_i (μήκος/ πάχος) του σωλήνα θερμότητας στον ηλιακό συλλέκτη. Σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν δύο ηλιακοί συλλέκτες με διαφορετικό L/d_i . Ένας σωλήνας θερμότητας με φυτίλι από ανοξείδωτο χάλυβα αντικατέστησε τους σωλήνες μεταφοράς του ρευστού του ηλιακού συλλέκτη. Ο χαλκός και ο ανοξείδωτος χάλυβας χρησιμοποιήθηκαν ως υλικό δοχείου και φυτιλιού και η μεθανόλη χρησιμοποιήθηκε ως εργαζόμενο ρευστό του σωλήνα θερμότητας. Οι σωλήνες θερμότητας είναι σχεδιασμένοι να έχουν συντελεστή μεταφοράς θερμότητας περίπου 194 W έως 260 W θερμικής ενέργειας. Τα πειράματα διεξήχθησαν κατά τη θερινή περίοδο με γωνία κλίσης συλλέκτη 13° . Ο συλλέκτης με αναλογία L/d_i 52,63 αποδείχθηκε πιο αποδοτικός από τον συλλέκτη με λόγο L/d_i 58,82. Αυτή η βελτιωμένη απόδοση οφείλεται στην αύξηση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας του σωλήνα θερμότητας, ο οποίος αυξάνεται με τη μείωση του λόγου L/d_i .

Ο Al-Madani [10] μελέτησε έναν ηλιακό θερμοσίφωνα, στο Μπαχρέιν, αποτελούμενο από έναν κυλινδρικό, γυάλινο σωλήνα κενού. Το νερό περνά μέσα από χάλκινα πηνία, τα οποία λειτουργούν ως συλλέκτες, που βρίσκονται εντός του γυάλινου σωλήνα. Οι δοκιμές των πρωτοτύπων οδήγησαν σε μέγιστη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της εισόδου και της εξόδου του κυλινδρικού συστήματος $27,8^\circ\text{C}$ με μέγιστη απόδοση 41,8%. Ο Al-Madani καθόρισε το κόστος κατασκευής του κυλινδρικού συστήματος σε 318\$, ελαφρώς οικονομικότερο από τους τυπικούς επίπεδους συλλέκτες των 358\$.

Ο Mangal [11] αναγνώρισε έναν από τους πιο πρόσφατους ηλιακούς θερμοσίφωνες, ο οποίος είναι ηλιακός θερμοσίφωνα κενού με βάση μια αρχή θερμοσιφωνικού συστήματος που χρησιμοποιείται για θέρμανση νερού για οικιακή χρήση χρησιμοποιώντας ηλιακή ακτινοβολία. Καθώς ο αέρας εκκενώνεται από τον ηλιακό σωλήνα για να σχηματιστεί κενό, αυτό μειώνει σημαντικά θερμότητα λόγω αγωγής, από το εσωτερικό του σωλήνα. Ως αποτέλεσμα, ο άνεμος και η ψυχρή θερμοκρασία έχουν μικρότερη επίδραση στην απόδοση του ηλιακού θερμοσίφωνα κενού.

Το αποτέλεσμα της χαμηλότερης θερμικής απώλειας είναι η γρήγορη θέρμανση του νερού σε σύγκριση με τον ηλιακό θερμοσίφωνα. Αυτή η εργασία παρουσίασε τα πλεονεκτήματα του ηλιακού θερμοσίφωνα κενού σωλήνα. Κατά τη σύγκριση των μεγίστων επιπέδων απόδοσης μπορεί να φαίνεται ότι υπάρχει μικρή διαφορά μεταξύ του επιπέδου συλλέκτη και του συλλέκτη κενού, στην πραγματικότητα όμως η απόδοση του συστήματος επιπέδου συλλέκτη είναι μεν υψηλότερη, αλλά αυτό συμβαίνει σε συνθήκες ελάχιστης θερμικής απώλειας. Όταν υπολογίζεται κατά μέσο όρο ο βαθμός απόδοσης, για χρονικό διάστημα ενός έτους και άνω, ο συλλέκτης κενού σωλήνα παρουσιάζει σαφές πλεονέκτημα.

Ο Ong [12] παρουσίασε την απόδοση δύο θερμοσιφωνικών συστημάτων κενού, που εξαρτάται από το σχεδιασμό, το μέγεθος του συλλέκτη και της δεξαμενής αποθήκευσης, καθώς επίσης και από τις καιρικές συνθήκες (ένταση ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασία περιβάλλοντος). Η διαφορά μεταξύ των δύο συστημάτων είναι ότι στο ένα πραγματοποιείται ελεύθερη ροή του ρευστού, ενώ στο άλλο βεβιασμένη. Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν, επέτρεψαν τη σύγκριση της συνολικής απόδοσης μεταξύ των δύο συστημάτων ηλιακής θέρμανσης νερού, ακόμη και όταν αυτές (δοκιμές) πραγματοποιούνταν σε διαφορετικές εποχές του έτους. Τα πειραματικά αποτελέσματα, τα οποία παρουσιάζονται στο παρακάτω **Σχήμα 10**, έδειξαν ότι το σύστημα αγωγών θερμότητας ελεύθερης ροής ήταν ικανό να θερμαίνει νερό στους 100°C σε αντίθεση με το βεβιασμένης που το θέρμανε μέχρι 84°C, το οποίο ωστόσο είχε μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης.



Σχήμα 10. Πειραματικά αποτελέσματα.

2.1. Συντελεστής θερμικών απωλειών και απόδοση συλλεκτών

Τα θερμοσιφωνικά συστήματα έχουν ένα μεγάλο εύρος πλεονεκτημάτων, όμως αυτό που τα καθιστά χρήσιμα είναι ο βαθμός απόδοσης που πετυχαίνουν. Μέσα σε αυτόν παρουσιάζεται και η παράμετρος των θερμικών απωλειών ενέργειας, όπου τον καθορίζει σε μεγάλο ποσοστό. Ειδικότερα ένας ηλιακός συλλέκτης μπορεί να έχει απώλειες λόγω συναγωγής, δηλαδή την απώλεια που προκύπτει από την επαφή της επιφάνειας του συλλέκτη με τον αέρα, και αγωγής μέσω της μεταφοράς ενέργειας μεταξύ του απορροφητήρα (τζάμι-σωλήνωση) και του ρευστού που ρέει μέσα στις σωληνώσεις του συλλέκτη. Αξιοσημείωτο, επίσης, είναι το γεγονός ότι η συναγωγή του αέρα επηρεάζει περισσότερο τους συλλέκτες χωρίς τζάμι και μόνωση. Ακολουθώντας, παρουσιάζεται μία ανασκόπηση με τους διάφορους τύπους συλλεκτών και παρατίθενται πίνακες με τις απώλειές τους, καθώς και με τις αποδόσεις που μπορούν

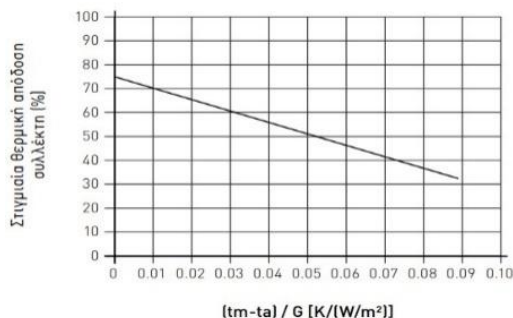
να πετύχουν με τους αντίστοιχους συντελεστές απωλειών. Στον παρακάτω πίνακα (**Πίνακας 2**) [13], παρουσιάζονται τα βιβλιογραφικά στοιχεία, με $F_R(\tau^*a)_n=\eta_0$ και $a_1=F_R U_L$ (αναλυτικότερα στο **Κεφάλαιο 4**), για τους διάφορους τύπους συλλεκτών και στη συνέχεια συγκρίνονται με πιστοποιημένους συλλέκτες.

Πίνακας 2. Πρότυπες τιμές απόδοσης και συντελεστή θερμικών απωλειών για διάφορους τύπους συλλεκτών.

Τύπος	Περιγραφή	$F_R(\tau^*a)_n$	$F_R \cdot U_L$ (W/m ² /°C)
I	Μαύρο χρώμα, 1 τζάμι	0,82	7,50
II	Μαύρο χρώμα, 2 τζάμια ή επιλεκτική επιφάνεια με 1 τζάμι	0,75	5,00
III	Σωλήνες κενού	0,45	1,25
IV	Πλαστικός συλλέκτης χωρίς τζάμι και μόνωση (ταχύτητα ανέμου 2.2m/s)	0,86	21,5

2.1.1. Απόδοση και συντελεστής απωλειών επίπεδου συλλέκτη με επιλεκτική επιφάνεια

Στον **Πίνακα 2** παρουσιάζονται πρότυπες τιμές απόδοσης και συντελεστής θερμικών απωλειών και συγκεκριμένα $\eta_0=0.75$ και $a_1= F_R U_L=5 \text{ W/m}^2\text{K}$ αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές που παρουσιάζονται αποτελούν την μέση τιμή των συγκεκριμένων τεχνικών χαρακτηριστικών από διάφορους κατασκευαστές. Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας και της μόνωσης, για την ελαχιστοποίηση των απωλειών, έχει επιτευχθεί χαμηλότερος συντελεστής απωλειών κοντά στο $a_1= F_R U_L=3.6 \text{ W/m}^2\text{K}$ με επίσης $\eta_0=0.75$ όπως φαίνεται στο **Σχήμα 13** [14].



$$\eta = \eta_0 - a_1 \frac{t_m - t_a}{G}$$

Τύπος	M4	
η_0	0,75	
a_1	3,6	W/m ² k

Σχήμα 11. Συλλέκτης επιλεκτικής επιφάνειας Calpak M4.

2.1.2. Απόδοση και συντελεστής απωλειών επίπεδου συλλέκτη με μονό μαύρο τζάμι

Στον **Πίνακα 2** παρουσιάζονται πρότυπες τιμές απόδοσης και συντελεστής θερμικών απωλειών και συγκεκριμένα $\eta_0=0.82$ και $a_1= F_R U_L=7.5 \text{ W/m}^2\text{K}$ αντίστοιχα. Αντιθέτως στον **Πίνακα 3**, τα αποτελέσματα ενός πειράματος [15], στο οποίο πραγματοποιήθηκε σύγκριση μεταξύ δύο τύπων συλλεκτών, έναν με μονό και έναν με διπλό τζάμι (επιλεκτικός συλλέκτης) καταλήγουν σε $\eta_0=0.63$ ως μέγιστη τιμή και $a_1= U_t = F_R U_L=6.4 \text{ W/m}^2\text{K}$ ως το μέγιστο συντελεστή απωλειών για τον συλλέκτη με μονό μαύρο τζάμι. Με αφορμή τον **Πίνακα 2** που παρέχεται και το πείραμα που αναφέρθηκε, είναι αντιληπτό το γεγονός ότι υπάρχει μια μεγάλη απόκλιση μεταξύ της απόδοσης, που παρέχεται από τον προαναφερόμενο πίνακα και της απόδοσης που υπολογίστηκε από το συγκεκριμένο πείραμα. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην παλαιότητα της πειραματικής διάταξης καθώς και στην τεχνολογία του συλλέκτη με μονό τζάμι. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι λόγω παλαιότητας της τεχνολογίας απλού συλλέκτη με μονό μαύρο τζάμι, δε ήταν εύκολη η εύρεση πιστοποιημένου συλλέκτη.

Πίνακας 3. Μετρήσεις για συλλέκτη με μονό τζάμι.

Table 5. Calculated values of U_t , Q_u , Q_t and η (%) for single glazing system

Time (hr)	S (W)	U_t (W/m ² °C)	Q_t (W)	Q_u (W)	η (%)
10:00	317	5.3	77	240	63
11:00	376	6.3	148	228	50
12:00	467	5.8	119	348	62
1:00	474	6.4	180	294	51
2:00	444	6.2	163	281	52
3:00	394	6.1	163	231	48
4:00	241	5.7	107	134	46

2.1.3. Απόδοση και συντελεστής απωλειών επίπεδου συλλέκτη χωρίς τζάμι

Στη συγκεκριμένη κατηγορία συλλεκτών η διάταξη που χρησιμοποιείται δεν παρέχει κάποια προστασία ως προς τους ατμοσφαιρικούς παράγοντες. Ειδικότερα, έχουν την ίδια δομή με τους επίπεδους συλλέκτες χωρίς ωστόσο να υπάρχει γυάλινο κάλυμμα στην απορροφητική επιφάνεια. Πέραν των απωλειών από την κίνηση του ρευστού μέσα στις σωληνώσεις, καθοριστικό ρόλο έχουν οι απώλειες συναγωγής μεταξύ του ατμοσφαιρικού αέρα και της επιφάνειας του συλλέκτη, έχοντας ως αποτέλεσμα την άμεση αύξηση του συντελεστή απωλειών. Αυτό διακρίνεται στον **Πίνακα 2**, όπου παρουσιάζεται βαθμό απόδοσης $\eta_0=0.86$ και συντελεστή θερμικών απωλειών $a_1= F_R U_L=21.5 \text{ W/m}^2\text{K}$. Μέσα από την ιστοσελίδα της Keymark (<https://keymark.eu/en/>) παρατίθενται στον παρακάτω **Πίνακα 4** δύο τυπικοί συλλέκτες χωρίς κάλυμμα και οι τιμές που παρουσιάζουν, όσον αφορά την απόδοση, προκύπτουν σε κοντινές τιμές με αυτές του **Πίνακα 2** με μία μικρή απόκλιση στο συντελεστή θερμικών απωλειών.

Πίνακας 4. πιστοποιημένοι συλλέκτες χωρίς κάλυμμα.

Όνομα εταιρίας	μάρκα	Κωδ. πιστοποιημένου εγγράφου	η_0	$a_1= F_R U_L$ (W/m ² K)
Soltop Energie SA	Solardach AS	011-7S677 F	0.877	19.64
Soltop Energie SA	Kollektor AS	011-7S1840 F	0.902	17.22

2.1.4. Απόδοση και συντελεστής απωλειών επίπεδου συλλέκτη κενού (Evacuated tubular)

Οι συλλέκτες κενού είναι μία τεχνολογία όπου έχει αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια, και βλέπει σημαντική βελτίωση από το 2013 και έπειτα. Ειδικότερα, ο τύπος αυτού του συλλέκτη διαθέτει κάλυμμα από τζάμι σε κυλινδρική μορφή, όπως αναφέρεται και στην **παράγραφο 3.2.5.** και μεσολαβεί από την ηλιακή ακτινοβολία μέχρι το υγρό του συλλέκτη, αέρας, όπου προκαλεί μόνωση και έτσι επιτυγχάνεται καλύτερη τιμή σε ότι αφορά τον συντελεστή θερμικών απωλειών. Έπειτα από έρευνα, ανάμεσα σε πιστοποιημένους συλλέκτες κενού, είναι εύκολα αντιληπτό ότι ο συντελεστής θερμικών απωλειών παραμένει σε αρκετά χαμηλά επίπεδα, όμως η απόδοση που επιτυγχάνεται ποικίλει, με μέγιστο βαθμό απόδοσης αυτόν της εταιρίας Bosch με $\eta_0 = 0.787$ και $a_1 = F_R U_L = 2.99 \text{ W/m}^2\text{K}$. Με βαθμό απόδοσης, από τον **Πίνακα 2**, $\eta_0 = 0.45$ και συντελεστή θερμικών απωλειών $a_1 = F_R U_L = 1.25 \text{ W/m}^2\text{K}$, συμπεραίνεται ότι οι εταιρίες πλέον, είναι σε θέση να κατασκευάσουν συλλέκτες κενού με υψηλότερο βαθμό απόδοσης από αυτόν που αναγράφεται στον **Πίνακα 2**. Έτσι παρατίθεται παρακάτω ο **Πίνακας 5** με συλλέκτες από διάφορες εταιρίες, όπου σημειώνεται και ο μέσος όρος του βαθμού απόδοσης ($\eta_0 = 0.653$) και του συντελεστή θερμικών απωλειών ($1.395 \text{ W/m}^2\text{K}$), με σκοπό την σύγκριση του μέσου όρου με αυτού του **Πίνακα 2**. Τέλος, παρατηρώντας το μέσο όρο που έχει υπολογιστεί στον πίνακα, συμπεραίνεται ότι οι συλλέκτες κενού χρίζουν παραπάνω μελέτη, διότι είναι σε θέση να επιτύχουν υψηλότερους βαθμούς απόδοσης από αυτούς που αναγράφονται σε παλαιότερες βιβλιογραφίες.

