



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

ΤΙΤΛΟΣ

Διερεύνηση Θερμικής Απόδοσης PVT

Συγγραφέας
Χριστοφίδης Νικόλαος – Ταξιάρχης
ΑΜ: 272017027

Επιβλέπων

Κοσμάς Καββαδίας
Αναπληρωτής Καθηγητής



Αθήνα, Ιούλιος, 2022
UNIVERSITY OF WEST ATTICA
ENGINEERING SCHOOL
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

Diploma Thesis

TITLE

PVT thermal efficiency investigation

Student name and surname:

Christofidis Nikolaos-Taxiarchis

Registration Number: 272017027

Supervisor name and surname:

Kosmas Kavadias

Associate Professor

Athens, July, 2022



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

Διερεύνηση θερμικής απόδοσης PVT

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή

Η διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

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

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος ΧΡΙΣΤΟΦΙΔΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ-ΤΑΞΙΑΡΧΗΣ του ΕΚΤΩΡ-ΠΑΝΑΓΙΩΤΗ, με αριθμό μητρώου 272017027 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 Δηλών



*** Ονοματεπώνυμο /Ιδιότητα**
(Υπογραφή)

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/ουσα 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):*

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής, θα ήθελα να ευχαριστήσω αρχικά τον επιβλέποντα καθηγητή, κ. Καββαδία Κοσμά, για την υπομονή που έδειξε καθώς επίσης και για τις υποδείξεις και τις χρήσιμες συμβουλές που μου παρείχε καθόλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την υποστήριξη που μου παρείχε καθώς επίσης και τους φίλους μου, ειδικότερα τον Συμεών, για τις στιγμές που περάσαμε καθόλη τη διάρκεια της φοίτησης μας.

Διπλωματική Εργασία

Διερεύνηση θερμικής απόδοσης PVT

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική, γίνεται αναφορά στους PVT συλλέκτες και πιο συγκεκριμένα στη θερμική τους απόδοση. Πιο αναλυτικά, αφού παρουσιαστούν ορισμένα θεωρητικά στοιχεία όσον αφορά τη λειτουργία και τα είδη των PVT συλλεκτών, θα ακολουθήσει μια θερμική ανάλυση, δηλαδή μια παρουσίαση των στοιχείων εκείνων που απαιτούνται για τον υπολογισμό τόσο του στιγμιαίου βαθμού απόδοσης όσο και του μακροχρόνιου. Πραγματοποιείται σύγκριση 4 απλών ηλιακών συλλεκτών με 4 PVT με σκοπό τη σύγκριση του μέσου μηνιαίου βαθμού απόδοσης καθώς επίσης και του ποσοστού f κάλυψης των απαιτούμενων θερμικών αναγκών και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της έρευνας όπως επίσης και τα συμπεράσματα.

Λέξεις κλειδιά: PVT συλλέκτης, απλός ηλιακός συλλέκτης, ηλιακή ακτινοβολία, απόδοση, μέθοδος καμπυλών f

Diploma Thesis

PVT thermal efficiency investigation

ABSTRACT

In the current diploma thesis, reference is made in PVT collectors and more specifically to their thermal efficiency. Once some theoretical data about the operating principle and the types of PVT collectors are presented, a thermal analysis will follow, namely a presentation of the required parameters for the calculation of the instantaneous thermal efficiency and the long-term efficiency. Lastly, there is a comparison between 4 flat-plate solar collectors and 4 PVT collectors, for investigating the average monthly thermal efficiency and the percentage f to meet the required thermal needs. Results are presented and discussed.

***Key Words:* PVT collector, flat-plate solar collector, solar radiation, efficiency, f-chart method**

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	10
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ	12
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	13
1.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	13
1.2 Ηλιακή Ενέργεια	14
1.3 Εγκατεστημένη θερμική ισχύς στην Ελλάδα	16
2. PVT Συστήματα	17
2.1 Αρχή λειτουργίας PVT συστήματος	18
2.2 PVT συστήματα νερού	18
2.3 PVT συστήματα αέρα	21
2.4 Σύγκριση PVT συστημάτων νερού με PVT συστήματα αέρα	23
2.5 PVT συστήματα νερού – αέρα	24
2.6 Ιστορική αναδρομή στα PVT συστήματα	25
2.6.1 Ιστορική αναδρομή στα PVT συστήματα νερού	25
2.6.2 Ιστορική αναδρομή στα PVT συστήματα αέρα	27
2.7 Τεχνολογική Εξέλιξη των PVT συστημάτων – Βιβλιογραφική ανασκόπηση σε δημοσιευμένες έρευνες	28
2.7.1 Έρευνες με χρήση νανορευστού	28
2.7.2 Έρευνες με χρήση σωλήνων θερμότητας	31
2.7.3 Έρευνα με χρήση υλικών αλλαγής φάσης	35
3. Θερμική ανάλυση PVT	38
3.1 Απόδοση ηλιακού συλλέκτη	38
3.2 Μέθοδος καμπυλών f	42
3.3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση δημοσιευμένων ερευνών υπολογισμού του βαθμού απόδοσης ενός PVT συστήματος	45
4. Μεθοδολογία και Αποτελέσματα	51
4.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά συλλεκτών και δεδομένα	51
4.2 Υπολογισμός μηνιαίας απόδοσης συλλεκτών και ποσοστού κάλυψης f	55
4.3 Σύγκριση θερμικής απόδοσης επίπεδων ηλιακών συλλεκτών και PVT συλλεκτών	56
4.4 Αποτελέσματα μεθόδου καμπυλών f (προγράμματος)	60
4.5 Αποτελέσματα εφαρμογής μεθόδου καμπυλών f	62
4.6 Αποτελέσματα μηνιαίας απόδοσης	66
4.7 Αποτελέσματα ετήσιου συντελεστή κάλυψης F & ετήσιας απόδοσης	69
5. Συμπεράσματα	71
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	74
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	88