Όνομα εταιρίας	μάρκα	Νούμερο άδειας	Όνομα συλλέκτη	A (m ²)	$\Theta_m - \theta_a$ (K) (max)	a ₁ (W/Km ²)	η_o (%)	U _w (m/s)	α_2 (W/K ² m ²)
Naked Energy Ltd	Virtu HOT	011-7S2980R	Virtu HOT	0.65	80	1.3	37.6	1.3	0.006
Zhejiang shentai solar energy co.,ltd	Suntask, SHENTAI	011-7S3020R	SHC8	1.74	63.24	1.206	54.1	1.3	0.004
			SHC9	1.96					
			SHC10	2.17					
			SHC12	2.59					
			SHC14	3.01					
			SHC15	3.22					
			SHC16	3.43					
			SHC18	3.85					
			SHC20	4.28					
			SHC21	4.49					
			SHC22	4.7					
SHC24	5.12								
Beijing Sunda Solar Energy Technology Co., Ltd	Sunda	011-7S3106R	SEIDO2-6	1.54	55	0.72	58.6	1.3	0.017
			SEIDO2-8	2.06					
			SEIDO2-12	3.1					
			SEIDO2-16	4.13					
Naked Energy Ltd	Virtu HOT HD	011-7S2981R	Virtu HOT HD	0.47	80	2.06	54.6	1.3	0.007
Carl Capito Heiztechnik GmbH	CC-HPV-S12	011-7S3037R	CC-HPV-S12	2.59	63.24	1.21	54.0	1.3	0.004
Consolar Solare Energiesysteme GmbH	Consolar	011-7S2463R	Consolar TUBO II C (2 Modules)	2.44	60	0.9	59.5	1.3	0.005
Thermics Energie S.r.l.	10 DTH V2	011-7S3024R	10 DTH V2	2.38	78	0.94	63.7	1.3	0.004
Kloben Industries S.r.l	ATON G	011-7S2904R	ATON G 10-O	2.17	79	0.746	61.1	1.3	0.008
			ATON G 12-O	2.58					
			ATON G 14-O	3.01					
			ATON G 16-O	3.43					
			ATON G 18-O	3.86					
			ATON G 20-O	4.28					
			ATON G 22-O	4.71					
			NATURAL ATON 12-200-O	2.58					
NATURAL ATON 16-300-O	3.43								
Jiangsu	Micoe	011-7S2265R	SZ58/1800-	0.92	70	2.643	73.3	-	0.000

Micoe Solar Energy Co., Ltd.			10HA						
			SZ58/1800-15HA	1.38					
			SZ58/1800-20HA	1.84					
			SZ58/1800-25HA	2.31					
			SZ58/1800-30HA	2.77					
EHT Italia s.r.l.	-	011-7S1430R	1100 HP 20	3.1	130	1.030	69.0	-	0.016
			1100 HP 30	4.63					
Bosch Thermotechnik GmbH	Bosch	011-7S2460R	Bosch VK120-2 CPC (2 Modules)	2.44	60	0.90	59.5	1.3	0.005
ATAG Italia S.r.l.	SOLDPF21 T	16598Rev.0	SOLDPF21T	4.45	64.3	0.69	61.1	1.3	0.005
Ritter Energie- und Umwelttechnik GmbH	OEM 21, CSO 21*	011-7S114R	OEM 21	1.33	70	1.437	71.8	-	0.007
			CSO 21*	1.33					
Pleion Industries S.r.l.	X-RAY 21 R	16082Rev.0	X-RAY 21R	4.45	64.3	0.69	60.9	-	0.005
NES - New Energy	SUNSYSTEM M VTC 15, SUNSYSTEM M VTC 20, SUNSYSTEM M VTC 30	011-7S2236R	SUNSYSTEM VTC 15	1.412	70	1.500	66	-	0.020
			SUNSYSTEM VTC 20	1.882					
			SUNSYSTEM VTC 30	2.824					
Bosch Thermotechnik GmbH	Junkers	011-7S2466R	Junkers VK120-2, 2 module	0.92	70	2.990	78.7	-	0.015
AmoSol Solartechnik GmbH	AS HP 70.05, AS HP 70.10, AS HP 70.20	011-7S1830R	AS HP 70.05	0.561	70	1.98	69.4	-	0.0016
			AS HP 70.10	1.122					
			AS HP 70.20	2.244					
CIRELIUS, Lda.	Solius TuboSol HP 20 tubes, Solius TuboSol HP 30 tubes	011-7S1992R	Solius TuboSol HP 10 tubes	0.94	70	1.529	73.4	-	0.016
			Solius TuboSol HP 15 tubes	1.40					
			Solius TuboSol HP 20 tubes	1.87					
			Solius TuboSol HP 25 tubes	2.33					

			Solius TuboSol HP 30 tubes	2.79					
NES NEW ENERGY SYSTEM LTD	Sunsytem VTR 15, Sunsytem VTR 20, Sunsytem VTR 30	011-7S2514R	Sunsytem VTR 15	1.40	70	1.668	72.6	-	0.017
			Sunsytem VTR 20	1.87					
			Sunsytem VTR 30	2.81					
solardirekt24 GmbH	EUROTHERM SOLAR PRO 10R, 15R, 20R, 25R, 30R	011-7S1505R	EUROTHERM SOLAR PRO 10R	0.94	70	1.668	72.6	-	0.0172
			EUROTHERM SOLAR PRO 15R	1.40					
			EUROTHERM SOLAR PRO 20R	1.87					
			EUROTHERM SOLAR PRO 25R	2.34					
			EUROTHERM SOLAR PRO 30R	2.81					
Ritter Energie- und Umwelttechnik GmbH & Co. KG	Ritter XL Solar	011-7S2425R	XL 19/49	4.94	108	0.531	62.7	-	0.003
GREENoneTEC Solarindustrie	VRK 14, VRK 10	011-7S016R	VRK 14	2.23	70	0.654	63.6	-	0.013
			VRK 10	1.60					
Westech-Solar OHG	Tubepower 10, 15, 20	011-7S1682R	Tubepower 10	1.01	70	1.379	71	-	0.0031
			Tubepower 15	1.51					
			Tubepower 20	2.01					
Menbro Energietechnik GmbH & Co. KG	Menbro BHP-15, Menbro BHP-20, Menbro BHP-30	011-7S2410R	Menbro BHP-15	1.40	70	1.670	72.6	-	0.017
			Menbro BHP-20	1.87					
			Menbro BHP-30	2.81					
Bosch Thermotechnik GmbH	Buderus	011-7S2467R	Buderus Lagasol SKR5, 2 Module	0.92	70	2.990	78.7	-	0.015

Viessman n Werke GmbH & Co. KG	Abrand	011-7S2192R	Vitosol 300-T SP3B-12	1.60	70	1.256	76.9	-	0.005
			Vitosol 300-T SP3B-24	3.19					
Μέσος όρος						1.395	65.3		

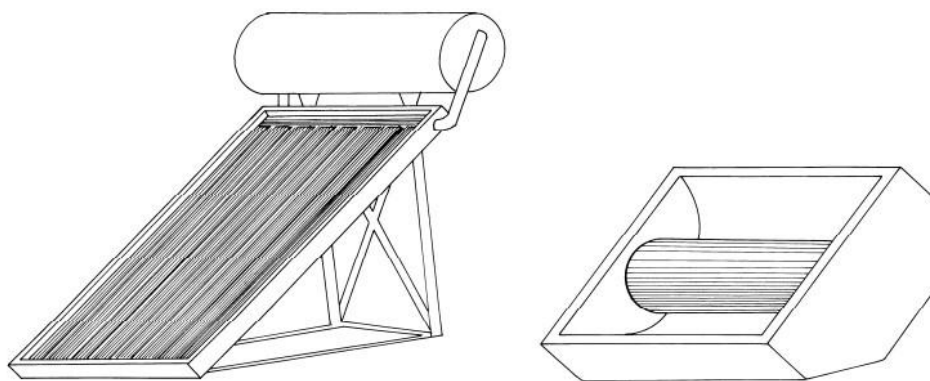
Πίνακας 5. Πιστοποιημένοι συλλέκτες κενού.

2.2. Πειραματικά αποτελέσματα άλλων ερευνών

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται οι βαθμοί απόδοσης που έχουν προκύψει σε διάφορες πειραματικές μελέτες. Συγκεκριμένα, οι μελέτες αυτές περιλαμβάνουν επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες φυσικής ροής και βεβιασμένης ροής, συγκριτικά με άλλου είδους συλλέκτες. Αυτή η έρευνα πραγματοποιείται προκειμένου να συγκεντρωθούν όσο το δυνατόν περισσότερα πειραματικά αποτελέσματα, ώστε να καταγραφούν τα συμπεράσματα καθώς και σε τι ποσοστό έχει ληφθεί υπόψιν το σφάλμα των μετρητικών οργάνων.

2.2.1. Σύγκριση F.P.T.U και I.C.S.

Στη συγκεκριμένη έρευνα, οι συγγραφείς πραγματοποίησαν σύγκριση μεταξύ της πιο απλής και τεχνολογικά αναπτυσσόμενης τεχνολογίας ηλιακού θερμοσίφωνα, που είναι ο θερμοσίφοντας φυσικής ροής με μονωμένο δοχείο αποθήκευσης (F.P.T.U.) και της διάταξης (I.C.S.) του θερμοσιφωνικού συστήματος. Η I.C.S. δεν είναι τόσο διαδεδομένη στην κοινή αγορά και έχει την ιδιότητα ότι το δοχείο αποθήκευσης είναι ενσωματωμένο πίσω από ένα τζάμι και παράλληλα έχει την λειτουργία του συλλέκτη στα εξωτερικά του τοιχώματα, όπου και αυτό λειτουργεί με φυσική ροή του νερού. Αναλυτικότερα μπορεί να διακριθεί η διαφορά αυτών των δύο συστημάτων στο **Σχήμα 13**.

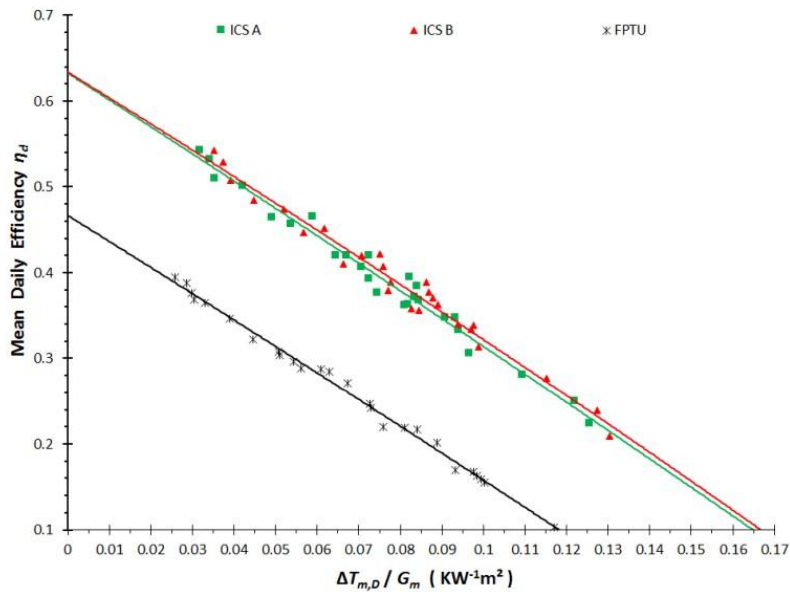


Σχήμα 12. F.P.T.U. vs I.C.S.

Στο παρόν πείραμα, λήφθηκαν μετρήσεις τόσο σε συνθήκες ημέρας, όσο και σε συνθήκες νυκτός, με σκοπό να καταγραφούν τα αποτελέσματα και εν συνεχεία, να σχολιαστούν. Στο **Σχήμα 14** παρατίθενται τα μετρητικά όργανα και στο **Σχήμα 15** παρατίθεται ο βαθμός απόδοσης.



Σχήμα 13. Μετρητικά όργανα πειραματικής διαδικασίας.



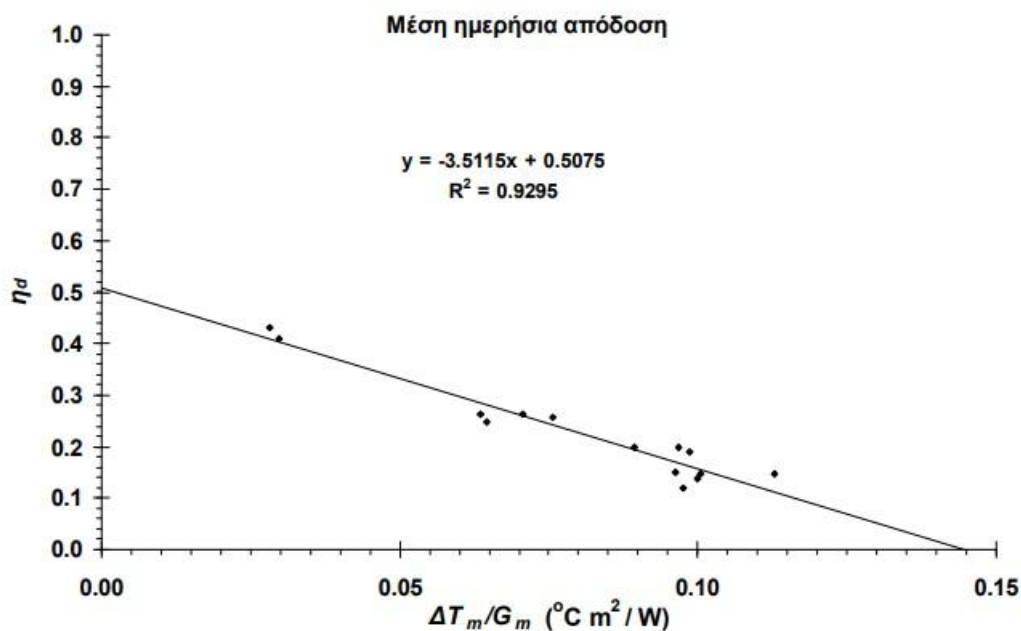
Σχήμα 14. Πειραματική διαδικασία για την απόδοση συναρτήσει της παραμέτρου ζ.

Όπως παρουσιάζεται στο **σχήμα 14**, τα μετρητικά όργανα μετράνε τόσο την ηλιακή ακτινοβολία (αριστερά), όσο και ταχύτητα ανέμου (δεξιά). Στα τεχνικά χαρακτηριστικά των μετρητικών οργάνων αναφέρεται και ένα ποσοστό σφάλματος, που είναι δυνατόν να προκύψει με βάση τις συνθήκες λειτουργίας του μετρητικού οργάνου. Εν συνεχεία, το σφάλμα αυτό μπορεί να μεταφερθεί μέσα στις εξισώσεις και να δώσει ένα φάσμα αναμενόμενων αποτελεσμάτων σε ότι αφορά τις μετρήσεις στο **Σχήμα 15**, δηλαδή μέσα στον τελικό βαθμό απόδοσης. Γεγονός το οποίο δεν έχει ληφθεί υπόψιν στην παρούσα πειραματική αναφορά.

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την συγκεκριμένη πειραματική διαδικασία, είναι ότι ο ICS είναι αποδοτικότερος από τον απλό ηλιακό συλλέκτη (FPTU) καθόλη τη διάρκεια της ημέρας. Με $\eta_0=0.465$ για το FPTU και $\eta_0=0.63$ για το ICS υπάρχει μια διαφορά ανάμεσα στην απόδοση της τάξεως του 0.17 ή 17% [16].

2.2.2. Πειραματική μελέτη ενός FTPU και χρήση TRNSYS

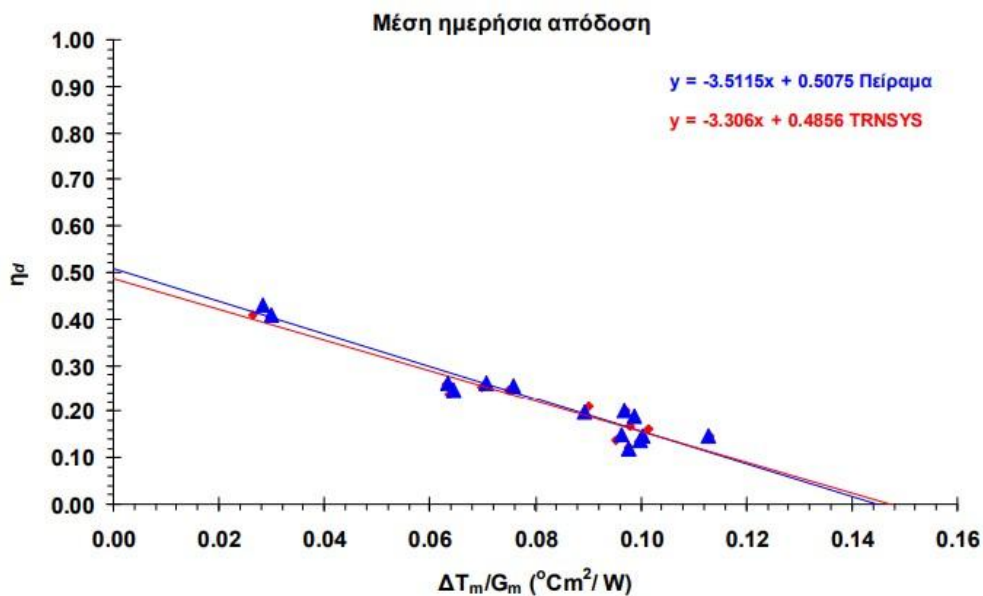
Στη συγκεκριμένη έρευνα, οι συγγραφείς κλήθηκαν να πραγματοποιήσουν, πρώτα μια καταγραφική διαδικασία πάνω σε ένα θερμοσιφωνικό σύστημα φυσικής ροής, και εν συνεχεία να συγκριθούν τα αποτελέσματα με το πρόγραμμα TRNSYS. Σε ότι αφορά το πειραματικό κομμάτι, χρησιμοποίησαν μετρητικά όργανα, για την μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας, της ταχύτητας του ανέμου, της θερμοκρασίας του νερού μέσα στο δοχείο αποθήκευσης, της θερμοκρασίας του αντιψυκτικού υγρού καθώς και του περιβάλλοντος. Σε αυτή την πειραματική αναφορά δεν αξιοποιήθηκε κάποια μέθοδος για το τυχόν σφάλμα, όπου θα μπορούσε να ενσωματωθεί μέσα στις τελικές σχέσεις, για τον υπολογισμό του βαθμού απόδοσης. Έτσι, με κατάλληλες σχέσεις κατάφεραν να βγάλουν την ευθεία λειτουργίας του συστήματος σύμφωνα με τα καταγεγραμμένα δεδομένα, μη λαμβάνοντας υπόψιν το μετρητικό σφάλμα, όπου έχει παρατεθεί, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 16**.



Σχήμα 15. Απόδοση συναρτήσει της παραμέτρου ζ.

Στο παραπάνω διάγραμμα μπορεί εύκολα να γίνει αντιληπτό το γεγονός ότι οι πειραματικές μετρήσεις, που έχουν τοποθετηθεί, αποκλίνουν μεταξύ τους, παρόλα αυτά είναι αποδεκτές, διότι το R^2 (διάστημα εμπιστοσύνης) είναι μεγαλύτερο του 0.9. Στη συνέχεια παρατίθεται το **Σχήμα 17**, όπου φαίνεται η διαφορά μεταξύ του

λογισμικού (TRNSYS) και του πειράματος. Στο συγκεκριμένο διάγραμμα ο συντάκτης αναφέρει ότι η διαφορά ανάμεσα στις δύο ευθείες οφείλεται στη μετάδοση του σφάλματος, όπου δεν έχει ληφθεί υπόψιν για την διεκπεραίωση της αντίστοιχης σύγκρισης του πειράματος. Τέλος, υπολογίστηκε ο βαθμός απόδοσης $\eta_0=0.507$ για το FPCU και $\eta_0=0.486$ για το πρόγραμμα TRNSYS με μια διαφορά της τάξεως του 0.12 ή 12%. Στις θερμικές απώλειες, όπου φαίνονται από το συντελεστή του X στην εξίσωση της ευθείας, η διαφορά μεταξύ των δύο μοντέλων είναι 5.8%, όπου πάλι οφείλεται στη μη λήψη της διάδοσης του σφάλματος [17].

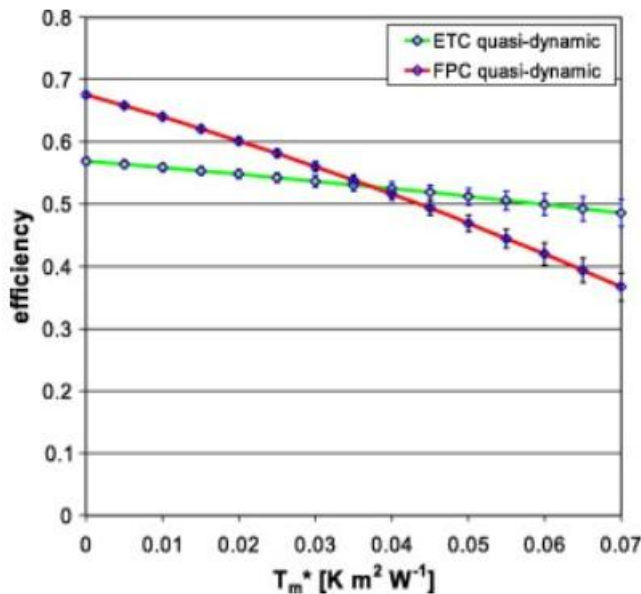


Σχήμα 16. Απόδοση πειραματικά και με το TRNSYS συναρτήσει του ζ.

2.2.3. Πειραματική ανάλυση θερμικής απόδοσης ηλιακών συλλεκτών επίπεδης πλάκας και κενού σωλήνα σε σταθερές τυπικές και καθημερινές συνθήκες

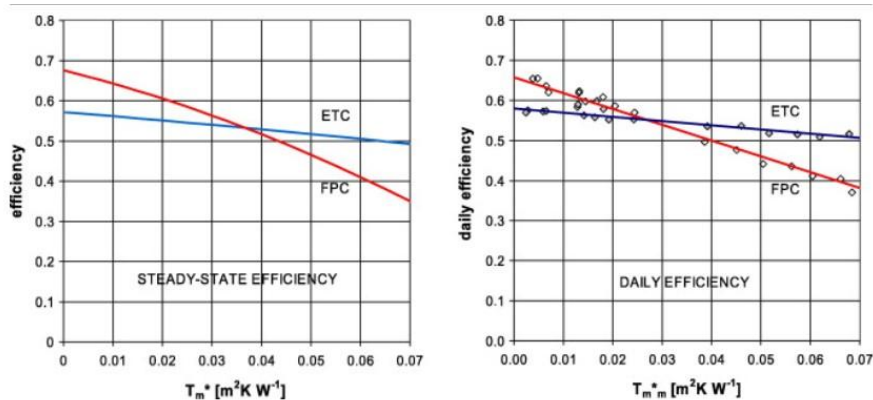
Στη συγκεκριμένη έρευνα, οι συγγραφείς κλήθηκαν να πραγματοποιήσουν πειραματική έρευνα πάνω σε έναν επίπεδο ηλιακό συλλέκτη φυσικής ροής και σε έναν συλλέκτη κενού με τη μέθοδο του quasi-dynamic, μια πρότυπη διαδικασία για την μελέτη των ηλιακών συλλεκτών. Ειδικότερα, είναι μια ερευνητική εργασία που λαμβάνει υπόψιν τον συντελεστή αβεβαιότητας όπως έχει προκύψει από το πρότυπο EN 1295-2 και από τη μέθοδο multiple linear regression (MLR) που έχει αναπτυχθεί στο άρθρο του Kratzenberg [18]. Η διαδικασία MLR είναι μία λογική μέθοδος για διάστημα εμπιστοσύνης 95%, που μπορεί να έχεις ένας συλλέκτης σύμφωνα με τα

σφάλματα που μεταφέρουν τα όργανα, ανά σημείο μέτρησης. Με λίγα λόγια παρουσιάζει την τυπική απόκλιση που μπορεί να έχει η τιμή ενός σημείου, σε ένα διάγραμμα απόδοσης-μέσης θερμοκρασίας για τον συλλέκτη. Εν συνεχεία, στην πειραματική σύγκριση, όπου αναφέρεται στο **Σχήμα 18**, παρουσιάζεται η τυπική απόκλιση που μπορούν να λάβουν τα σημεία των μετρήσεων για τον βαθμό απόδοσης. Ειδικότερα, όταν κάποια μετρούμενη τιμή αποκλίνει από την τυπική απόκλιση, τότε δεν συμπεριλαμβάνεται στις μετρήσεις.



Σχήμα 17. Καμπύλες απόδοσης συλλεκτών κενού και επίπεδων συλλεκτών που λαμβάνονται σε σχεδόν δυναμικές συνθήκες σε $G = 1000 W/m^2$

Συνεχίζοντας οι ερευνητές, πραγματοποιώντας πειραματικά την καταγραφή των μετρήσεων για τα δύο είδη συλλεκτών, κατέληξαν στα διαγράμματα που εμφανίζονται στο **Σχήμα 19**, όπου και έγιναν αποδεκτά, διότι οι πειραματικές μετρήσεις προέκυψαν ανάμεσα στο όρια που αναφέρονται στο **Σχήμα 18**, αλλά και επειδή είχαν κοντινές τιμές μεταξύ τους.



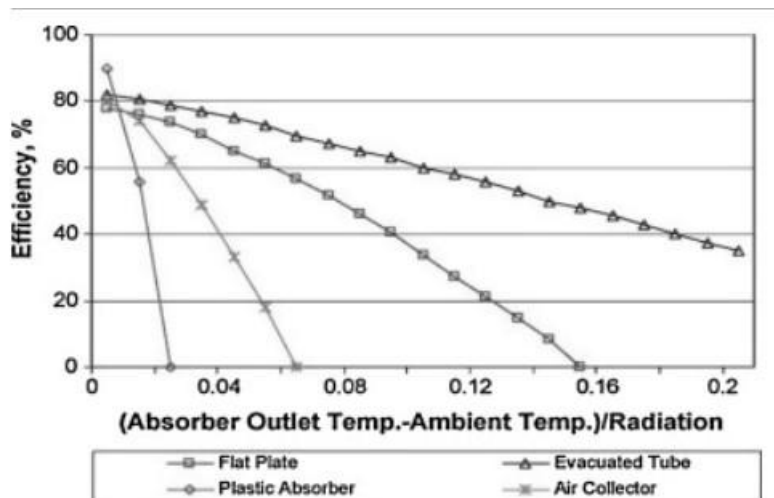
Σχήμα 18. Απόδοση δοκιμασμένων συλλεκτών: στα αριστερά, απόδοση σε συνθήκες σταθερής κατάστασης, στα δεξιά: ημερήσια απόδοση.

Συνοψίζοντας, είναι ευκολά αντιληπτό το γεγονός ότι αυτή η θεωρία με τη τυπική απόκλιση στις μετρήσεις των σημείων, είναι μία χρήσιμη θεωρία, για να προσδιοριστεί η αβεβαιότητα, που μπορεί να προκύψει στον βαθμό απόδοσης. Ο βαθμός απόδοσης που προέκυψε είναι $\eta_0=0.665$ και σε θεωρητικό μοντέλο $\eta_0=0.675$, δηλαδή μια αμελητέα διαφορά ανάμεσα σε θεωρητικό και πειραματικό μοντέλο. [19].

2.2.4. Ανασκόπηση συλλέκτη ηλιακού θερμοσίφωνα και της θερμικής ενεργειακής απόδοσης με κυκλοφορητή σε τέσσερα είδη συλλεκτών

Στην παρούσα ερευνητική εργασία, ο συγγραφέας αναλύει τέσσερα είδη συλλεκτών και τοποθετεί κυκλοφορητή με σκοπό να προκύψουν μεγαλύτερες αποδόσεις στα τελικά του αποτελέσματα. Ειδικότερα, δοκιμάζει συλλέκτες κενού, επίπεδους συλλέκτες, πλαστικούς συλλέκτες και συλλέκτες αέρος. Στο Σχήμα 20, παρατίθεται το τελικό διάγραμμα με τις αποδόσεις των συλλεκτών που προέκυψαν, λόγω της τοποθέτησης του κυκλοφορητή. Όπως διαπιστώνεται, ο συντάκτης δεν έχει λάβει υπόψιν τα σφάλματα που μπορεί να έχουν ενσωματωθεί στους μετρητικούς του υπολογισμούς. Επιπλέον, αναφέρει ότι με την τοποθέτηση κυκλοφορητή έχει καταφέρει να πετύχει 18% περισσότερη απόδοση από τα άλλα συστήματα χωρίς κυκλοφορητή. Αυτό συμβαίνει διότι οι παράμετροι της ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασιακής διαφοράς και της ταχύτητας του ανέμου, επηρεάζουν λιγότερο τον τελικό βαθμό απόδοσης, με την χρήση του κυκλοφορητή. Η σύγκριση μεταξύ τους καταλήγει σε έναν κοντινό βαθμό απόδοσης $\eta_0 \approx 0.8$, διότι προκύπτει από τις ίδιες

περιβαλλοντικές συνθήκες. Λόγω της διαφορετικής διάταξης του κάθε συλλέκτη και των θερμικών του απωλειών, προκύπτει η διαφορά στην καμπύλη απόδοσης.



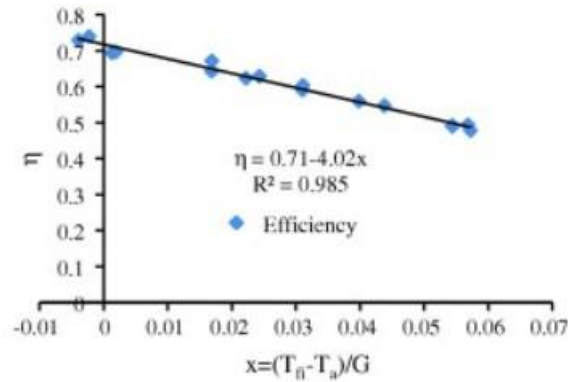
Σχήμα 19. Καμπύλες απόδοσης συλλεκτών για διάφορους τύπους συλλεκτών.

Συνοψίζοντας, σε αυτή την έρευνα ο ερευνητής καταφέρνει να πετύχει υψηλές αποδόσεις για τον κάθε τύπο συλλέκτη, χρησιμοποιώντας κυκλοφορητή. Παρόλα αυτά δε μπορεί παραληφθεί το γεγονός ότι στηρίζεται σε έτοιμα πειραματικά δεδομένα, χωρίς να υπολογίζει το σφάλμα των οργάνων για τις μετρήσεις του [20].

2.2.5. Αριθμητική και πειραματική μελέτη θερμοσιφωνικού συστήματος βεβιασμένης ροής

Στη συγκεκριμένη έρευνα, ο συγγραφέας δοκιμάζει ένα θερμοσιφωνικό σύστημα βεβιασμένης ροής, συγκρίνοντάς το με άλλους συλλέκτες. Ειδικότερα, πραγματοποιεί το πείραμα του υπό συγκεκριμένη παροχή, που ανέρχεται στα 0.042 kg/s και ο τύπος του συλλέκτη που χρησιμοποιεί είναι επίπεδος με πολυουρεθάνη. Επιπροσθέτως, κάνει αναφορά στα σφάλματα που θα ενσωματωθούν μέσω των μετρητικών του οργάνων, όπου αυτά είναι του καταγραφικού της παροχής ($\pm 0.1\%$), του καταγραφικού δεδομένων ($\pm 0.1\%$) και του θερμοζεύγους ($\pm 0.1\%$). Τα συγκεκριμένα σφάλματα, δεν εμφανίζονται μέσα στο μαθηματικό μοντέλο, που χρησιμοποιεί για τον υπολογισμό του βαθμού απόδοσης, ωστόσο υπολογίζει την τετραγωνική ρίζα του σφάλματος των μετρήσεων της θερμοκρασίας (root mean square error RMSE). Με άλλα λόγια το RMSE είναι η διακύμανση που αναφέρεται στη **Σχέση**

3.8 (κεφάλαιο 3.3), ίση με 1.15%, γεγονός που καθιστά τα αποτελέσματα αξιόπιστα. Στο **Σχήμα 21** παρατίθεται η ευθεία της εξίσωσης του συλλέκτη και στον **Πίνακα 6** οι τύποι συλλεκτών που έλαβε υπόψιν για τη σύγκριση.



Σχήμα 20. Απόδοση θερμοσιφωνικού κλειστής ροής και του ζ.

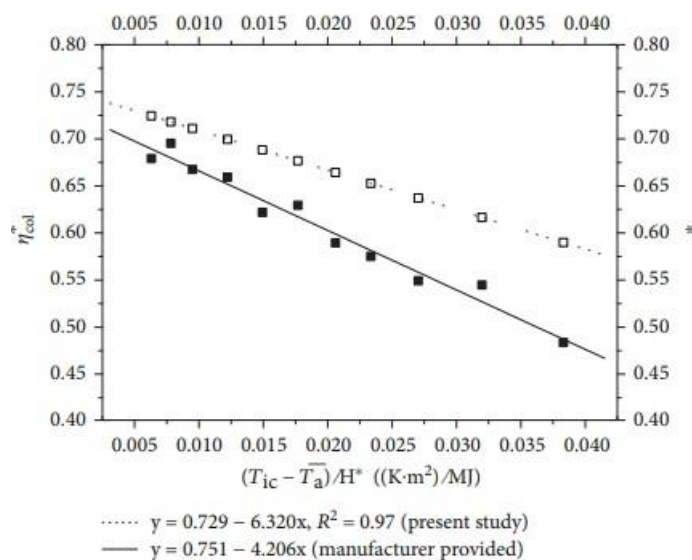
Στο παραπάνω σχήμα, είναι εύκολα αντιληπτό ότι η απόδοση που προκύπτει είναι $\eta_0 \approx 0.71$ και συγκριτικά με τον παρακάτω πίνακα (**Πίνακας 6**), η απόδοση συγκλίνει με τις αποδόσεις των άλλων τύπων συλλεκτών. Η απόδοση του συγκεκριμένου πειράματος δεν ταυτίζεται με κάποια τιμή του πίνακα, διότι υπάρχουν διαφορετικά τεχνικά χαρακτηριστικά [21]. Τέλος, αν είχε συμπεριληφθεί στον τελικό βαθμό απόδοσης κάποια θεωρία σφάλματος και παρουσιαζόταν κάποια τυπική απόκλιση, τότε ορισμένοι βαθμοί απόδοσης, ίσως συμπίπτανε.

Πίνακας 6. Οι συλλέκτες σύγκρισης.

Collector	Insulation	k (W/m k)	Insul. Thickness (mm)	m (kg/s)	Inst. efficiency
C1	Glass wool	0.040	40	0.022	$n = 0.80 - 6.55 \Delta T / G(\tau\alpha)$
C2	Polyurethane	0.035	30	–	$n = 0.80 - 9.00 \Delta T / G(\tau\alpha)$
C3	Polyurethane	0.035	40	0.033	$n = 0.68 - 7.76 \Delta T / G(\tau\alpha)$
C4	Glass wool	0.040	100	–	$n = 0.74 - 3.55 \Delta T / G(\tau\alpha)$
C5	Coconut Coir	0.074	50	0.0085	$n = 0.80 - 5.76 \Delta T / G(\tau\alpha)$
C6	Glass fiber	0.035	50	0.0083	$n = 0.66 - 8.00 \Delta T / G(\tau\alpha)$
C7	Glass fiber	0.035	50	0.002	$n = 0.79 - 6.65 \Delta T / G(\tau\alpha)$
C8 (our study)	Polyurethane	0.035	40	0.042	$n = 0.71 - 4.02 \Delta T / G(\tau\alpha)$

2.2.6. Πειραματική μελέτη σε κλειστό θερμοσιφωνικό σύστημα

Στη συγκεκριμένη πειραματική εργασία, εξετάστηκε ένα θερμοσιφωνικό σύστημα με κυκλοφορητή, όπου το μέσο λειτουργίας είναι το ψυκτικό R600a. Ειδικότερα, ο συντάκτης εκτελεί τη δικιά του πειραματική διαδικασία και καταλήγει στη σύγκριση της ευθείας που δίνει ο κατασκευαστής με τα δικά του αποτελέσματα. Το αποτέλεσμα αυτής της σύγκρισης, όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 22**, είναι ότι προκύπτει μεγαλύτερος βαθμός απόδοσης από εκείνον του κατασκευαστή. Η διαφορά ανάμεσα σε αυτές τις δύο αποδόσεις δεν είναι σημαντική, δηλαδή είναι της τάξεως του 2.2%. Το ποσοστό εμπιστοσύνης ανέρχεται σε 97%, για τα συγκεκριμένα πειραματικά δεδομένα, όπου είναι ένα αρκετά αξιόπιστο ποσοστό.



Σχήμα 21. Βαθμοί απόδοσης συναρτήσει του ζ για τους δύο συλλέκτες.

Παρατηρώντας το παραπάνω σχήμα, είναι εύκολα αντιληπτό ότι όσο αυξάνεται η θερμοκρασιακή διαφορά προς την ηλιακή ακτινοβολία (άξονας X) τόσο αυξάνεται η διαφορά της απόδοσης μεταξύ των δύο ευθειών. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο σφάλμα που έχουν μεταδώσει τα μετρητικά όργανα για το εκάστοτε πείραμα. Ειδικότερα, ο ερευνητής της συγκεκριμένης πειραματικής διάταξης, έχει καταγράψει σε πίνακα, τόσο τα σφάλματα που αποδίδουν τα όργανα, όσο και την τελική διακύμανση που μπορεί να έχει ο βαθμός απόδοσης. Τα στοιχεία αυτά παρουσιάζονται στους **Πίνακες 7 & 8**.