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1. Μπλοκ διάγραμμα αξιοποίησης ηλιακής ενέργειας (Πηγή: el.wikipedia.org).	13
Σχήμα 2. Σύγκριση εγκατεστημένης θερμικής ισχύος μεταξύ χωρών κατά το 2018 (Πηγή: ebhe.gr).	15
Σχήμα 3. Στατιστικά στοιχεία κατασκευής ευρεσιτεχνιών PVT συλλεκτών σε παγκόσμιο επίπεδο (Πηγή: irena.org).	16
Σχήμα 4. Σχηματική διάταξη επίπεδου PVT συλλέκτη. [5]	18
Σχήμα 5. Σχηματική διάταξη PVT συστήματος με κανάλι. [5]	19
Σχήμα 6. Σχηματική διάταξη PVT συστήματος ελεύθερης ροής. [5]	19
Σχήμα 7. Σχηματική διάταξη PVT συλλέκτη διπλής απορρόφησης. [5]	20
Σχήμα 8. Τυπική διάταξη PVT συλλέκτη αέρα. [7]	21
Σχήμα 9. Τυπική διάταξη PVT συλλέκτη αέρα με 2 αγωγούς κυκλοφορίας αέρα. [7]	21
Σχήμα 10. PVT σύστημα νερού-αέρα απλής ροής, χωρίς γυάλινο κάλυμμα. [8]	23
Σχήμα 11. PVT σύστημα νερού-αέρα απλής ροής, με γυάλινο κάλυμμα. [8]	23
Σχήμα 12. PVT σύστημα νερού αέρα διπλής ροής χωρίς αποθήκευση θερμότητας. [8]	23
Σχήμα 13. PVT σύστημα διπλής ροής με αποθήκευση θερμότητας. [8]	24
Σχήμα 14. Διάγραμμα απόδοσης συγκεντρωτικού PVT συστήματος, με χρήση νερού και ναορευτού ως ψυκτικό μέσο, συναρτήσει της θερμοκρασίας εξόδου. [28]	28
Σχήμα 15. Ραβδόγραμμα της συνολικής απόδοσης του συλλέκτη συναρτήσει της παροχής μάζας. [29]	29
Σχήμα 16. Θερμική απόδοση ανά ώρα της ημέρας. [29]	30
Σχήμα 17. Απόδοση PVT συστήματος και PV συστήματος κατά την άνοιξη. [30]	31
Σχήμα 18. Απόδοση PVT συστήματος και PV συστήματος κατά το καλοκαίρι. [30]	31
Σχήμα 19. Ηλεκτρική απόδοση και ηλεκτρική ενέργεια (προσομοίωσης και πειράματος) συναρτήσει του χρόνου. [31]	32
Σχήμα 20. Θερμική απόδοση και θερμική ενέργεια (προσομοίωσης και πειράματος) συναρτήσει του χρόνου. [31]	33
Σχήμα 21. Διάταξη PVT συλλεκτών: α) χωρίς υλικό αλλαγής φάσης, β) με υλικό αλλαγής φάσης στο άνω μέρος, γ) με υλικό αλλαγής φάσης στο κάτω μέρος. [32]	34
Σχήμα 22. Ηλεκτρική απόδοση απλού PVT συλλέκτη και PVT συλλεκτών με υλικό αλλαγής φάσης συναρτήσει του χρόνου. [32]	35
Σχήμα 23. Θερμική απόδοση απλού PVT συλλέκτη και PVT συλλεκτών με υλικό αλλαγής φάσης συναρτήσει του χρόνου. [32]	36
Σχήμα 24. Ολική απόδοση απλού PVT συλλέκτη και PVT συλλεκτών με υλικό αλλαγής φάσης συναρτήσει του χρόνου. [32]	36
Σχήμα 25. Απόδοση (θερμική, οπτική) συναρτήσει του χρόνου. [39]	45
Σχήμα 26. Διάγραμμα θερμικής, ηλεκτρικής και ολικής απόδοσης συστήματος συναρτήσει της ηλιακής ακτινοβολίας. [41]	47
Σχήμα 27. Θερμική και ηλεκτρική απόδοση PVT συλλέκτη α) με κάλυμμα και β) χωρίς κάλυμμα. [42]	48
Σχήμα 28. Συγκριτικό διάγραμμα ποσοστού κάλυψης f για τους επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες.	56
Σχήμα 29. Συγκριτικό διάγραμμα μηνιαίας απόδοσης επίπεδων ηλιακών συλλεκτών.	57
Σχήμα 30. Συγκριτικό διάγραμμα ποσοστού κάλυψης f PVT συλλεκτών.	58
Σχήμα 31. Συγκριτικό διάγραμμα μηνιαίας απόδοσης PVT συλλεκτών.	58
Σχήμα 32. Διάγραμμα ποσοστού κάλυψης f συναρτήσει των μηνών για την 1η περίπτωση (προγράμματος).	59
Σχήμα 33. Διάγραμμα ποσοστού κάλυψης f συναρτήσει των μηνών για την 2η περίπτωση (προγράμματος).	60
Σχήμα 34. Διάγραμμα ποσοστού κάλυψης f συναρτήσει των μηνών για την 3η περίπτωση (προγράμματος).	60