Πίνακας 7. μετρητικά όργανα πειράματος και πιθανότητα σφάλματος.

Device	Specification	Precision
Power sensor	WBI021S91 (Weibo, China)	0.5%
Pyranometer	TQB-2 (Sunlight, China)	≤2%
Thermocouple	0.2 mm T-type (USTC, China)	±0.2°C
Data collection	34970A (Agilent, USA)	/
Pressure sensor	P3308 (Germany)	≤0.5% of FS

Στον **Πίνακα 7**, παρατηρείται ότι τα μετρητικά όργανα έχουν μεγάλη αξιοπιστία και μικρή διακύμανση για το σφάλμα που μεταφέρεται μέσα στην καταγραφή των μετρήσεων. Στη συνέχεια, στον **Πίνακα 8**, ο συντάκτης παραθέτει την τυπική απόκλιση που μπορεί να έχουν συνολικά οι τελικές μετρήσεις που παρουσιάζει, όπως αυτή του βαθμού απόδοσης. Η θεωρία της μετάδοσης του σφάλματος, όπου αξιοποιήθηκε στη πειραματική διαδικασία, είναι του υπολογισμού του RME (Relative Mean Error) από την ερευνητική εργασία [22], όπου ο συντάκτης έχει ακολουθήσει κανονική κατανομή Student με διάστημα εμπιστοσύνης 95%, κάτι παρόμοιο με την πειραματική διαδικασία στην **παράγραφο 2.2.2**.

Πίνακας 8. RME διακύμανση που μπορούν να έχουν οι τιμές.

Variable	T_w	H	M^*	η_{sys}	η_{col}^*
RME	0.062%	2%	0.667%	4.013%	22.818%

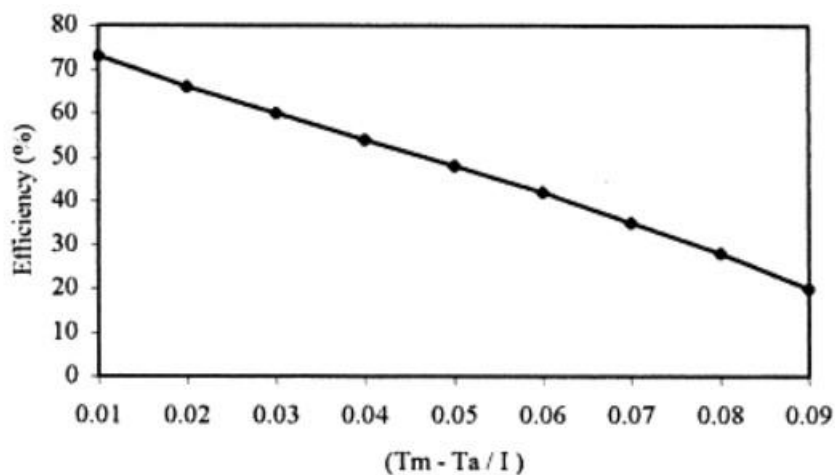
* M is the water mass in the water tank.

Στον **Πίνακα 8**, παρατηρείται ότι το σφάλμα του η_{col} (απόδοση συλλέκτη) είναι σε ποσοστό της τάξεως του 22.8%. Αυτό κεντρίζει το ενδιαφέρον, διότι είναι ένα μεγάλο ποσοστό, το οποίο αν εισαχθεί ως τυπική απόκλιση για τις τιμές των βαθμών απόδοσης, τότε αυτές θα μπορούσαν να συμπίπτουν ή ακόμα και να επιτευχθεί μια μεγαλύτερη απόδοση. Επιπλέον, στο διάγραμμα (**Σχήμα 22**) που παρουσιάζει ο ερευνητής εμφανίζεται το η_{col} , οπότε με την ύπαρξη μιας γραμμής διακυμάνσεως της απόδοσης θα ήταν ευκολότερα διακριτή η τυπική απόκλιση. Τέλος, αναφέρεται ότι η διακύμανση της απόδοσης, για την μέρα του πειράματος, ήταν αυτολεξεί «An average efficiency of $58.22 \pm 12.81\%$ was obtained on this day», γεγονός που σημαίνει ότι το πραγματικό η_{col} θα μπορούσε να ήταν 12.81% αντί του 22.81%. Αυτή η διόρθωση θα

μείωνε αρκετά το σφάλμα της απόδοσης και θα ήταν μέσα σε πιο λογικά πλαίσια. Παρόλα αυτά παραμένει ένα μεγάλο ποσοστό σφάλματος [23].

2.2.7. Πειραματική μελέτη ηλιακού θερμοσίφωνα με σταθερή ροή για χειμερινές μέρες στο Μπαχρέιν

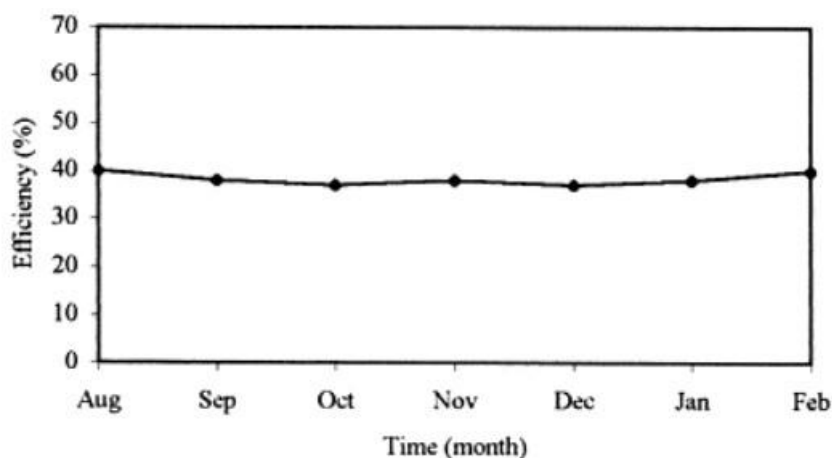
Στη συγκεκριμένη εργασία, ο συγγραφέας, από το πανεπιστήμιο του Μπαχρέιν, τοποθέτησε ένα θερμοσιφωνικό σύστημα σε εξωτερικό χώρο, με σκοπό την καταγραφή της συμπεριφοράς του στις χειμερινές μέρες, υπό σταθερή παροχή που ανέρχεται στα 0.02 kg/s. Ειδικότερα, αξιοποιήθηκαν μετρήσεις από τρεις διαφορετικές μέρες, μία ηλιόλουστη, μία με μερική συννεφιά και μία εντελώς συννεφιασμένη μέρα. Οι σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν είναι κοινές, όπως και για τις προηγούμενες παραγράφους του κεφαλαίου 2.2., με αυτές του **Κεφαλαίου 4**. Στα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν, φαίνεται, ότι για εκείνες τις μέρες, η μέση απόδοση υπολογίστηκε κοντά στο 38%, αποτέλεσμα λογικό, καθώς η ηλιακή ακτινοβολία είναι χαμηλότερη κατά την χειμερινή περίοδο. Στο **Σχήμα 23** παρατίθεται το διάγραμμα απεικόνισης των πειραματικών μετρήσεων κατά τη διάρκεια όλου του έτους 1999-2000.



Σχήμα 22. Απόδοση συλλέκτη συναρτήσει του ζ.

Όπως παρατηρείται στο παραπάνω διάγραμμα, είναι εύκολα αντιληπτό ότι ο συλλέκτης μπορεί να πετύχει υψηλή απόδοση της τάξεως $\eta_0 \approx 0.73$, που είναι αρκετά σημαντικό για την καταγραφή στοιχείων από το θερμοσιφωνικό σύστημα με σταθερή ροή (βεβιασμένης ροής). Παρόλα αυτά, στο συγκεκριμένο πείραμα, η απόδοση

κυμαινόταν μεταξύ του 34.1% και 41.2% όπως φαίνεται στο **Σχήμα 24**. Επιπλέον, δεν υπάρχει καμία αναφορά για τα σφάλματα που πιθανόν να εισάγουν τα μετρητικά όργανα, καθώς και καμία περαιτέρω ανάλυση πάνω σε αυτόν τον τομέα [24].



Σχήμα 23. Μέση απόδοση συναρτήσει της χρονικής περιόδου.

2.3. Σύνοψη κεφαλαίου

Στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζονται συγκρίσεις ανάμεσα σε διάφορους τύπους συλλεκτών, με την συλλογή τεχνικών χαρακτηριστικών πιστοποιημένων συλλεκτών και την καταγραφή της απόδοσης που εμφανίζουν. Υψηλότερη απόδοση παρουσιάζουν οι συλλέκτες χωρίς τζάμι έναντι των υπολοίπων και αυτή ανέρχεται σε $\eta \approx 0.9$. Παρόλα αυτά, δεν διατηρείται η συγκεκριμένη απόδοση για μεγάλες θερμοκρασιακές διαφορές. Από την άλλη μεριά, οι συλλέκτες κενού (evacuated tubular), όχι μόνο μπορούν να πετύχουν υψηλή απόδοση, αλλά την διατηρούν σε σχετικά κοντινά επίπεδα για διάφορες θερμοκρασιακές συνθήκες. Επιπροσθέτως, οι συλλέκτες που είναι αξιόπιστοι και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για οικιακή χρήση, πετυχαίνοντας την καλύτερη απόδοση σε αυτόν τον κλάδο, είναι οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες επιλεκτικής επιφάνειας με απόδοση $\eta \approx 0.75$ οι οποίοι δεν έχουν τόσο μεγάλη πτώση στην απόδοση ανάλογα με τις διαφορές θερμοκρασίας.

Το κύριο συμπέρασμα που προκύπτει από αυτό το κεφάλαιο, είναι ότι οι συλλέκτες κενού είναι αποδοτικότεροι, ωστόσο, λόγω του κόστους τους, προορίζονται για βιομηχανική χρήση. Οι συλλέκτες που αποδίδουν περισσότερο και προορίζονται για οικιακή χρήση είναι οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες επιλεκτικής επιφάνειας. Ειδικότερα, ο επίπεδος ηλιακός συλλέκτης παρουσιάζει έναν αρκετά καλό βαθμό

απόδοσης, δημιουργώντας ωστόσο το ερώτημα, εάν με τη τοποθέτηση κυκλοφορητή, θα μπορούσε να πετύχει υψηλότερες αποδόσεις. Στην **παράγραφο 2.2.** γίνεται αναφορά τόσο στον ηλιακό συλλέκτη ελεύθερης ροής, όσο και βεβιασμένης. Οι αποδόσεις που έχουν καταγραφεί στο **Κεφάλαιο 2** για την περίπτωση της ελεύθερης ροής κυμαίνονται μεταξύ 0.45 και 0.79, ενώ με την τοποθέτηση κυκλοφορητή και άρα μετατροπής του συστήματος σε σύστημα βεβιασμένης ροής, επιτυγχάνεται απόδοση που κυμαίνεται μεταξύ 0.71 και 0.73. Σε αυτές τις δύο διατάξεις (ελεύθερης και βεβιασμένης ροής) παρατηρείται ότι οι αποδόσεις μπορεί να συμπίπτουν, ωστόσο αυτό εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις περιβαλλοντικές συνθήκες, κατά τη διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας.

Τέλος, ένα σημαντικό χαρακτηριστικό όλων των πειραματικών ερευνών, είναι η διάδοση του σφάλματος. Ειδικότερα, σε αρκετές από τις προαναφερόμενες έρευνες, έχει αξιοποιηθεί η θεωρία του σφάλματος, όμως μόνο σε μία παρουσιάστηκε η διακύμανση της τυπικής απόκλισης που μπορεί να έχει η στιγμιαία απόδοση (**2.2.3.**). Σε μία προαναφερθείσα πειραματική μελέτη, αξιοποιήθηκε η κατανομή Student, όπου εμφάνισε το μεγαλύτερο σφάλμα (**2.2.6.**), παρόλα αυτά δεν φάνηκε να αξιοποιείται αυτό το μέσο σφάλμα που εντοπίστηκε από τα μετρητικά όργανα. Στις υπόλοιπες μελέτες που παρουσιάστηκαν, υπήρχαν παρόμοιες θεωρίες με εκείνη της κατανομής Student, όμως οι ερευνητές βασίστηκαν περισσότερο στο διάστημα εμπιστοσύνης (R^2) το οποίο προκύπτει από την ευθεία του βαθμού απόδοσης. Τα προαναφερόμενα στοιχεία έχουν συμπτυχθεί στον **Πίνακα 9.**

Πίνακας 9. Σύμπτυξη αποτελεσμάτων από τις έρευνες.

Έρευνες	Τύπος συλλέκτη	η_0 ελάχιστο	η_0 μέγιστο	Ενσωμάτωση σφάλματος	Θεωρία σφάλματος
Βιβλιογραφικά (4.1)	Επιλεκτική επιφάνεια	0.75	0.75	Όχι	-
	Μονό τζάμι	0.63	0.82	Όχι	-
	Χωρίς τζάμι	0.86	0.9	Όχι	-
	κενού	0.37	0.78	Όχι	-
4.2.1	FTPU	-	0.47	-	-
	ICS	-	0.63	-	-
4.2.2	FPCU	0.49 (TRNSYS)	0.51 (πειραματικά)	R^2	Διάστημα εμπιστοσύνης
4.2.3	ETC	0.57	0.59	MLR	Παρόμοιο με την κατανομή Student
	FPC	0.66	0.68	MLR	
4.2.4	Flat Plate	-	0.78	-	-
	Evacuated tubular	-	0.81		
	Plastic no cover	-	0.91		
	Air absorber	-	0.71		
4.2.5	Θερμοσίφωνα κλειστής ροής	-	0.71	R^2	Διάστημα εμπιστοσύνης
4.2.6	Θερμοσίφωνα κλειστής ροής	-	0.73	RME	Κατανομή student
4.2.7	Θερμοσίφωνα κλειστής ροής	-	0.73	-	-

Τέλος, με αφορμή τα προαναφερόμενα, η παρούσα διπλωματική εργασία, πραγματοποιείται με σκοπό να διαμορφωθεί ένα μοντέλο σφάλματος, το οποίο, όποιος θελήσει να εφαρμόσει, ακολουθώντας τα βήματα στο **Κεφάλαιο 3** και με δικιά του έρευνα σχετικά με τη μετάδοση του σφάλματος, θα είναι σε θέση να υπολογίσει τη συνολική τυπική απόκλιση του βαθμού απόδοσης.

Κεφάλαιο 3

3. Σφάλματα Μετρήσεων

Γενικά, ως μετρητικό σφάλμα ορίζεται η διαφορά μεταξύ της πραγματικής τιμής και της μετρούμενης τιμής που καταγράφεται από τα μετρητικά όργανα. Ειδικότερα, η μετρούμενη τιμή δεν μπορεί, σχεδόν σε καμία περίπτωση, να είναι η πραγματική τιμή (πρότυπη τιμή). Έτσι και για τους ηλιακούς συλλέκτες τα μετρητικά όργανα μεταφέρουν ένα ορισμένο ποσοστό σφάλματος στις τελικές μετρήσεις, όπου επηρεάζει τον βαθμό απόδοσης. Οι ονομαστικοί βαθμοί απόδοσης σε διάφορους τύπους συλλεκτών μπορεί να διαφέρουν ελάχιστα, γεγονός που γεννά ερωτήματα για την εφαρμογή του μετρητικού σφάλματος στον υπολογισμό του βαθμού απόδοσης. Ο σκοπός, της παρούσας διπλωματικής, είναι να ελεγχθεί η επιρροή που έχει η μεταφορά του σφάλματος από τα μετρητικά όργανα, μέχρι την τελική απόδοση.

3.1. Τι ορίζεται σφάλμα

Σε κάθε λήψη μέτρησης ενός μεγέθους, πχ. θερμοκρασία, παροχή, ταχύτητα ανέμου κλπ. υπάρχουν και δεδομένα σφάλματα που εισάγονται στην καταγραφή των μετρήσεων. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι το σφάλμα είναι αναπόφευκτο, διότι δεν είναι στη ευχέρεια του εκάστοτε ερευνητή να το αφαιρέσει από την πειραματική διαδικασία. Ωστόσο σε πολλές περιπτώσεις δεν λαμβάνεται υπόψη, με στόχο την εξαγωγή γρήγορων συμπερασμάτων. Το πρώτο σφάλμα που εμφανίζεται το ορίζει ο κατασκευαστής και είναι η τυπική απόκλιση σ (ή τυπικό σφάλμα). Το σ προκύπτει από δοκιμές του μετρητικού οργάνου σε ορισμένες συνθήκες και όσο μικρότερη είναι η τιμή του υποδηλώνει ότι τα σημεία των δεδομένων τείνουν να είναι κοντά στη μέση τιμή \bar{x} . Υπολογίζοντας την διακύμανση σ^2 (Σχέση 3.2) από την \bar{x} (Σχέση 3.1), προκύπτει το σ (Σχέση 3.3) που αφορά τις εκάστοτε συνθήκες μέτρησης.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.1)$$

Με:

- \bar{x} η μέση τιμή του μετρούμενου μεγέθους.
- n ο αριθμός των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν.
- x_i μετρούμενο μέγεθος

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n} \quad (3.2)$$

Με:

- σ^2 η διακύμανση των τιμών (διασπορά).

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} \quad (3.3)$$

Με:

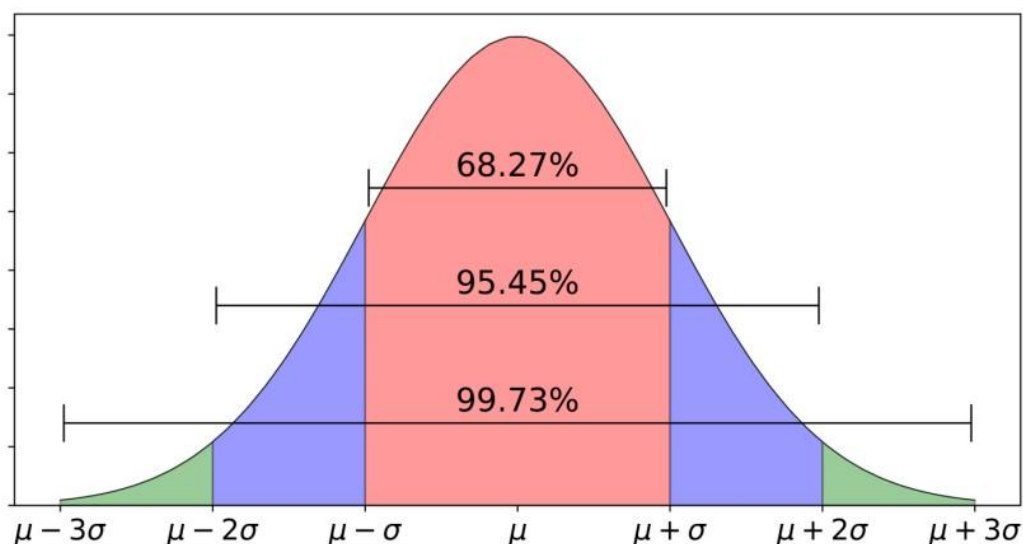
- σ τυπικό σφάλμα μέσης τιμής.