Σχήμα 35. Διάγραμμα ποσοστού κάλυψης f συναρτήσει των μηνών για την καινούργια περίπτωση (προγράμματος).	61
Σχήμα 36. Διάγραμμα ποσοστού κάλυψης f συναρτήσει των μηνών για την 1η περίπτωση.	61
Σχήμα 37. Διάγραμμα ποσοστού κάλυψης f συναρτήσει των μηνών για την 2η περίπτωση.	62
Σχήμα 38. Διάγραμμα ποσοστού κάλυψης f συναρτήσει των μηνών για την 3η περίπτωση.	62
Σχήμα 39. Διάγραμμα ποσοστού κάλυψης f συναρτήσει των μηνών για την καινούργια περίπτωση.	63
Σχήμα 40. Διάγραμμα μηνιαίας απόδοσης συναρτήσει των μηνών για την 1η περίπτωση.	65
Σχήμα 41. Διάγραμμα μηνιαίας απόδοσης συναρτήσει των μηνών για την 2η περίπτωση.	65
Σχήμα 42. Διάγραμμα μηνιαίας απόδοσης συναρτήσει των μηνών για την 3η περίπτωση.	66
Σχήμα 43. Διάγραμμα μηνιαίας απόδοσης συναρτήσει των μηνών για την καινούργια περίπτωση.	67
Σχήμα 44. Ετήσιος συντελεστής κάλυψης F & ετήσια απόδοση για την 1η περίπτωση σύγκρισης	68
Σχήμα 45. Ετήσιος συντελεστής κάλυψης F & ετήσια απόδοση για τη 2η περίπτωση σύγκρισης	68
Σχήμα 46. Ετήσιος συντελεστής κάλυψης F & ετήσια απόδοση για την 3η περίπτωση σύγκρισης.	69
Σχήμα 47. Ετήσιος συντελεστής κάλυψης F & ετήσια απόδοση για την 4η περίπτωση σύγκρισης.	69

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά μεγέθη ηλιακών συλλεκτών. [35]	39
Πίνακας 2: Επιφάνεια PVT συλλεκτών και επίπεδων ηλιακών συλλεκτών.	50
Πίνακας 3: Τεχνικά χαρακτηριστικά PVT συλλεκτών.	51
Πίνακας 4: Τεχνικά χαρακτηριστικά PVT συλλέκτη (ελληνικής εταιρείας).	51
Πίνακας 5: Περιπτώσεις σύγκρισης.	51
Πίνακας 6: Τεχνικά χαρακτηριστικά επίπεδων ηλιακών συλλεκτών.	52
Πίνακας 7: Ογκος θερμοδοχείου για κάθε απλό ηλιακό συλλέκτη.	52
Πίνακας 8: Δεδομένα μεθόδου καμπυλών f.	55
Πίνακας 9: Αποτελέσματα δεδομένων για τον επίπεδο ηλιακό συλλέκτη Νο1.	73
Πίνακας 10: Αποτελέσματα δεδομένων για τον επίπεδο ηλιακό συλλέκτη Νο2.	74
Πίνακας 11: Αποτελέσματα δεδομένων για τον επίπεδο ηλιακό συλλέκτη Νο3.	75
Πίνακας 12: Αποτελέσματα δεδομένων για τον επίπεδο ηλιακό συλλέκτη Νο4.	76
Πίνακας 13: Αποτελέσματα δεδομένων για τον PVT συλλέκτη Νο1 (κανονική επιφάνεια).	77
Πίνακας 14: Αποτελέσματα δεδομένων για τον PVT συλλέκτη Νο1 (διπλάσια επιφάνεια).	78
Πίνακας 15: Αποτελέσματα δεδομένων για τον PVT συλλέκτη Νο2 (κανονική επιφάνεια).	79
Πίνακας 16: Αποτελέσματα δεδομένων για τον PVT συλλέκτη Νο2 (διπλάσια επιφάνεια).	80
Πίνακας 17: Αποτελέσματα δεδομένων για τον PVT συλλέκτη Νο3 (κανονική επιφάνεια).	81
Πίνακας 18: Αποτελέσματα δεδομένων για τον PVT συλλέκτη Νο3 (διπλάσια επιφάνεια).	82
Πίνακας 19: Αποτελέσματα δεδομένων για τον PVT συλλέκτη Νο4 (κανονική επιφάνεια).	83
Πίνακας 20: Αποτελέσματα δεδομένων για τον PVT συλλέκτη Νο4 (διπλάσια επιφάνεια).	84
Πίνακας 21: Αποτελέσματα δεδομένων για τον PVT συλλέκτη Νο5 (ελληνικής εταιρείας-κανονική επιφάνεια).	85
Πίνακας 22: Αποτελέσματα δεδομένων για τον PVT συλλέκτη Νο5 (ελληνικής εταιρείας-διπλάσια επιφάνεια).	86

Κεφάλαιο 1

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) ή αλλιώς ήπιες μορφές ενέργειας είναι εκείνες οι μορφές ενέργειας οι οποίες δημιουργούνται με την αξιοποίηση φυσικών πόρων, τα αποθέματα των οποίων είναι πρακτικά ανεξάντλητα. Τέτοιες πηγές ενέργειας προέρχονται από τον άνεμο, τον ήλιο, το νερό, τη βιομάζα και τη γεωθερμία. Οι ΑΠΕ παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα όσον αφορά την εκμετάλλευσή τους, όπως:

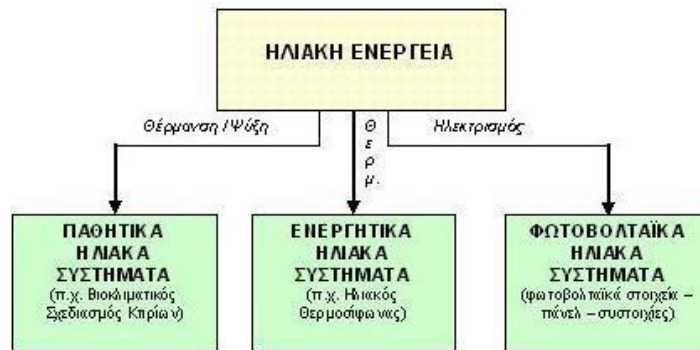
- Είναι φιλικές προς το περιβάλλον σε αντίθεση με τις συνηθισμένες πηγές ενέργειας όπως είναι το πετρέλαιο.
- Δεν εξαντλούνται, καθώς τα αποθέματα τους ανανεώνονται συνεχώς.
- Η αξιοποίησή τους μπορεί να οδηγήσει στην ενεργειακή ανεξαρτησία μικρών και αναπτυσσόμενων χωρών.
- Με την αξιοποίησή τους είναι δυνατόν να παραχθεί ενέργεια ανάλογα με την εκάστοτε ζήτηση δίχως έτσι να υπάρχει η ανάγκη για κατασκευή τεράστιων εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας.
- Η εγκατάσταση και η συντήρησή τους απαιτεί μικρό κόστος.

Παρόλο που οι ΑΠΕ παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα, υπάρχει και ο αντίποδας, όπου εμφανίζονται και ορισμένα μειονεκτήματα. Πιο αναλυτικά:

- Χαρακτηρίζονται από μικρό συντελεστή απόδοσης και γι' αυτό οι περισσότερες εφαρμογές τους έχουν βοηθητικό χαρακτήρα.
- Δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν εξ'ολοκλήρου για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών ενός μεγάλου αστικού κέντρου.
- Η απόδοσή τους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή που πρόκειται να εγκατασταθούν καθώς επίσης και από το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής.

1.2 Ηλιακή Ενέργεια

Η βασικότερη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας είναι ο ήλιος και η αξιοποίηση της επιτυγχάνεται με την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας. Η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας, διακρίνεται σε 3 κατηγορίες εφαρμογών οι οποίες είναι: τα παθητικά ηλιακά συστήματα, τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα ή ηλιοθερμικά συστήματα και τα φωτοβολταϊκά συστήματα [1].



Σχήμα 1. Μπλοκ διάγραμμα αξιοποίησης ηλιακής ενέργειας (Πηγή: el.wikipedia.org).

□ Παθητικά Ηλιακά Συστήματα

Τα παθητικά ηλιακά συστήματα χαρακτηρίζονται από τη συλλογή και εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας με σκοπό τη μετατροπή της σε εσωτερική ενέργεια για διάφορες κατασκευές (π.χ σπίτια), ώστε να υπάρχει ο φυσικός φωτισμός του χώρου, η ρύθμιση της εσωτερικής θερμοκρασίας και ταυτόχρονα εξοικονόμηση ενέργειας. Για τη σωστή λειτουργία ενός παθητικού ηλιακού συστήματος, είναι απαραίτητη η σωστή θερμομόνωση του κτιρίου, δηλαδή το κέλυφος του να είναι σε θέση όπου να επιτρέπει τόσο τη μέγιστη συλλογή της ηλιακής ενέργειας όσο και τη μέγιστη θερμοχωρητικότητα καθώς επίσης και να χαρακτηρίζεται από τις ελάχιστες θερμικές απώλειες. Ο μηχανισμός λειτουργίας ενός παθητικού ηλιακού συστήματος, βασίζεται σε 3 συγκεκριμένες παραμέτρους. Αυτές οι παράμετροι είναι:

- Το φαινόμενο του θερμοκηπίου, δηλαδή η συλλογή της ηλιακής ακτινοβολίας και ακολούθως η αποθήκευση και διατήρηση της στο εσωτερικό με σκοπό τη θέρμανση των χώρων.
- Η θερμοχωρητικότητα των υλικών.
- Αρχές μετάδοσης θερμότητας

□ Ενεργητικά Ηλιακά Συστήματα

Τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα ή ηλιοθερμικά συστήματα, είναι εκείνα τα συστήματα, τα οποία συλλέγουν την ηλιακή ακτινοβολία και τη μεταφέρουν με τη μορφή θερμότητας σε κάποιο ρευστό όπως ο αέρας και το νερό, Με λίγα λόγια μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε θερμική ενέργεια. Η πιο απλή περίπτωση ηλιοθερμικού συστήματος είναι αυτή του ηλιακού θερμοσίφωνα, για την παραγωγή ζεστού νερού οικιακής χρήσης. Στη συγκεκριμένη διάταξη, υπάρχει ένας ηλιακός συλλέκτης, ο οποίος απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία, την προσδίδει με τη μορφή θερμότητας στο νερό, το οποίο μέσω σωληνώσεων οδηγείται σε ένα δοχείο αποθήκευσης.