Άρα, σύμφωνα με τα παραπάνω ο κατασκευαστής έχει πραγματοποιήσει την ανάλογη μετρητική διαδικασία και έχει υπολογίσει την ελάχιστη τυπική απόκλιση που εμφανίζεται στην λήψη των μετρήσεων. Η τυπική απόκλιση παρουσιάζεται με τη μορφή $x = \bar{x} \pm \sigma$ ή $\bar{x} - \sigma < x < \bar{x} + \sigma$ όπου x είναι η πραγματική τιμή που πρέπει να λάβουμε υπόψη για τις μετρήσεις και σ η απόκλιση. Επίσης η τυπική απόκλιση μπορεί να δοθεί και σε μορφή ποσοστού ($\pm 5\%$), όπου αυτό αφορά τόσο την εκάστοτε μέτρηση όσο και την μέση τιμή, διότι η μέση τιμή, περιλαμβάνει ένα πλήθος μετρήσεων. Στην **παράγραφο 3.4.1** παρουσιάζεται ο τρόπος επιλογής της τυπικής απόκλισης.

Υπάρχουν και άλλες σχέσεις για τον υπολογισμό της τυπικής απόκλισης, όμως, η προαναφερόμενη χρησιμοποιείται όταν οι μετρήσεις αποτελούν τον πλήρη πληθυσμό του συνόλου που μελετήθηκε, δηλαδή δεν λαμβάνουμε υπόψιν ότι μπορεί να υπάρχουν και άλλες τιμές [25].

Σημαντική είναι επίσης η εξέταση της κανονικής κατανομής και της πλήρους μορφής ανάπτυξης της τυπικής απόκλισης από τη μέση τιμή. Ειδικότερα, σε ένα πλήθος μετρήσεων, είναι αναμενόμενο να μην είναι εφικτή η μέτρηση της πραγματικής τιμής, διότι είναι ανέφικτο να συμπεριληφθούν όλες οι τιμές μέσα στο

εύρος μέτρησης. Ειδικότερα, σύμφωνα με το **Σχήμα 25** (διάστημα εμπιστοσύνης), όσο περισσότερες τιμές γίνουν αποδεκτές τόσο μεταβάλλεται η τυπική απόκλιση που χρησιμοποιείται. Με άλλα λόγια, για διάστημα εμπιστοσύνης 68.27% υπάρχει εύρος σε μία τυπική απόκλιση (σ), για ποσοστό 95.45% εφαρμόζεται τυπική απόκλιση διπλάσια (2σ) και για ποσοστό 99.73% κάλυψης των διακυμάνσεων των τιμών το εύρος είναι σε τριπλάσια απόκλιση (3σ) [26].



Σχήμα 24. Κατανομή τυπικής απόκλισης.

3.2. Συστηματικό σφάλμα

Ως συστηματικό σφάλμα ορίζεται η απόκλιση που έχουν οι μετρήσεις από την πραγματικά μετρούμενη τιμή και παραμένει σταθερό. Συγκεκριμένα, το συστηματικό σφάλμα μπορεί να οφείλεται σε ακανόνιστη βαθμονόμηση του μετρητικού οργάνου, σε σφάλμα του παρατηρητή, σε λειτουργία του μετρητικού οργάνου πέραν των προδιαγραφών που μπορεί να καλύψει (δηλαδή ένα θερμόμετρο να έχει εύρος λειτουργίας $-10\div 110\text{ }^{\circ}\text{C}$ και να πραγματοποιείται μέτρηση στους $120\text{ }^{\circ}\text{C}$) ή να έχει γίνει λανθασμένη τοποθέτηση του μετρικού οργάνου (πχ. Να τοποθετηθεί ένα πυρανόμετρο κάτω από σκιά και να μην οφείλεται σε φυσική συννεφιά). Τέλος, τα συστηματικά σφάλματα μπορούν να συμπεριληφθούν κατευθείαν στις μετρήσεις, πχ όταν μία ζυγαριά είναι βαθμονομημένη στο $+0.05\text{kg}$ και μία ποσότητα μετρηθεί 17.00kg , τότε η πραγματική τιμή είναι 16.95kg [27].

3.3. Τυχαίο σφάλμα

Το τυχαίο σφάλμα μετρήσεων είναι η διαφοροποίηση της μετρούμενης τιμής από την πραγματική τιμή όπου οφείλεται σε τυχαίους παράγοντες. Ειδικότερα, το τυχαίο σφάλμα οφείλεται σε διακυμάνσεις των πειραματικών μετρήσεων (πχ. αλλαγή στις εξωτερικές συνθήκες ή λανθασμένης βαθμονόμησης των ανεξάρτητων μεταβλητών), σε αδυναμία ανάγνωσης του μετρητικού οργάνου (πχ. αναλογικό μετρητικό όργανο και η ένδειξη της τιμής να είναι ανάμεσα σε δύο αριθμούς), σε διαταραχές του περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια του πειράματος σε κάποιο χρονικό διάστημα (πχ. εξωτερικός θόρυβος κατά την λήψη μετρήσεων από ντεσιμπελόμετρο), σε στατιστική φύση του μετρούμενου μεγέθους ή αδυναμία ορισμών ή μεθόδων (πχ. το που θα μετρηθεί η θερμοκρασία ενός δωματίου). Τα τυχαία σφάλματα όμως, είναι μετρούμενα και χρησιμοποιούν, όχι μόνο τις σχέσεις 3.1, 3.2 και 3.3, αλλά και τις παρακάτω εξισώσεις.

Για να υπολογιστεί το τυπικό σφάλμα της μέσης τιμής από μια σειρά μετρήσεων που είναι σε κανονική κατανομή, αρκεί η παρακάτω σχέση:

$$\text{Τυπικό σφάλμα (τυπική απόκλιση): } \sigma_{\mu} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (3.4)$$

για διάστημα εμπιστοσύνης $p=68.3\%$. Συνήθως δίνεται από τον κατασκευαστή η ελάχιστη τυπική απόκλιση.

Πιθανό σφάλμα: $0.675 \cdot \sigma_{\mu}$ για διάστημα εμπιστοσύνης 50%.

Μέγιστο πιθανό σφάλμα: $3 \cdot \sigma_{\mu}$ για διάστημα εμπιστοσύνης 99.74%

Τα προαναφερόμενα εφαρμόζονται σε οποιαδήποτε περίπτωση πρέπει να υπολογιστεί το τυχαίο σφάλμα για μία δεδομένη σειρά μετρήσεων ενός μεγέθους. Βέβαια, σε περίπτωση που υπάρχει μία συνάρτηση, θα πρέπει να υπολογιστεί τόσο η μέση τιμή εκ νέου, όσο και η τυπική απόκλιση (τυχαίο σφάλμα) με διαφορετικούς σχέσεις. Η μεταβλητότητα σ_Z^2 είναι στην ουσία η μεταβολή που μπορεί να υπάρχει ανάμεσα σε δύο ή περισσότερα μετρούμενα μεγέθη που βρίσκονται σε συνάρτηση.

- Γραμμική συνάρτηση: (3.5)

$$z = ax + by$$

$$\mu_z = a\mu_x + b\mu_y$$

$$\sigma_z^2 = a^2 \cdot \sigma_x^2 + b^2 \cdot \sigma_y^2$$

- Γινόμενο: (3.6)

$$z = x \cdot y$$

$$\mu_z = \mu_x \cdot \mu_y$$

$$C_z^2 = C_x^2 + C_y^2 = \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2 = y^2 + x^2$$

$$\text{ή } \sigma_z^2 = a^2 \cdot (\mu_y^2 \cdot \sigma_x^2 + \mu_x^2 \cdot \sigma_y^2)$$

- Πηλίκο: (3.7)

$$z = \frac{x}{y}$$

$$\mu_z = \mu_x / \mu_y$$

$$C_z^2 = C_x^2 + C_y^2 = \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2 = \left(\frac{1}{y}\right)^2 + \left(\frac{x}{y^2}\right)^2$$

$$\text{ή } \sigma_z^2 = \frac{a^2}{\mu_y^2} \cdot \left(\sigma_x^2 + \frac{\mu_x^2}{\mu_y^2} \cdot \sigma_y^2\right)$$

- Με:

a, b σταθερές μεταβλητές.

μ_z μέση τιμή της συνάρτησης.

σ_z^2 τη μεταβλητότητα της συνάρτησης.

C_z^2 τη συντελεστή μεταβλητότητας (αντί της μεταβλητότητας σ_z^2).

Στις παραπάνω σχέσεις εντοπίζεται η λέξη «συντελεστής μεταβλητότητας» ο οποίος υπολογίζεται από την σχέση 2.8 όπου είναι μία παράμετρος της διασποράς των τιμών και πολλές φορές εκφράζεται και ως ποσοστό.

$$C = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (3.8)$$

Τέλος για να εφαρμοστούν οι προαναφερόμενες σχέσεις (3.5 & 3.6 & 3.7), δηλαδή όταν υπάρχει συνάρτηση μεταξύ δύο ή περισσότερων μεγεθών, θα πρέπει για κάθε μεταβλητή, ο συντελεστής μεταβλητότητας να είναι μικρότερος από 20% ή 0.2 [28].

$$C_i = \frac{\sigma_i}{\mu_i} < 20\% \quad (3.9)$$

3.4. Συνολικό σφάλμα μετρήσεων

Από τις ενότητες 3.2 & 3.3 μπορεί να γίνει κατανοητό ότι το συνολικό σφάλμα προκύπτει από το συνδυασμό του συστηματικού σφάλματος (s) και του τυχαίου σφάλματος (τυπική απόκλιση) της μέσης τιμής (ε_μ). Τέλος, το ολικό σφάλμα, με βάση τη στατιστική, ισούται με την συνισταμένη αυτών των δύο σφαλμάτων.

$$\varepsilon_{ολ} = \sqrt{\varepsilon_\mu^2 + s^2} \quad (3.10)$$

Όπου:

$\varepsilon_\mu = 3\sigma_z$ το μέγιστο πιθανό σφάλμα της μέτρησης
και s το τυπικό σφάλμα της μετρήσεως.

Σε περίπτωση που ένα μέγεθος z αποτελείται από συνάρτηση δύο ή και περισσότερων μετρημένων μεγεθών, τότε θα πρέπει να βρεθεί η μεταβλητότητα ή ο συντελεστής μεταβλητότητας σ_z^2 , όπως στις σχέσεις 3.5, 3.6 & 3.7 αντίστοιχα. Στην προκειμένη περίπτωση από τις ίδιες εξισώσεις υπολογίζεται και το συστηματικό σφάλμα s για την εκάστοτε περίπτωση, με την προϋπόθεση ότι τα επιμέρους συστηματικά σφάλματα είναι γνωστά [28].

3.4.1. Σφάλμα οριζόμενο από τον κατασκευαστή

Κατά την επεξεργασία των μετρήσεων που λαμβάνονται από την πειραματική διαδικασία, δημιουργείται το ερώτημα, αν θα ληφθεί υπόψιν το σφάλμα του κατασκευαστή ή θα αμεληθεί, όπως επίσης και ποιο είδος σφάλματος δίνεται από το κατασκευαστή για το εκάστοτε μετρητικό όργανο. Έπειτα από διερεύνηση σε βιβλιογραφικές πηγές, υπάρχει κοινή άποψη για το σφάλμα που μας παρουσιάζει ο

κατασκευαστής. Συγκεκριμένα, έχει συμπεριληφθεί στο μετρητικό όργανο το τυχαίο σφάλμα που ενδεχομένως να προκύψει κατά την καταγραφή των μετρήσεων. Ειδικότερα, αναφέρεται στις πηγές ότι ως σφάλμα του κατασκευαστή ορίζεται η ελάχιστη τυπική απόκλιση που μπορούν να έχουν οι μετρήσεις μίας πειραματικής διαδικασίας. Αν ο μελετητής, με την χρήση της σχέσης (3.4), υπολογίσει μεγαλύτερο σφάλμα από εκείνο του κατασκευαστή, τότε, θα πρέπει να κρατηθεί αυτό ως τυπική απόκλιση και να συνεχίσει την μελέτη με το δικό του σφάλμα. Αν, από την άλλη, ο μελετητής υπολογίσει μικρότερο τυπικό σφάλμα από τον κατασκευαστή, τότε, θα κρατηθεί το σφάλμα του κατασκευαστή. Στην περίπτωση δε, που ο κατασκευαστής δώσει ποσοστό τυπικής απόκλισης, τότε, ο μελετητής καλείται είτε να συμπεριλάβει στην κάθε μέτρηση το ποσοστό του σφάλματος, είτε να το εφαρμόσει κατευθείαν στην μέση τιμή των μετρήσεων, αναλόγως τον τύπο της εργασίας που έχει να φέρει εις πέρας. Για παράδειγμα, σε ένα ηλεκτρικό μετρούμενο μέγεθος, αν υπάρχει μία μετρούμενη ποσότητα ενός αντικειμένου ως προς μια αυξητική τάση V και έντασης ρεύματος I και ζητούμενο είναι ο υπολογισμός της εκάστοτε αντίστασης R , τότε δεν είναι ανάγκη αυτό το ποσοστό να συμπεριληφθεί στην μέση τιμή των μετρήσεων του, αλλά μπορεί να το συμπεριλάβει στην εκάστοτε τιμή και να πάρει την απόκλιση της κάθε μέτρησης. Στην περίπτωση που ο κατασκευαστής δίνει το τυπικό σφάλμα σε νούμερο (π.χ. ± 0.5), θα πρέπει να πραγματοποιηθεί η ίδια διαδικασία και να βρεθεί η περίπτωση που υπάρχει μεγαλύτερη τυπική απόκλιση. Συνοψίζοντας, μπορεί κανείς να αντιληφθεί ότι ο κατασκευαστής παρέχει το μέσο τυχαίο σφάλμα που μπορεί να έχει το μετρητικό όργανο, άρα όταν η τυπική απόκλιση υπολογιστεί από τη σχέση (3.2.), είτε θα προκύψει μεγαλύτερη και θα χρησιμοποιηθεί αυτή για τον υπολογισμό των μετρήσεων, είτε μικρότερη, όποτε και θα χρησιμοποιηθεί η τιμή του κατασκευαστή. Τέλος, το συστηματικό σφάλμα, αν δεν υπάρχει κάποια λάθος βαθμονόμηση ή περιβαλλοντικός παράγοντας, τότε, δεν είναι ανάγκη να ληφθεί υπόψιν για τον υπολογισμό του συνολικού σφάλματος [29].

3.5. Μεταφορά σφάλματος σε πειραματική διαδικασία

Σε μια πειραματική διαδικασία, που αφορά τον υπολογισμό του βαθμού απόδοσης ενός ηλιακού συλλέκτη και λαμβάνεται υπόψιν η μεταφορά του σφάλματος,

περιλαμβάνονται οι σχέσεις 4.1 4.2 & 4.3. καθώς και οι σχέσεις 3.5 3.6 & 3.7 αντίστοιχα. Στις σχέσεις για τον υπολογισμό της απόδοσης, εμπριέχονται τόσο η γραμμική μεταβολή (άθροισμα) του σφάλματος, όσο και η μη γραμμική (γινόμενο και πηλίκο). Τέλος, παρατίθενται ενδεικτικοί υπολογισμοί της μεταφοράς του σφάλματος βασισμένη στο **Κεφάλαιο 4**.

$$\sum_{i=1}^n \Delta T = \sum_{i=1}^n (T_{out} - T_{in}) \quad (3.11)$$

$$\mu_{\Delta T} = \mu_{T_{out}} - \mu_{T_{in}} \quad (3.12)$$

$$\sigma_{\Delta T}^2 = \sigma_{T_{out}}^2 + \sigma_{T_{in}}^2 = 0.5^2 + 0.5^2 = 0.25 + 0.25 = 0.5$$

$$\sigma_{\Delta T} = \sqrt{0.5} = 0.71$$

(αν λαμβανόταν υπόψιν η τυπική απόκλιση του κατασκευαστή από την **Εικόνα 5**)

Στη παραπάνω σχέση υπολογίστηκε η τυπική απόκλιση που έχει η θερμοκρασιακή διαφορά με τη βοήθεια της σχέσης (3.5).