Όπως παρατηρείται, ένα ενεργητικό ηλιακό σύστημα αποτελείται από τα εξής βασικά μέρη:

- Ένα τμήμα το οποίο είναι υπεύθυνο για τη συλλογή της ηλιακής ακτινοβολίας (ηλιακός συλλέκτης).
- Ένα τμήμα αποθήκευσης, το οποίο είναι η δεξαμενή αποθήκευσης του ζεστού νερού οικιακής χρήσης.

Τέλος, τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα, διακρίνονται σε 2 κατηγορίες, ανάλογα με την κυκλοφορία του θερμαινόμενου ρευστού. Πιο αναλυτικά, διακρίνονται σε:

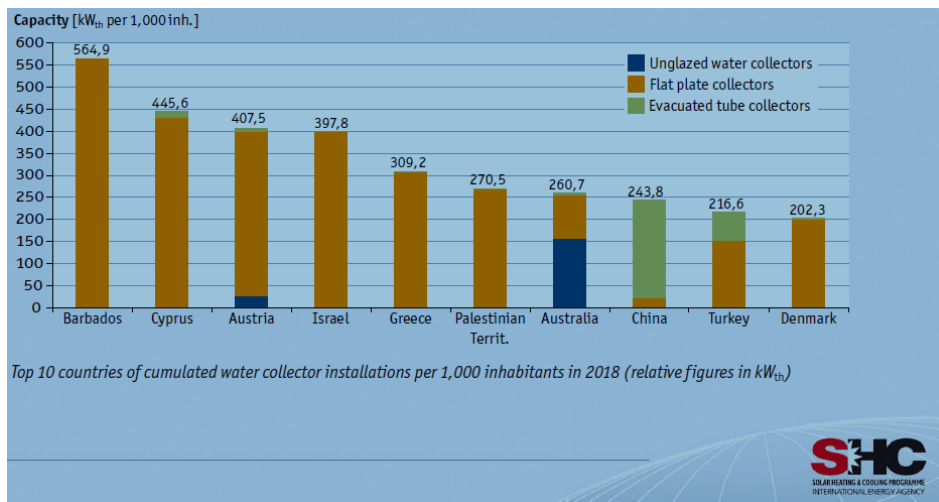
- Ανοικτού κυκλώματος, δηλαδή πραγματοποιείται απευθείας θέρμανση του νερού οικιακής χρήσης, καθώς το εργαζόμενο μέσο του συστήματος είναι το νερό το οποίο προορίζεται για χρήση.
- Κλειστού κυκλώματος, δηλαδή το εργαζόμενο μέσο κυκλοφορεί μέσα σε ειδικό κύκλωμα, μέσω του οποίου θερμαίνεται το νερό το οποίο προορίζεται για χρήση.

□ 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.

1.3 Εγκατεστημένη θερμική ισχύς στην Ελλάδα

Η χώρα μας, χαρακτηρίζεται από υψηλή ηλιοφάνεια, γεγονός που αποτελεί πλεονέκτημα για την εφαρμογή ηλιοθερμικών συστημάτων. Τα τελευταία χρόνια, οι Έλληνες, έχουν στραφεί στην αγορά και εγκατάσταση ηλιακών συλλεκτών με σκοπό τόσο την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας όσο και τη θέρμανση νερού οικιακής χρήσης. Η στροφή στη συγκεκριμένη αγορά, έγινε αφενός λόγω του γεγονότος ότι είναι πιο φιλική στο περιβάλλον και αφετέρου λόγω της αύξησης των τιμών στην ενέργεια. Στο **Σχήμα 2**, παρουσιάζονται στατιστικά στοιχεία κατά το έτος 2018, όσον αφορά την εγκατεστημένη θερμική ισχύ (ανάλογα με το είδος του συλλέκτη) σε διάφορες χώρες μεταξύ των οποίων και η Ελλάδα. Παρατηρούμε ότι η χώρα μας βρίσκεται αρκετά υψηλά στη σχετική λίστα, με συνολική εγκατεστημένη ισχύ 309.2 kW_{th} ανά 1000 κατοίκους.

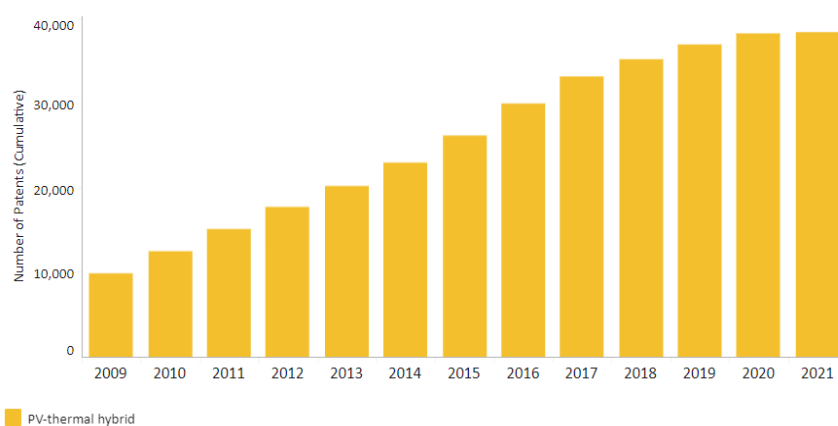


Σχήμα 2. Σύγκριση εγκατεστημένης θερμικής ισχύος μεταξύ χωρών κατά το 2018 (Πηγή: ebhe.gr).

Κεφάλαιο 2

2. PVT Συστήματα

Με το πέρασ των χρόνων, την αύξηση των τιμών για τα καύσιμα, καθώς επίσης και τη διαρκή έρευνα για την αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ως μια πηγή πιο οικονομική και ταυτόχρονα φιλική προς το περιβάλλον, ο άνθρωπος στράφηκε προς την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας. Γι'αυτό το λόγο, αναπτύχθηκαν οι ηλιακοί συλλέκτες οι οποίοι αξιοποιούν την ηλιακή ενέργεια έχοντας ως στόχο την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία ενώ απορροφάται από τον συλλέκτη δεν μετατρέπεται εξ' ολοκλήρου σε ηλεκτρική ενέργεια, υπάρχει αύξηση της θερμοκρασίας στον ηλιακό συλλέκτη που έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της αποδοτικότητας του. Για τον λόγο αυτό, δημιουργήθηκε η ανάγκη περαιτέρω έρευνας και ανάπτυξης της τεχνολογίας των ηλιακών συλλεκτών και συγκεκριμένα η ανάγκη για ψύξη του συλλέκτη με κάποιο εργαζόμενο ψυκτικό μέσο, είτε με αέρα είτε με νερό. Έτσι, οι επιστήμονες κατέληξαν στον υβριδικό PVT συλλέκτη ο οποίος αξιοποιεί την ηλιακή ακτινοβολία για την ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας. Στην ελληνική βιβλιογραφία και συγκεκριμένα στο 11^ο Εθνικό Συνέδριο για τις Ήπιες Μορφές Ενέργειας, οι συγκεκριμένοι συλλέκτες αναφέρονται ως PVT συλλέκτες ενώ σε άλλες ελληνικές βιβλιογραφίες όπως διπλωματικές και μεταπτυχιακές εργασίες [2] αναφέρονται ως φωτοβολταϊκοί/θερμικοί ηλιακοί συλλέκτες (ΦΒ/Θ). Στην παρούσα διπλωματική οι συγκεκριμένοι συλλέκτες θα αναφέρονται ως PVT συλλέκτες.



Σχήμα 3. Στατιστικά στοιχεία κατασκευής ευρεσιτεχνιών PVT συλλεκτών σε παγκόσμιο επίπεδο (Πηγή: irena.org).

2.1 Αρχή λειτουργίας PVT συστήματος

Ένα PVT σύστημα είναι ουσιαστικά ένας υβριδικός φωτοβολταϊκός θερμικός συλλέκτης που είναι ικανός να παράξει ταυτόχρονα τόσο ηλεκτρική ενέργεια όσο και θερμική. Ο συγκεκριμένος συλλέκτης αποτελείται από φωτοβολταϊκά πλαίσια καθώς επίσης και από μία ενσωματωμένη μονάδα απολαβής θερμότητας και γι'αυτόν τον λόγο είναι δυνατή η ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας. Όσον αφορά τη λειτουργία του συγκεκριμένου συστήματος, η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει πάνω στα φωτοβολταϊκά πλαίσια (ΦΒ) το οποίο με τη σειρά του παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Κατά τη συγκεκριμένη διαδικασία ωστόσο, το μεγαλύτερο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που απορροφάει το σύστημα δεν μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια αλλά σε θερμότητα, η οποία οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας και συνεπώς σε πτώση της ηλεκτρικής απόδοσης. Στην ενσωματωμένη μονάδα απολαβής θερμότητας κυκλοφορεί ένα ρευστό (συνήθως νερό ή αέρα), το οποίο έχει θερμοκρασία χαμηλότερη από αυτή του ΦΒ πλαισίου. Το συγκεκριμένο ρευστό (εργαζόμενο μέσο), με την απολαβή της θερμότητας, θερμαίνεται και ταυτόχρονα αυτό οδηγεί στη ψύξη του συστήματος [3]. Γενικά, ένα PVT σύστημα έχει μεγαλύτερη απόδοση όσον αφορά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ένα απλό ΦΒ σύστημα καθώς δεν υπάρχει τόσο μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας που θα οδηγήσει σε πτώση της ηλεκτρικής απόδοσης. Από την άλλη, ένας PVT συλλέκτης χαρακτηρίζεται από χαμηλότερη θερμική απόδοση συγκριτικά με έναν απλό ηλιακό συλλέκτη [4]. Όσον αφορά τον διαχωρισμό των PVT συστημάτων, αυτά διακρίνονται στις παρακάτω τρεις κατηγορίες:

- PVT συστήματα νερού
- PVT συστήματα αέρα
- PVT συστήματα νερού-αέρα

2.2 PVT συστήματα νερού

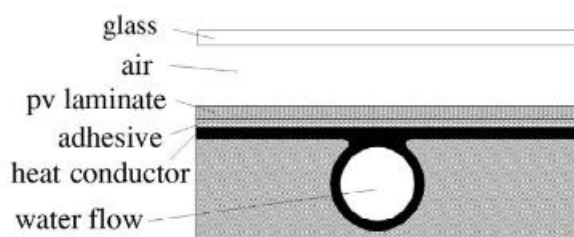
Τα PVT συστήματα νερού, όπως δείχνει και η ονομασία τους, λειτουργούν με εργαζόμενο μέσο το νερό. Στα συγκεκριμένα PVT συστήματα συνήθως υπάρχει μια θερμοαγωγίμη πλάκα με σωληνώσεις μέσω των οποίων κυκλοφορεί το νερό ως εργαζόμενο μέσο. Η συγκεκριμένη διάταξη βρίσκεται στο πίσω μέρος της