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{out} - T_{in}) \quad (3.13)$$

$$\mu_{\dot{Q}} = \mu_{\dot{m}} \cdot \mu_{\Delta T} \cdot C_p \quad (3.14)$$

$$\sigma_{\dot{Q}}^2 = \alpha^2 \cdot (\mu_y^2 \cdot \sigma_x^2 + \mu_x^2 \cdot \sigma_y^2) = C_p^2 \cdot (\mu_{\Delta T}^2 \cdot \sigma_{\dot{m}}^2 + \mu_{\dot{m}}^2 \cdot \sigma_{\Delta T}^2)$$

$$\sigma_{\dot{Q}} = C_p \sqrt{(\mu_{\Delta T}^2 \cdot \sigma_{\dot{m}}^2 + \mu_{\dot{m}}^2 \cdot \sigma_{\Delta T}^2)} \quad (3.15)$$

Στη παραπάνω σχέση υπολογίστηκε η τυπική απόκλιση που θα έχει η προσλαμβανουσα θερμότητα με τη βοήθεια των σχέσεων (3.6 & 3.8).

$$\eta = \frac{\dot{Q}}{(A_c \cdot G_t)} \quad (3.16)$$

$$\mu_{\eta} = \frac{\mu_{\dot{Q}}}{\mu_{G_T}} \cdot \frac{1}{A_c} \quad (3.17)$$

$$\sigma_{\eta}^2 = \frac{\alpha^2}{\mu_y^2} \cdot \left(\sigma_x^2 + \frac{\mu_x^2}{\mu_y^2} \cdot \sigma_y^2 \right) = \frac{\left(\frac{1}{A_c} \right)^2}{\mu_{G_T}^2} \cdot \left(\sigma_{\dot{Q}}^2 + \frac{\mu_{\dot{Q}}^2}{\mu_{G_T}^2} \cdot \sigma_{G_T}^2 \right)$$

$$\sigma_{\eta} = \frac{1}{A_c \cdot \mu_{G_T}} \cdot \sqrt{\left(\sigma_{\dot{Q}}^2 + \frac{\mu_{\dot{Q}}^2}{\mu_{G_T}^2} \cdot \sigma_{G_T}^2 \right)} \quad (3.18)$$

Στη παραπάνω σχέση υπολογίστηκε η τυπική απόκλιση του τελικού βαθμού απόδοσης που προκύπτει για τον συλλέκτη, για την εκάστοτε ώρα της ημέρας. Χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις (3.7 & 3.8).

Τέλος, αξιοσημείωτη είναι η αναφορά της συνολικής τυπικής απόκλισης, που εφαρμόζεται στον τελικό βαθμό απόδοσης, για τον εκάστοτε συλλέκτη.

Κεφάλαιο 4

4. Μεθοδολογία

4.1. Πειραματική διάταξη και μετρητικά όργανα

Φωτογραφίες πειραματικής διάταξης και τεχνικά χαρακτηριστικά:

- Θερμοσιφωνικό σύστημα (ανοιχτού τύπου)

Στην παρακάτω εγκατάσταση, ο κύκλος του ρευστού από τον συλλέκτη στο θερμοδοχείο και αντίστροφα, πραγματοποιείται αποκλειστικά και μόνο από την ηλιακή ακτινοβολία. Ειδικότερα, το σύστημα λειτουργεί με τη φυσική ροή του υγρού, το οποίο θερμαίνεται από την ενέργεια του ηλίου και δημιουργείται, έτσι, μια διαφορά πυκνότητας, ανάμεσα στο ζεστό και στο κρύο υγρό. Έτσι ξεκινά η φυσική κυκλοφορία του νερού και η λειτουργία του θερμοσιφωνικού συστήματος.



Εικόνα 1. Εγκατάσταση θερμοσιφωνικού συστήματος (ανοιχτού τύπου).

- Σύστημα βεβιασμένης ροής (κλειστού τύπου).

Στη περίπτωση της βεβιασμένης ροής, η κυκλοφορία του υγρού πραγματοποιείται με την βοήθεια μίας αντλίας (κυκλοφορητή), με σκοπό την σταθερή ροή ανάμεσα στο θερμοδοχείο και τον συλλέκτη, ελαχιστοποιώντας το ρόλο της φυσικής ροής.

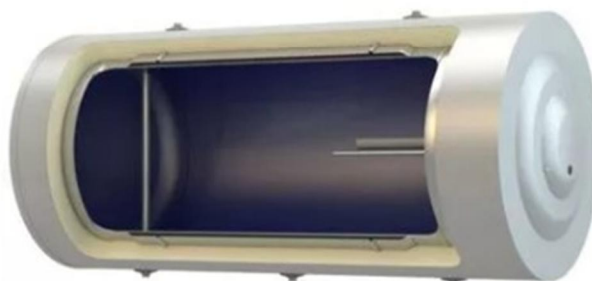


Εικόνα 2. Πειραματική διάταξη εγκατάστασης βεβιασμένης ροής (κλειστού κυκλώματος).

Μετρητικά όργανα και χαρακτηριστικά συστήματος:

- Θερμοδοχείο συλλέκτη

Το συγκεκριμένο θερμοδοχείο έχει χωρητικότητα 120 l. Το θερμοδοχείο είναι το δοχείο όπου είναι μέσα τόσο το νερό χρήσης, όσο και το υγρό κυκλώματος του συλλέκτη. Ειδικότερα, το συγκεκριμένο θερμοδοχείο είναι κατασκευασμένο από χάλυβα με πάχος 2.5mm, ενώ ο μανδύας του είναι 1.5mm. Η επιφάνεια που έρχεται σε επαφή με το νερό, που προορίζεται για χρήση, έχει υγρή επισμάλτωση και ανόδιο μαγνησίου. Σε αυτό είναι ενσωματωμένη ηλεκτρική αντίσταση 4kW, σε περίπτωση σύνδεσης με θερμοστάτη, επομένως το σύστημα είναι διπλής ενέργειας. Το εξωτερικό μέρος του, είναι από γαλβανιζέ λαμαρίνα με ηλεκτροστατική βαφή πάχους 0.5mm. Τέλος, υπάρχει θερμική μόνωση από αφρό πολυουρεθάνης με πυκνότητα 40-45 kg/m³ [30].



Εικόνα 3. θερμοδοχείο συλλεκτών.

- Ηλιακός συλλέκτης

Ο ηλιακός συλλέκτης της εγκατάστασης είναι συνολικού εμβαδού 1.51 m^2 και ενεργού εμβαδού 1.35 m^2 . Ο συλλέκτης είναι με μονό τζάμι μαύρου χρώματος και είναι τοποθετημένος υπό κλίση 55° . Τα τεχνικά του χαρακτηριστικά και το εύρος λειτουργίας του αναγράφονται στην **Εικόνα 4**. Επιπλέον, ο σκελετός του συλλέκτη είναι κατασκευασμένος από προφίλ αλουμινίου, ενώ στα πλευρά και στην πλάτη του φέρει μόνωση από υαλοβάμβακα πάχους 30mm και $\lambda=0.03 \text{ w/m}^2$. Ο υδροσκελετός του, το μέρος του συλλέκτη όπου μετατρέπει την ηλιακή ενέργεια σε θερμική, είναι κατασκευασμένος από χαλκό και λόγω της τεχνολογίας Laser που φέρει ο υδροσκελετός, έχει μέγιστη απόδοση $\alpha=95\%$ και $\varepsilon=3\%$. Τέλος, το τζάμι του συλλέκτη έχει πάχος 3.2mm και είναι φτιαγμένο από ειδικό κρύσταλλο Low iron, όπου είναι προσκολλημένο πάνω και κάτω από αυτόν με λάστιχο [30].



Εικόνα 4. Βασικά χαρακτηριστικά συλλεκτών.

- Θερμοστοιχείο (Θερμόμετρο)

Θερμικό ζεύγος για την καταγραφή τόσο της θερμοκρασίας του νερού όσο και για του περιβάλλοντος. Το συγκεκριμένο καταγραφικό όργανο, έχει σημαντικό ρόλο, καθώς με αυτό γίνεται γνωστή η θερμοκρασία περιβάλλοντος και υγρού μέσα στο συλλέκτη. Επιπλέον, αναγράφεται και η τυπική απόκλιση του κατασκευαστή.

Πίνακας 10. Θερμοζεύγος [31].

Προδιαγραφές καλωδίου:
Σωλήνας από ανοξείδωτο χάλυβα διαμέτρου 6mm επί μήκους 30mm
Το καλώδιο έχει μήκος 36" / 91 cm, διάμετρος 4 mm
Περιέχει αισθητήρα θερμοκρασίας συμβατό με DS18B20
Εάν ο αισθητήρας σας έχει τέσσερα καλώδια - Το κόκκινο συνδέεται σε 3-5 V, το μαύρο συνδέεται στη γείωση και το λευκό είναι δεδομένα. Το χάλκινο σύρμα είναι συγκολλημένο στη θωράκιση του σύρματος
Εάν ο αισθητήρας σας έχει τρία καλώδια - Το κόκκινο συνδέεται σε 3-5 V, το Μπλε/Μαύρο συνδέεται στη γείωση και το Κίτρινο/Λευκό είναι δεδομένα
Τεχνικά χαρακτηριστικά:
Εύρος θερμοκρασίας χρήσης: -55 έως 125°C (-67°F έως +257°F)
Επιλέξιμη ανάλυση 9 έως 12 bit
Χρησιμοποιεί διασύνδεση 1-Wire- απαιτεί μόνο μία ψηφιακή ακίδα για επικοινωνία
Μοναδικό αναγνωριστικό 64 bit εγγράφηκε σε τσιπ
Πολλοί αισθητήρες μπορούν να μοιράζονται μια ακίδα
±0,5°C Ακρίβεια από -10°C έως +85°C
Σύστημα συναγερμού ορίου θερμοκρασίας
Ο χρόνος ερωτήματος είναι μικρότερος από 750 ms
Χρησιμοποιείται με ισχύ/δεδομένα 3,0V έως 5,5V



DC ELECTRICAL CHARACTERISTICS			(-55°C to +125°C; V _{DD} =3.0V to 5.5V)				
PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS	NOTES
Supply Voltage	V _{DD}	Local Power	+3.0		+5.5	V	1
Pullup Supply Voltage	V _{PU}	Parasite Power	+3.0		+5.5	V	1,2
		Local Power	+3.0		V _{DD}		
Thermometer Error	t _{ERR}	-10°C to +85°C			±0.5	°C	3
		-55°C to +125°C			±2		
Input Logic-Low	V _{IL}		-0.3		+0.8	V	1,4,5
Input Logic-High	V _{IH}	Local Power	+2.2		The lower of 5.5 or V _{DD} + 0.3	V	1, 6
		Parasite Power	+3.0				
Sink Current	I _L	V _{I/O} = 0.4V	4.0			mA	1
Standby Current	I _{DDS}			750	1000	nA	7,8
Active Current	I _{DD}	V _{DD} = 5V		1	1.5	mA	9
DQ Input Current	I _{DQ}			5		μA	10
Drift				±0.2		°C	11

Εικόνα 5. Θερμοζεύγος και τεχνικά χαρακτηριστικά [31].

Το θερμοζεύγος δεν προορίζεται για χρήση σε αλμυρό νερό ή άλλο διαβρωτικό περιβάλλον. Το θερμοζεύγος που επιλέχθηκε δεν έχει βαθμολογία IP (αριθμός αδιάβροχης προστασίας) και δεν είναι εγγυημένο για μακροχρόνια χρήση/υψηλή πίεση.

- Πυρανόμετρο

Το πυρανόμετρο είναι συσκευή με την οποία καταγράφεται η ηλιακή ακτινοβολία. Το όργανο αυτό τοποθετείται στον συλλέκτη πάνω στο κεκλιμένο του πεδίο, με σκοπό την ορθή καταγραφή των μετρήσεων.



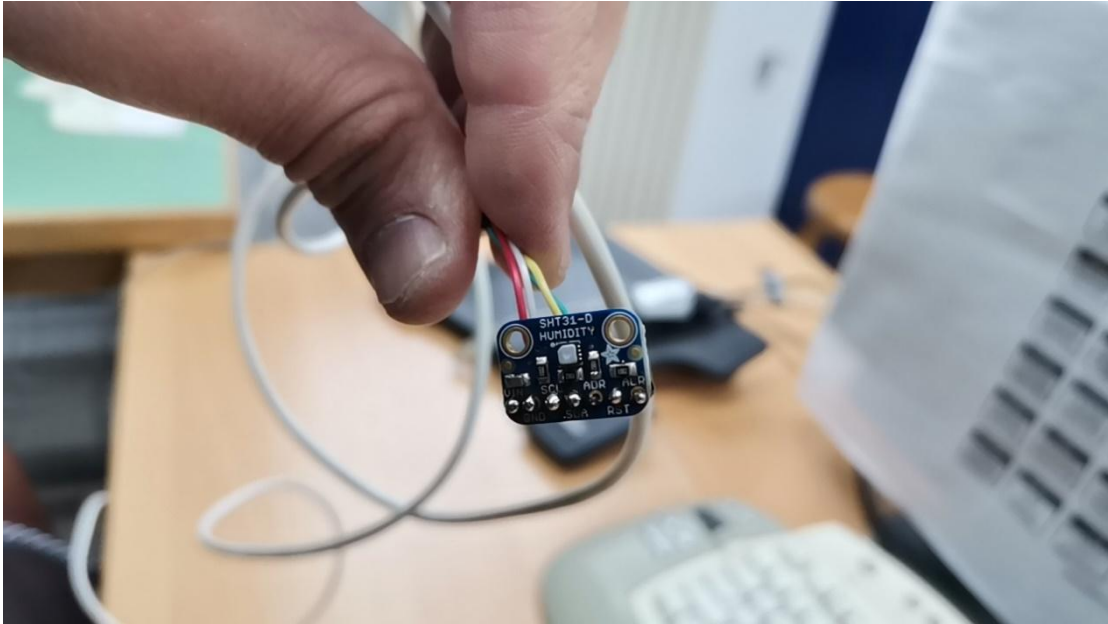
Εικόνα 6. Πυρανόμετρο.

Πίνακας 11. Χαρακτηριστικά πυρανόμετρον [32].

Τεχνικά χαρακτηριστικά:	
Φασματικό εύρος (50% μονάδες)	300 έως 2800 nm
Ευαισθησία	10 έως 32 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$
Χρόνος απόκρισης	20 sec
Μηδενική μετατόπιση A	< 15 W/m^2
Μηδενική μετατόπιση B	< 5 W/m^2
Απόκριση κατεύθυνσης (έως 80° με δέσμη 1000 W/m^2)	< 20 W/m^2
Εξάρτηση ευαισθησίας από τη θερμοκρασία (-10 °C έως +40 °C)	< 4 %
Εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας	-40 °C έως +80 °C
Μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία	2000 W/m^2
οπτικό πεδίο	180°

- Καταγραφικό ισχύος

Το καταγραφικό ισχύος είναι μία πλακέτα καταγραφής ισχύος για την αντλία. Το μετρητικό αυτό όργανο χρησιμοποιείται για την καταγραφή της ισχύος που χρειάζεται η αντλία στις διάφορες πρότυπες συνθήκες, στις οποίες θα ληφθούν οι μετρήσεις. Η καταγραφή της ισχύος είναι δευτερεύουσα μέτρηση καθώς αυτό που επηρεάζει τις μετρήσεις είναι η θερμοκρασιακή διαφορά και η παροχή.



Εικόνα 7. Στοιχεία πλακέτας καταγραφής ισχύος.

Πίνακας 12. Τεχνικά χαρακτηριστικά καταγραφικού ισχύος [33].

Τεχνικά χαρακτηριστικά:
Αντίσταση αίσθησης ρεύματος 0,1 ohm 1% 2W
Έως +26V τάση στόχου
Μέτρηση ρεύματος έως $\pm 3,2A$, με ανάλυση $\pm 0,8mA$
Σημείωση: Το μπλοκ ακροδεκτών που περιλαμβάνεται στο προϊόν σας μπορεί να είναι μπλε ή μαύρο.
Αυτή η πλακέτα/τσιπ χρησιμοποιεί διευθύνσεις I2C 7-bit 0x40, 0x41, 0x44, 0x45, με δυνατότητα επιλογής με jumpers
Διαστάσεις προϊόντος: 25,6mm x 20,4mm x 4,7mm / 1,0" x 0,8" x 0,2"

- Παροχή

Η παροχή λαμβάνεται από μετρητικό όργανο τόσο για την εισαγωγή όσο και την εξαγωγή του νερού. Το συγκεκριμένο όργανο χρησιμοποιείται για την καταγραφή της παροχής του υγρού από τον συλλέκτη στο θερμοδοχείο και αντιστρόφως και για τα δύο συστήματα. Επιπλέον, στο κλειστό κύκλωμα καταγράφεται η παροχή πριν και μετά την αντλία, ώστε να προκύψουν όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικά δεδομένα και να επιτευχθεί ο έλεγχος της σταθερής ροής.

parameters:apply	to automatic gas water heater
1 the minimum Rated working voltage	DC 5V-24V
2. Maximum working current	15 mA (DC 5V)
3. Operating voltage range	DC 5 to 18 V
4. Load capacity	≤ 10 mA (DC 5V)
5. Operating temperature range	≤ 80 °C
6. Use humidity range of	35% ~ 90% RH (or frost)
7,allows pressure	or less 1.75Mpa pressure
8storage temperature	-25 ~ + 80 °C
9, storage humidity	25% ~ 95% RH
1, Output pulse high level	> DC 4.5 V (input voltage DC 5 V)
2. Output pulse low level	<DC 0.5 V (input voltage DC 5 V)
3. Accuracy (flow rate-pulse output)	1 ~ 30 L / min±Within5%
4. Output pulse duty cycle	50 ± 10%
5. Output rise time	0.04μS
6. Output fall time	0.18μS
7. Flow rate-pulse characteristic	level test pulse frequency (Hz) = [7.5 Q] ± 3% (Level test) (Q is the flow rate L / min)
8. The impact-resistant	product is well packaged, and it drops freely from the height of 50cm in the X, Y, and Z directions to the concrete surface, and the accuracy changes within 5%.
9, insulation resistance	Hall sensor and copper valve body insulation resistance above 100MΩ. (DC 500V)
10, heat resistance	in the environment of 80 ± 3 °C for 48 hours, returned to normal temperature for 1-2 hours without abnormalities, and parts without cracks, slack, expansion, deformation and other phenomena, the accuracy change within 10%.

e m e n t s	11. Cold resistance	: Put it in the environment of -20 ± 3 °C for 48h, return to normal temperature for 1-2h without abnormality, and the parts are free from cracks, slackness, swelling, deformation and other phenomena, and the accuracy changes within 10%.
	12. Moisture resistance	After leaving for 72 hours in an environment with 40 ± 2 °C and relative humidity 90% ~ 95% RH, the insulation resistance is above 1MΩ.
	13.strength:	PullingA 10N pulling force is applied to the lead-out wire for 1 minute, no loosening or breaking, and no change in performance.
	14. Durability	At normal temperature, 0.1 MPa water pressure is passed from the water inlet to turn on 1S and turn off 0.5S as a cycle. The test is 300,000 times without abnormality.