φωτοβολταϊκής μονάδας. Υπάρχουν διαφορετικά είδη PVT συστημάτων νερού, τα οποία είναι [5]:

- Απλός επίπεδος PVT συλλέκτης
- PVT σύστημα με κανάλια
- PVT σύστημα με ελεύθερη ροή
- PVT σύστημα διπλής απορρόφησης

i. Επίπεδος PVT συλλέκτης (flatplate)

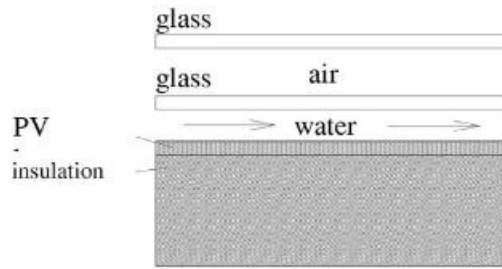
Είναι ο πιο διαδεδομένος τύπος PVT συλλέκτη καθώς βασίζεται σε ήδη υπάρχουσα τεχνολογία, αυτή του επίπεδου ηλιακού συλλέκτη. Συνήθως οι συγκεκριμένοι συλλέκτες παρουσιάζονται με κανένα, ένα ή διπλό κάλυμμα. Περισσότερα καλύμματα δεν καθιστούν τον συλλέκτη πρακτικό καθώς μειώνεται σημαντικά η ηλεκτρική απόδοση.



Σχήμα 4. Σχηματική διάταξη επίπεδου PVT συλλέκτη. [5]

ii. PVT σύστημα με κανάλια (channel)

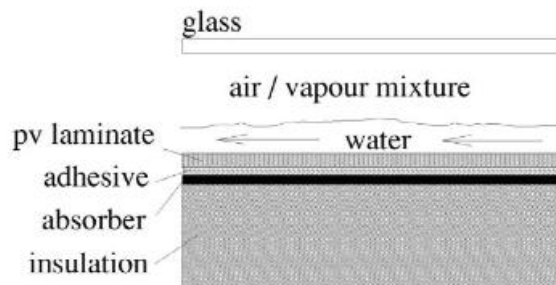
Στο συγκεκριμένο PVT σύστημα όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 5**, το νερό κυκλοφορεί πάνω από τη φωτοβολταϊκή μονάδα [5]. Ο συγκεκριμένος τύπος συστήματος έχει αρκετούς περιορισμούς όσον αφορά την εγκατάστασή του καθώς σε περίπτωση που χρησιμοποιηθεί μεγάλο κανάλι, το γυάλινο κάλυμμα θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο όπως επίσης και να έχει αρκετό πάχος ώστε να αντέξει την πίεση του νερού.



Σχήμα 5. Σχηματική διάταξη PVT συστήματος με κανάλι. [5]

iii. PVT σύστημα ελεύθερης ροής

Στο συγκεκριμένο PVT σύστημα το νερό κυκλοφορεί πάνω από την απορροφητική επιφάνεια ενώ παράλληλα υπάρχει απουσία του επιπλέον γυάλινου καλύμματος (σε αντίθεση με τα PVT συστήματα με κανάλια). Η διάταξη αυτή οδηγεί σε μειωμένο κόστος όσον αφορά τα υλικά κατασκευής και παράλληλα, συγκριτικά με την προηγούμενη κατηγορία PVT συστήματος, δεν υπάρχει το πρόβλημα της αντοχής του γυαλιού. Στα μειονεκτήματα, στη συγκεκριμένη περίπτωση υπάρχουν περισσότερες θερμικές απώλειες καθώς δημιουργείται το φαινόμενο της εξάτμισης του νερού.

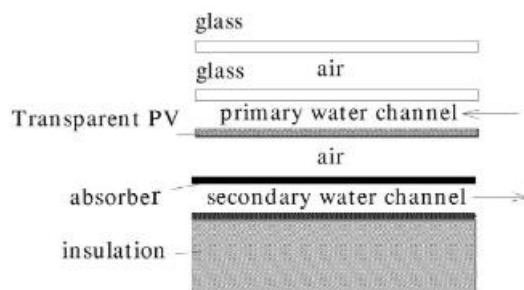


Σχήμα 6. Σχηματική διάταξη PVT συστήματος ελεύθερης ροής. [5]

iv. PVT σύστημα διπλής απορρόφησης

Στο συγκεκριμένο PVT σύστημα υπάρχει ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο ως η κύρια απορροφητική επιφάνεια ενώ επίσης υπάρχει και μια μαύρη μεταλλική πλάκα ως η δευτερεύουσα απορροφητική επιφάνεια. Παράλληλα, υπάρχουν και δύο κανάλια, ένα στο πάνω μέρος και ένα στο κάτω μέρος, μέσω των οποίων πραγματοποιείται η κυκλοφορία του νερού. Πιο συγκεκριμένα, από το πάνω κανάλι πραγματοποιείται η

είσοδος του νερού και από το κάτω κανάλι η επιστροφή του. Όπως και στο PVT σύστημα με κανάλι έτσι κι εδώ ισχύουν τα προαναφερθέντα μειονεκτήματα.