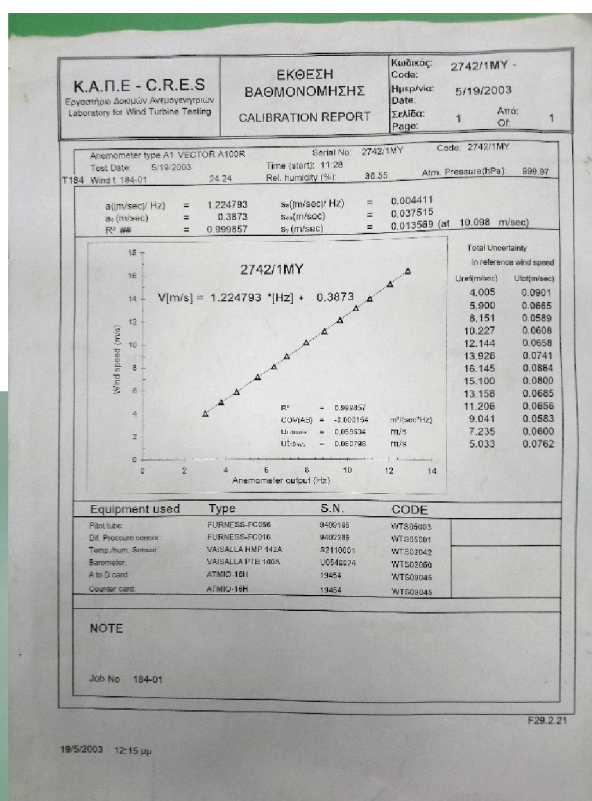


Εικόνα 8. Στοιχεία οργάνου παροχής [36].

- **Ανεμόμετρο**

Με το ανεμόμετρο καταγράφεται η ταχύτητα του ανέμου που υπάρχει τη δεδομένη στιγμή όπου πραγματοποιείται η πειραματική διαδικασία. Σε περίπτωση νηνεμίας, οι μετρήσεις δεν επιφέρουν σημαντική αλλαγή στα τελικά αποτελέσματα. Σε αντίθετη περίπτωση, δηλαδή μεγάλης ταχύτητας ανέμου, υπάρχουν μεγαλύτερες απώλειες λόγω συναγωγής του αέρα με τον συλλέκτη.

Σύμφωνα με την **Εικόνα 9**, το ανεμόμετρο παρουσιάζει υψηλή αξιοπιστία, ενώ παράλληλα παρατίθεται εξίσωση διόρθωσης, για να χρησιμοποιηθεί όπου είναι απαραίτητο. Ως επί το πλείστον, το ανεμόμετρο δε χρίζει περεταίρω μελέτης, διότι δεν είναι το όργανο το οποίο επηρεάζει άμεσα την σύγκριση των πειραματικών μετρήσεων μεταξύ των δύο συστημάτων.



Εικόνα 9. Ανεμόμετρο και η αξιοπιστία του.

4.2. Λειτουργία συστημάτων

Στο συγκεκριμένο σύστημα, το Κρύο Νερό Χρήσης (Κ.Ν.Χ.), διοχετεύεται απευθείας στο θερμοδοχείο χωρητικότητας 120L, μέσω σωληνώσεων με θερμομονωτικό υλικό διαμέτρου 16mm τοιχώματος και 2mm άνοιγμα παροχής. Επιπρόσθετα, υπάρχει ήδη μέσα στο θερμοδοχείο υγρό σε ξεχωριστή πτέρυγα, από το νερό που προορίζεται για χρήση, με σκοπό την κυκλοφορία του μέσα από τον συλλέκτη. Με άλλα λόγια, ο συλλέκτης θερμαίνει το υγρό, το οποίο με τη σειρά του καταλήγει μέσα στο δοχείο αποθήκευσης. Εκεί, μέσω του εναλλάκτη θερμότητας, θερμαίνεται σταδιακά και το νερό χρήσης. Επεξηγηματικότερα, η διαδικασία που πραγματοποιείται, είναι η ακόλουθη. Το υγρό μέσα στο συλλέκτη, η επιφάνεια του οποίου είναι 1.5m² και βρίσκεται γωνία κλίσης 35°, αρχίζει να θερμαίνεται με την πρώτη εμφάνιση του ηλίου και ρέει από τον συλλέκτη στο θερμοδοχείο, μέσω ελικοειδών σωληνώσεων. Αυτό συμβαίνει διότι ως γνωστόν τα θερμά στρώματα νερού έχουν την τάση να ανεβαίνουν προς τα πάνω, λόγω μείωσης της πυκνότητας. Συνεπώς, στο ξεχωριστό δοχείο του αντιψυκτικού υπάρχει μια κίνηση του υγρού και αρχίζει να αυξάνεται η θερμοκρασία του. Στη συνέχεια, μέσω των τοιχωμάτων (εναλλάκτη θερμότητας), η θερμότητα μεταφέρεται προς το εσωτερικό του δοχείου, όπου υπάρχει το Κ.Ν.Χ. Αυτό, λόγω συνεχούς επαφής με το θερμαινόμενο τοίχωμα, αυξάνει επίσης την θερμοκρασία του. Έπειτα από κάποιο χρονικό διάστημα, παρατηρείται διαχωρισμός του νερού, σε Κ.Ν.Χ. και σε Ζεστό.Ν.Χ., όπου το δεύτερο βρίσκεται στα ανώτερα στρώματα του δοχείου. Για τον λόγο, αυτό υπάρχει (συνήθως) σωλήνωση από αυτή την πλευρά, ώστε να γίνεται όσο το δυνατόν καλύτερη εκμετάλλευση του ζεστού νερού. Επίσης, στην πειραματική διάταξη τοποθετούνται θερμομέτρα (τύπου DS18B20), 6 στο σύνολο, για τη μέτρηση τόσο της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος, όσο και για το υγρό σε κάθε φάση του. Έπειτα, τοποθετείται πυρανόμετρο για την καταμέτρηση ηλιακής ακτινοβολίας (τύπου kirpzonen). Εν συνεχεία, τοποθετείται ανεμόμετρο για την καταμέτρηση της έντασης του ανέμου (τύπου A1 VECTOR A100R). Ακολούθως, καταγράφονται οι μετρήσεις μέσω της βοήθειας λογισμικού, ώστε να προχωρήσει η πειραματική διαδικασία στο στάδιο της επεξεργασίας των μετρήσεων. Κατόπιν λαμβάνουν μέρος οι κατάλληλοι υπολογισμοί στο λογισμικό του excel και εν συνεχεία βγαίνουν τα τελικά διαγράμματα, ώστε να παρουσιαστεί τόσο η διακύμανση του βαθμού απόδοσης, όσο και οι συντελεστές των θερμικών απωλειών. Τέλος, αξίζει να

σημειωθεί ότι η ίδια διαδικασία πραγματοποιείται και για το θερμοσιφωνικό σύστημα με κυκλοφορητή, με τη μόνη διαφορά πως το υγρό κυκλοφορεί υπό σταθερή ροή.

4.3. Διαδικασία καταγραφής μετρήσεων

Καταλήγοντας στο σημείο της καταγραφής των μετρήσεων, θα πρέπει να υπάρχει μια προκαθορισμένη δομή όσον αφορά τον τρόπο λήψης των μετρήσεων καθώς επίσης και τη χρονική διάρκεια μεταξύ της καταγραφής, τόσο των περιβαλλοντικών συνθηκών (θερμοκρασία, ηλιακή ακτινοβολία, ταχύτητα ανέμου), όσο και των πειραματικών. Για αυτό το λόγο, ορίστηκε ως όριο, για την μεγαλύτερη κάλυψη όλων των συνθηκών, να πραγματοποιηθεί η διεξαγωγή του πειράματος και στις τέσσερις διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες που μπορούν να επικρατήσουν κατά τη διάρκεια μίας μέρας. Ειδικότερα η πειραματική διαδικασία που παρουσιάζεται στην παρούσα διπλωματική, προτείνεται να διεξαχθεί σε τέσσερις πρότυπες μέρες που θα χαρακτηρίζονται από **α)** πλήρη ηλιοφάνεια **β)** μερική συννεφιά **γ)** πλήρη συννεφιά και **δ)** βροχόπτωση.

Τα μετρητικά όργανα είναι ήδη βαθμονομημένα και έτοιμα προς λειτουργία σύμφωνα με τις προδιαγραφές του καθενός, όπου αναγράφονται στην **Κεφάλαιο 4.1**.

Η καταγραφή των μετρήσεων θα πραγματοποιείται ανά λεπτό. Παράλληλα, οι μετρήσεις που θα ληφθούν και θα αξιοποιηθούν θα είναι έως εκατό το λεπτό. Στη συνέχεια, οι μετρήσεις που έχουν ληφθεί, εισάγονται στο λογισμικό του excel και δημιουργείται το αντίστοιχο διάγραμμα από το οποίο προκύπτει η ευθεία της απόδοσης, για όλη την διάρκεια της ημέρας. Επιπλέον, η καταγραφή των μετρήσεων πραγματοποιείται με τέτοιον τρόπο και με μεγάλη συχνότητα λήψεων, ώστε να μπορεί να εντοπισθεί η τυπική απόκλιση για την εκάστοτε συνθήκη. Όποιος ερευνητής θελήσει να χρησιμοποιήσει τις σχέσεις από το **Κεφάλαιο 3.5.**, με σκοπό να εντοπίσει το συνολικό σφάλμα στον τελικό βαθμό απόδοσης, θα πρέπει να ακολουθήσει την

παραπάνω διαδικασία, ώστε να έχει μια πλήρη εικόνα από τις αλλαγές που προκαλούνται λόγω των εξωτερικών παραγόντων, όπως είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος, η ηλιακή ακτινοβολία κ.λπ. Στη συνέχεια, για κάθε λεπτό, θα πρέπει να προκύψει ο μέσος όρος της κάθε μετρούμενης τιμής, καθώς και η τυπική απόκλιση. Αφού πραγματοποιηθεί η παραπάνω διεργασία, ο ερευνητής καλείται να κρατήσει τη μεγαλύτερη απόκλιση που έχει προκύψει κατά τη διάρκεια της ημέρας, από τις εκατό μετρήσεις του λεπτού, ως τιμή αναφοράς. Όσον αφορά τις πειραματικές τιμές, ο ερευνητής καλείται να υπολογίσει τον μέσο όρο για κάθε ημίωρο και εν συνεχεία να εφαρμόσει τον τύπο του σφάλματος. Με αυτόν τον τρόπο, θα έχει μια πλήρη εικόνα για την διακύμανση της απόδοσης ανά ημίωρο και στο τέλος θα προκύψει ο μέσος όρος του σφάλματος, ώστε να βρεθεί το συνολικό σφάλμα, που υφίσταται πάνω στον τελικό βαθμό απόδοσης. Τέλος, οποιαδήποτε τιμή αποκλίνει από τις υπόλοιπες σε μεγάλο ποσοστό, θα απορρίπτεται και αν το φαινόμενο συνεχιστεί τότε θα πρέπει να πραγματοποιηθεί έλεγχος στα μετρητικά όργανα. Η συγκεκριμένη πειραματική διαδικασία πραγματοποιείται με σκοπό την σύγκριση ενός θερμοσιφωνικού (ελεύθερης ροής) και ενός κλειστού (βεβιασμένης ροής).

4.4. Επεξεργασία των μετρήσεων

Πριν την καταγραφή των μετρήσεων, είναι απαραίτητο να μελετηθούν οι χαρακτηριστικές εξισώσεις που περιγράφουν τον κύκλο λειτουργίας του θερμοσιφωνικού συστήματος. Ειδικότερα, θα πρέπει να γνωστοποιηθούν οι έννοιες της ισχύος και του βαθμού απόδοσης που αποδίδει ένα τέτοιο σύστημα, σύμφωνα με τις εκάστοτε περιβαλλοντικές συνθήκες. Το ωφέλιμο θερμικό φορτίο, που αποδίδει το σύστημα, χαρακτηρίζεται από τον τύπο [34]:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{out} - T_{in}) \quad (4.1)$$

με:

- \dot{m} η παροχή μάζας που ρέει μέσα στον αγωγό (m^3/s)
- C_p ειδική θερμοχωρητικότητα νερού (συνήθως 4,184 σε $\text{KJ}/\text{kg} \text{ }^\circ\text{C}$).
- T θερμοκρασία του νερού τόσο στην έξοδο (out) και τόσο όσο και στην είσοδο (in) του συλλέκτη $^\circ\text{C}$.

Παρόλο που η θερμότητα που μεταφέρεται στο ρευστό έχει στιγμιαία τιμή, σύμφωνα με την σχέση 4.1, μέχρι την μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε θερμική ενέργεια, μεσολαβούν ορισμένες απώλειες, τόσο από τις επιφάνειες του συλλέκτη, όσο και από την κίνηση του ρευστού μέσα στις σωληνώσεις. Έτσι η σχέση που δίνει την ωφέλιμη θερμική ισχύ που μπορεί να αποδώσει ο ηλιακός συλλέκτης, περιλαμβάνοντας και τις απώλειες του συστήματος, είναι:

$$\dot{Q} = F_R \cdot A_C \cdot [G_T \cdot (\tau \cdot \alpha) - U_L \cdot (\bar{\theta} - \theta_\alpha)] \quad (4.2)$$

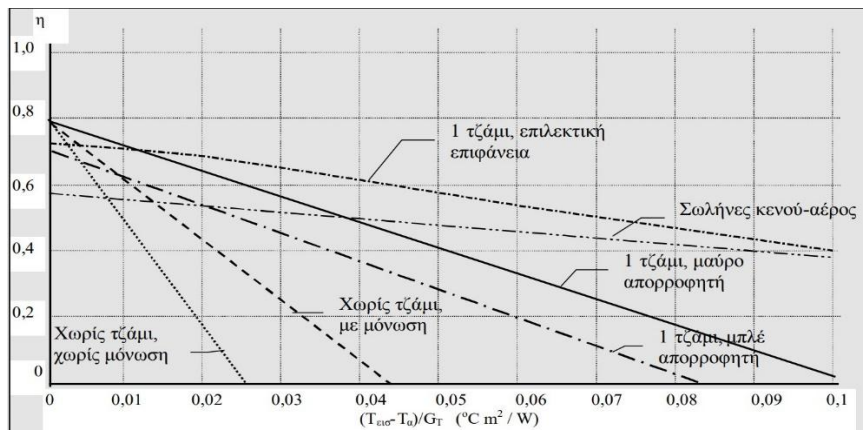
με:

- F_R ο συντελεστής θερμικής απολαβής του συλλέκτη, ο οποίος προέρχεται από τον ποιοτικό έλεγχο του συλλέκτη, όπου μέσα προσμετράται η παροχή του ρευστού και οι κατασκευαστικοί παράμετροι.
- A_C η επιφάνεια του συλλέκτη σε m^2 .
- G_T η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας σε W/m^2 .
- τ ο συντελεστής διαπερατότητας του διαφανούς καλύμματος στην ηλιακή ακτινοβολία.
- α ο συντελεστής απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας.
- U_L ο συνολικός ισοδύναμος συντελεστής θερμικών απωλειών του συλλέκτη ($W/m^2\text{C}$)
- $\bar{\theta}$ η μέση θερμοκρασία της επιφανείας του συλλέκτη ($^{\circ}C$). Σε συχνές περιπτώσεις λαμβάνεται ίση με το ημιάθρισμα της θερμοκρασίας εισόδου του υγρού του συλλέκτη « θ_i » και εξόδου « θ_o ». δηλαδή $\bar{\theta} = \frac{(\theta_i + \theta_o)}{2}$.
- θ_α η θερμοκρασία περιβάλλοντος $^{\circ}C$.

Σύμφωνα με την παραπάνω σχέση, πραγματοποιείται ο υπολογισμός της ωφέλιμης θερμικής ισχύος και εν συνεχεία μπορεί να υπολογιστεί ο βαθμός απόδοσης του συστήματος. Ο βαθμός απόδοσης υπολογίζεται είτε για μακροχρόνια λειτουργία είτε για στιγμιαία. Αξιοσημείωτο, επίσης, είναι το γεγονός ότι η επίτευξη του υπολογισμού του μακροχρόνιου συντελεστή απόδοσης προκύπτει από την μέθοδο καμπυλών «f». Έτσι, ο τύπος για τον στιγμιαίο βαθμό απόδοσης του θερμοσιφωνικού συστήματος είναι:

$$\eta = \frac{\dot{Q}}{(A_C \cdot G_T)} = F_R (\tau \cdot \alpha)_n - \frac{F_R \cdot U_L \cdot (\bar{\theta} - \theta_\alpha)}{G_T} \quad (4.3)$$

Οι συντελεστές που χαρακτηρίζουν τις απώλειες που υπάρχουν, μπορούν να δοθούν από τον κατασκευαστή, να αντληθούν από τιμές πινάκων (**Πίνακας 13**), κάποιιοι να υπολογιστούν μέσω σχέσεων, ή να προκύψουν μέσω πειραματικής διαδικασίας (**Σχήμα 26**), όπου η σχέση 3.2 γίνεται της γραμμικής μορφής $Y=aX+B$ με κλίση $a=-F_R \cdot U_L$, $X=\frac{(\bar{\theta}-\theta_a)}{G_T}$. Όταν ληφθούν όλες οι απαραίτητες μετρήσεις, με τη βοήθεια του **Πίνακα 13**, τότε είναι εφικτό να κατασκευαστεί η χαρακτηριστική ευθεία λειτουργίας του συλλέκτη και να προκύψουν τόσο η απόδοση όσο και ο συντελεστής θερμικών απωλειών. Για να επιτευχθεί το ανωτέρω, πρέπει να τεθεί $X=0$ ώστε $Y=F_R(\tau \cdot \alpha)_n$ ώστε να υπολογιστεί ο βαθμός απόδοσης και $\alpha = \frac{Y}{X} = \frac{F_R(\tau \cdot \alpha)_n}{\frac{(\bar{\theta}-\theta_a)}{G_T}} = \frac{\eta_0}{\frac{(\bar{\theta}-\theta_a)}{G_T}}$ [27].



Σχήμα 25. Τυπικές καμπύλες θερμικής απόδοσης για διάφορους επίπεδους συλλέκτες (TEE).

Πίνακας 13. Τυπικές τιμές συντελεστών απωλειών για επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες (TEE).

Περιγραφή ηλιακού συλλέκτη νερού	$F_R(\tau\alpha)_n$	$F_R U_L$ [W/m ² .C]
Μαύρο χρώμα, 1 υαλοπίνακα	0,82	7,5
Μαύρο χρώμα, 2 υαλοπίνακες ή επιλεκτική επιφάνεια με 1 υαλοπίνακα	0,75	5
Σωλήνες κενού-αέρος	0,57	1,82
Απλός συλλέκτης (πλαστικοί σωλήνες) χωρίς κάλυμμα και μόνωση (ταχύτητα ανέμου 2,2 m/s)	0,86	21,5

Ύστερα από περαιτέρω βιβλιογραφική έρευνα, είναι εύκολα αντιληπτό ότι οι απόψεις διαφοροποιούνται όσον αφορά την μέση θερμοκρασία που λαμβάνεται υπόψιν στην σχέση (4.3). Ειδικότερα, ο κ. Καλδέλλης [13] αναφέρει ότι η θερμοκρασία που συμπεριλαμβάνεται στις μετρήσεις είναι το άθροισμα της θερμοκρασίας εισόδου του ρευστού στο συλλέκτη και της θερμοκρασίας που εξέρχεται, ώστε να υπάρχει όσο το δυνατόν καλύτερη προσέγγιση της θερμοκρασίας

της επιφάνειας του συλλέκτη. Από την άλλη, οι Duffie & Beckman [4] πως όταν ο ερευνητής καταλήγει να χρησιμοποιεί την εξίσωση της ίδιας μορφής με την (4.3), λαμβάνει υπόψιν μόνο την θερμοκρασία εισόδου στο συλλέκτη και ειδικότερα όταν έχει ξεκινήσει την κανονική του λειτουργία. Αυτό συμβαίνει διότι έχει αναφερθεί ότι είναι δύσκολη η προσέγγιση της μέσης θερμοκρασίας του συλλέκτη από την διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της εισόδου και εξόδου. Όταν συμπεριληφθεί ο συντελεστής θερμικής απολαβής του συλλέκτη (F_R) τότε προκύπτει η σχέση 4.5, όπου χρησιμοποιείται μόνο η θερμοκρασία εισόδου του ρευστού στο συλλέκτη. Πέρα από τα παραπάνω, όταν δεν συμπεριληφθεί ο συντελεστής F_R αξιοποιείται η σχέση (3.4) όπου λαμβάνεται η μέση θερμοκρασία εισόδου και εξόδου του ρευστού από τον συλλέκτη [35].

$$\dot{Q} = A_C \cdot [S - U_L \cdot (\bar{\theta} - \theta_\alpha)] \quad (4.4)$$

$$\dot{Q} = F_R \cdot A_C \cdot [S - U_L \cdot (\theta_i - \theta_\alpha)] \quad (4.5)$$

Με: $S = G_T \cdot (\tau \cdot \alpha)_n$

Στις περισσότερες πειραματικές διαδικασίες λαμβάνεται υπόψιν η σχέση 4.3, όπου χρησιμοποιείται τόσο η θερμοκρασία εισόδου του ρευστού στο συλλέκτη όσο και η θερμοκρασία εξόδου. Με αυτό τον τρόπο γίνονται αποτελεσματικότερες οι μετρήσεις που καταγράφονται, διότι δεν χρειάζεται να υπολογιστεί αλγεβρικά ο συντελεστής $F_R U_L$ καθώς προκύπτει μέσω των διαγραμμάτων. Τέλος, για τη αξιοποίηση της σχέσης 4.5 πρέπει σε όλο το μήκος του συλλέκτη να υπάρχει ενιαία θερμοκρασία, πράγμα που απαιτεί μεγάλη αναμονή.

Εφόσον, ληφθούν όλες οι απαραίτητες μετρήσεις, τοποθετούνται σε πίνακα (**Πίνακας 14**) για να είναι εφικτό να δημιουργηθούν οι ευθείες των δύο συστημάτων. Αφού χαραχθούν οι ευθείες, θα προκύψουν οι συντελεστές απωλειών μέσω των γραφικών παραστάσεων και των παραπάνω σχέσεων. Στη συνέχεια, θα υπολογιστούν οι βαθμοί απόδοσης για την εκάστοτε πρότυπη ημέρα που θα έχει πραγματοποιηθεί το πείραμα και θα προκύψουν ορισμένα συμπεράσματα. Καθ' όλη τη διάρκεια της σύγκρισης θα προκύψουν οι βαθμοί απόδοσης μαζί με το πιθανό σφάλμα, που μπορεί να έχει ενσωματωθεί μέσα στις μετρήσεις από την τυπική απόκλιση που βρέθηκε. Αυτή η πειραματική διαδικασία λαμβάνει μέρος, τόσο για την σύγκριση των δύο

συστημάτων, όσο και για την ενσωμάτωση του μετρητικού σφάλματος μέσα στις μετρήσεις, με σκοπό την διερεύνηση πιθανότητας ταύτισης των βαθμών απόδοσης.

Πίνακας 14. Ενδεικτικός πίνακας καταγραφής μετρήσεων.

A/A	Ηλιακή ακτινοβολία G_t	Παροχή μάζας \dot{m}	Θερμοκρασία εισόδου θ_i	Θερμοκρασία εξόδου θ_o	Μέση θερμοκρασία $\bar{\theta}$	Θερμοκρασία περιβάλλοντος θ_a	Θερμότητα \dot{Q}	$(\chi_i - \bar{\chi})$ για κάθε μεταβλητή ξεχωριστά	Τυπική απόκλιση σ για κάθε μεταβλητή
1 mi n	1...								
	...100								
	Σύνολο								
30 mi n	1....								
	...30								
	Σύνολο								
8 hou rs	1...								
	...16								
	Σύνολο								
	Βαθμός απόδοσης η								
	1...								
	...100								
	Σύνολο								
	1....								
	...30								
	Σύνολο								
	1....								
	...16								
	Σύνολο								

5. Συμπεράσματα

Το πρώτο συμπέρασμα που προκύπτει από την παρούσα διπλωματική είναι ότι οι αποδόσεις του ανοιχτού θερμοσιφωνικού συστήματος, συγκριτικά με του βεβιασμένου, ποικίλουν. Το ανοιχτό σύστημα παρουσιάζει αρκετά μεγάλο εύρος στην τιμή του βαθμού απόδοσης η_0 που κυμαίνεται από 0.465 έως 0.79. Από την άλλη μεριά στο σύστημα βεβιασμένης ροής καταγράφηκε μικρότερη διασπορά στις τιμές του η_0 που κυμαίνεται από 0.71 έως 0.73. Άρα το κλειστό σύστημα έχει το πλεονέκτημα ότι διατηρεί σταθερότερη απόδοση υπό διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες.

Σε καμία από τις έρευνες που παρουσιάζονται στην **παράγραφο 2.2**, δεν έχει πραγματοποιηθεί σύγκριση ανάμεσα σε ανοιχτό κύκλωμα (ελεύθερης ροής) και κλειστό (με κυκλοφορητή), υπό τις ίδιες περιβαλλοντικές συνθήκες και τεχνικά χαρακτηριστικά. Το συγκεκριμένο ζήτημα χρίζει περαιτέρω έρευνα, καθώς μπορεί να εντοπίσει τις διαφορές μεταξύ ανοιχτού και κλειστού κυκλώματος.

Οι έρευνες που περιλαμβάνονται στο **Κεφάλαιο 2** πραγματοποιήθηκαν με εκτενή μελέτη πάνω στις σχέσεις για τους ηλιακούς συλλέκτες. Επίσης, αρκετές από αυτές αξιοποίησαν διαφορετικούς τύπους για τον βαθμό απόδοσης και για τον συντελεστή απωλειών. Από αυτό προκύπτει ότι είναι σχετικά δύσκολη η εύρεση των κατάλληλων σχέσεων για τα προαναφερόμενα μεγέθη. Σε λίγες μόνο έρευνες επιχειρήθηκε η εύρεση των μεγεθών αυτών μέσω των διαγραμμάτων.

Στη συνέχεια, παρατηρείται ότι το προαναφερόμενο εύρος αποδόσεων του κλειστού συστήματος, περιλαμβάνεται στο εύρος του ανοιχτού συστήματος. Αυτό σημαίνει ότι με κατάλληλη χρήση της θεωρίας του σφάλματος (**Κεφάλαιο 3**), κάποιες από αυτές τις αποδόσεις θα μπορούσαν να συμπίπτουν ή ακόμα και να εφάπτονται οι καμπύλες λειτουργίας τους. Ειδικότερα, με την ενσωμάτωση της θεωρίας του σφάλματος θα παρουσιαστεί μια ολοκληρωμένη εικόνα όσον αφορά την σύγκριση των δύο συστημάτων.

Στον αντίποδα, το πείραμα που λαμβάνει χώρα στην παρούσα διπλωματική (σύγκριση βεβιασμένης και ελεύθερης ροής), δεν είναι τόσο περίπλοκο ως προς τις σχέσεις που αξιοποιούνται, αλλά περισσότερο στην εφαρμογή της θεωρίας του σφάλματος που αναπτύχθηκε στο **Κεφάλαιο 3**. Ειδικότερα, η καταγραφή των

μετρήσεων γίνεται σε τέσσερις διαφορετικές ημέρες και ακολουθεί η επεξεργασία τους, με τελευταία εισαγωγή την διακύμανση που εμφανίζει ο βαθμός απόδοσης των δύο διαφορετικών συστημάτων. Με αυτόν τον τρόπο, συμπεραίνεται ότι η ορθή ενσωμάτωση της θεωρίας του σφάλματος απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή, συγκριτικά με την καταγραφή των μετρήσεων και την χάραξη της ευθείας λειτουργίας των συστημάτων.

Για την καλύτερη αξιολόγηση της σύγκρισης, μεταξύ των δύο συστημάτων, το πείραμα θα πρέπει να διεξαχθεί σε χρονική διάρκεια ενός έτους. Ειδικότερα, λαμβάνεται υπόψιν αυτό το χρονικό περιθώριο, με σκοπό την ορθότερη εξαγωγή συμπερασμάτων, καθώς τα δύο συστήματα θα λειτουργήσουν σε όλες τις πιθανές συνθήκες και εποχές.

Ολοκληρώνοντας, μία έρευνα που θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί, είναι η σύγκριση των θερμοσιφωνικών συστημάτων, με τις μεγαλύτερες αποδόσεις (συλλέκτες κενού, συλλέκτες επιλεκτικής επιφάνειας, ICS κ.λπ.), στην ίδια τοποθεσία, υπό ίδιες συνθήκες και τεχνικά χαρακτηριστικά, ώστε να παρουσιαστούν τα αποτελέσματα και να επεκταθεί η έρευνα με τον συντελεστή κάλυψης για το καθένα από τα προαναφερόμενα συστήματα. Μέσα από αυτή τη διαδικασία θα γνωστοποιηθεί το καλύτερο θερμοσιφωνικό σύστημα, τόσο σε απόδοση, όσο και σε κάλυψη, για την συγκεκριμένη περιοχή.

Βιβλιογραφία

- [1] T. Bennet, Solar thermal water heating, a simplified modeling approach and potential application for CHBE, thesis., University of British Columbia.: Sustainability office, 2007.
- [2] K. & P. J. Butti, A golden thread: 2500 years of solar architecture and technology., Cheshire books., 1980.
- [3] C. Smith, « Revisiting solar power's past.,» σε *Technology Review*, 1995, pp. 38-47.
- [4] J. A. Duffie, «WA, Solar Engineering of Thermal Processes,» Ind, John Wiley & Sons, 1991, pp. 250-330.
- [5] J. & T. T. Harrison, Solar water heating options in Florida., Florida Solar Energy Center., 1997.
- [6] S. A. Kalogirou, «Solar thermal collectors and applications.,» σε *Progress in energy and combustion science*, 2004, pp. 231-295.
- [7] U. Eicker, Solar technologies for buildings., John Wiley & Sons., 2003.
- [8] Μ. Σ. Χαλίκας, Επαγωγική Στατιστική, Αθήνα: Σύγχρονη εκδοτική, 2012.
- [9] K. Sivakumar, N. K. Mohan και B. Sivaraman, «Performance analysis of elliptical heat pipe solar collector,» *Indian Journal of Science and Technology*, pp. 4-7, 2011.
- [10] H. Al-Madani, «The performance of a cylindrical solar water heater,» σε *Renewable Energy*, 2006, pp. 1751-1763.
- [11] D. Mangal, D. K. Lamba, T. Gupta και K. Jhamb, «Acknowledgement of evacuated tube solar water heater over flat plate solar water heater.,» σε *International Journal of Engineering (IJE)*, 2010, p. 279.
- [12] K. S. Ong, T. W. L., S. S. και L. T. H., «System performance of heat pipe solar water heaters.,» σε *In International Heat Pipe Symposium (Heat)*, Tamkang University Press., 2011, pp. 261-266.
- [13] Κ. Α. Καλδέλλης Κ.Ιωάννης, «6η Εργαστηριακή Εφαρμογή: Επίπεδοι Ηλιακοί Συλλέκτες,» σε *Εργαστηριακές Εφαρμογές Ήπιων Μορφών Ενέργειας*, Αθήνα, Εκδόσεις Σταμούλη Α.Ε., 2001, pp. 204-208.
- [14] calpak, «<http://www.calpak.gr>,» 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: http://www.calpak.gr/el/uploads/media/M4_technical_2016.02.16_low%20res.pdf. [Πρόσβαση 8 Μάιος 2022].

- [15] H.Vettrivel και P.Mathiazhagan, «Comparison Study of Solar Flat Plate Collector with Single and Double Glazing Systems,» *INTERNATIONAL JOURNAL of RENEWABLE ENERGY RESEARCH*, pp. 266-274, 1 Ιανουάριος 2017.
- [16] Τ. Π. Ζώρας Δημήτριος, «Συγκριτική πειραματική μελέτη δύο ολοκληρωμένων ηλιακών συσκευών θέρμανσης νερού συλλέκτη-αποθήκευση θερμότητας,» Πάτρα, 2015.
- [17] Σ. Χ. Ανδριοπούλου, «ΜΕΛΕΤΗ ΘΕΡΜΟΣΙΦΩΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΠΙΠΕΔΟΥ,» Πάτρα, 2009.
- [18] M. Kratzenberg, H. Beyer και S. Colle, «Uncertainty calculation applied to different regression methods in the quasi-dynamic collector test,» *Solar Energy*, pp. 1453-1462, 10 Μαρτίου 2006.
- [19] E. Zambolin και D. D. Col, «Experimental analysis of thermal performance of flat plate and evacuated tube solar collectors in stationary standard and daily conditions,» *Solar Energy*, pp. 1382-1396, 20 Απρίλιος 2010.
- [20] M.S.Hossain, R.Saidur, H.Fayaz, N.A.Rahim, M.R.Islam, J.U.Ahamed και M.M.Rahman, «Review on solar water heater collector and thermal energy performance of circulating pipe,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 3801-3812, 8 Ιούνιος 2011.
- [21] Z. Khaled, G. Amenallah και K. Chakib, «Numerical and experimental investigation of thermosyphon solar water heater,» *Energy Conversion and Management*, pp. 913-922, 6 Αύγουστος 2013.
- [22] B. J. Huang και S. C. Du, «A Performance Test Method of Solar Thermosyphon Systems,» *Journal of Solar Energy Engineering*, pp. 172-179, Αύγουστος 1991.
- [23] T. Zhang, «Experimental Study on a Forced-Circulation Loop Thermosiphon Solar Water Heating System,» *International Journal of Photoenergy*, pp. 1-12, 5 Ιουλίου 2018.
- [24] A. Karaghoulι και W.EAlnaser, «Experimental study on thermosyphon solar water heater in Bahrain,» *Renewable Energy*, pp. 389-396, 6 Νοέμβριος 2001.
- [25] Wikipedia, «Wikipedia,» 2021. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A4%CF%85%CF%80%CE%B9%CE%BA%CE%AE_%CE%B1%CF%80%CF%8C%CE%BA%CE%BB%CE%B9%CF%83%CE%B7. [Πρόσβαση 4 Μάιος 2021].
- [26] Ζ. Η. Μπρότσης Θεόδωρος, «Περιγραφική Στατιστική,» σε *Διάσκεψη του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας*, 2021.

- [27] Κ. Α. Ιωάννης Κ.Καλδέλλης, «Εισαγωγή: Βασικά Στοιχεία Αξιολόγησης-Επεξεργασίας Μετρήσεων,» σε *Εργαστηριακές Εφαρμογές Ήπιων Μορφών Ενέργειας*, 1η έκδοση επιμ., Αθήνα, Εκδόσεις Σταμούλη Α.Ε., 2001, pp. 21-30.
- [28] Σ. Σιμόπουλος, *Μετρήσεις Τεχνικών Μεγεθών*, 1η Έκδοση επιμ., Αθήνα, 1989.
- [29] Π. Χαμπηλομάτης, «Σφάλματα Μετρήσεων,» *Τεχνική Μετρήσεων*, 7 Οκτωβρίου 2019.
- [30] diana-solar, «dianna-solar,» 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.diana-solar.gr/>. [Πρόσβαση 9 Απρίλιος 2022].
- [31] adafruit, «adafruit,» 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.adafruit.com/product/381>. [Πρόσβαση Σάββατο Μάρτιος 2022].
- [32] kippzonen, «kippzonen,» 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.kippzonen.com/Product/11/CMP3-Pyranometer#.Yj9dv-dBxEY>. [Πρόσβαση Σάββατο Μάρτιος 2022].
- [33] adafruit, «adafruit,» 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.adafruit.com/product/904>. [Πρόσβαση Σάββατο Μάρτιος 2022].
- [34] D. Y. Goswami, *Ηλιακή ενέργεια για μηχανικούς*, 3η Έκδοση επιμ., Αθήνα: Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, 2020.
- [35] J. A. Beckman και W. A. Duffie, *Solar Engineering*, 4η Έκδοση επιμ., New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2013.
- [36] adafruit, «adafruit,» 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.adafruit.com/product/828>. [Πρόσβαση Σάββατο Μάρτιος 2022].