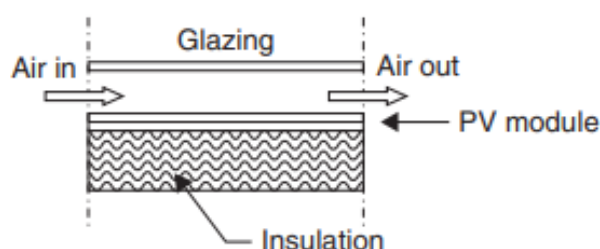
Σχήμα 7. Σχηματική διάταξη PVT συλλέκτη διπλής απορρόφησης. [5]

Οι παραπάνω κατηγορίες PVT συστημάτων νερού, εκτός από τη διαφορά τους όσον αφορά την κατασκευή τους, διαφέρουν επίσης τόσο στα πλεονεκτήματα όσο και στα μειονεκτήματα που παρουσιάζουν [6]. Πιο αναλυτικά, οι επίπεδοι PVT συλλέκτες νερού βασίζονται σε μια ήδη ανεπτυγμένη και ώριμη τεχνολογία ωστόσο η αποδιδόμενη ηλεκτρική ισχύς είναι αρκετά χαμηλή. Τα PVT συστήματα με κανάλια, από τη μία προσφέρουν υψηλότερη θερμική απόδοση αλλά αποτελούν βαριές και εύθραυστες κατασκευές. Τα PVT συστήματα ελεύθερης ροής παρουσιάζουν χαμηλές αντανάκλασεις και χαμηλό κόστος υλικών ενώ παράλληλα αποτελούν αρκετά καλές μηχανικές κατασκευές. Στα μειονεκτήματα παρατηρείται μια αστάθεια κατά τη λειτουργία σε υψηλές θερμοκρασίες ενώ υπάρχουν και μεγαλύτερες απώλειες θερμότητας λόγω της εξάτμισης του νερού. Τέλος, τα PVT συστήματα διπλής απορρόφησης χαρακτηρίζονται από υψηλή θερμική απόδοση ωστόσο και αυτά όπως και τα συστήματα με κανάλια αποτελούν βαριές και εύθραυστες κατασκευές.

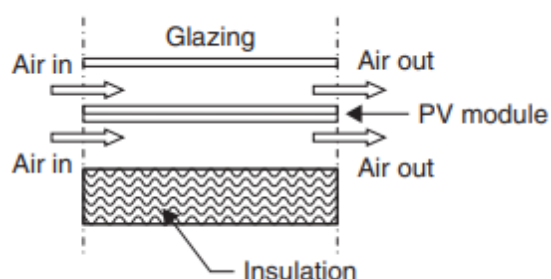
2.3 PVT συστήματα αέρα

Τα συγκεκριμένα PVT συστήματα χρησιμοποιούν τον αέρα ως εργαζόμενο μέσο. Μια τυπική διάταξη ενός τέτοιου συστήματος αποτελείται από ένα διαφανές κάλυμμα (συνήθως μονό ή διπλό τζάμι), μια μαύρη μεταλλική απορροφητική επιφάνεια και μια καλά μονωμένη πλάκα στο πίσω μέρος. Στα περισσότερα συστήματα αυτού του είδους, το εργαζόμενο μέσο (αέρας) κυκλοφορεί μέσω ενός αγωγού μεταξύ της

φωτοβολταϊκής μονάδας και της θερμομόνωσης του συλλέκτη ενώ σε κάποιες άλλες διατάξεις μέσω αγωγών και στις δύο πλευρές του φωτοβολταϊκού [7].



Σχήμα 8. Τυπική διάταξη PVT συλλέκτη αέρα. [7]



Σχήμα 9. Τυπική διάταξη PVT συλλέκτη αέρα με 2 αγωγούς κυκλοφορίας αέρα. [7]

Τα συγκεκριμένα συστήματα, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, λειτουργούν με εργαζόμενο μέσο τον αέρα ο οποίος εισέρχεται στη διάταξη είτε με φυσική ροή είτε μέσω αντλίας παροχής αέρα. Η θερμική απόδοση των συγκεκριμένων συστημάτων, σύμφωνα με τον Καλογήρου [7], εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό τόσο από το βάθος του αγωγού απ' όπου περνάει ο αέρας όσο επίσης και από τη λειτουργία ροής του αέρα καθώς επίσης και από τον ρυθμό παροχής. Πιο αναλυτικά, μικρό βάθος αγωγού και ταυτόχρονα υψηλή παροχή αέρα έχουν ως αποτέλεσμα καλύτερη απαγωγή θερμότητας αλλά παράλληλα αύξηση της πτώσης πίεσης που έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της καθαρά παραγόμενης ενέργειας εξαιτίας της λειτουργίας του ανεμιστήρα, ο οποίος επιτυγχάνει μεγαλύτερη παροχή αέρα. Στα συστήματα όπου η ροή του αέρα γίνεται με φυσικό τρόπο, μικρό βάθος του αγωγού οδηγεί σε χαμηλότερη απαγωγή θερμότητας, συνεπώς στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι προτιμότερο να αυξηθεί το βάθος.

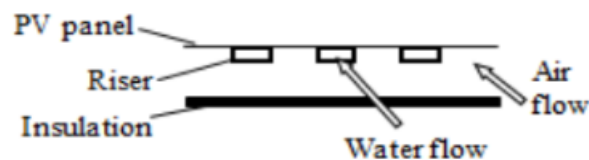
2.4 Σύγκριση PVT συστημάτων νερού με PVT συστήματα αέρα

Παρόλο που η αρχή λειτουργίας είναι ίδια, τα δύο είδη αυτών των PVT συλλεκτών παρουσιάζουν διαφορετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα καθώς επίσης και διαφορετικά πεδία εφαρμογών. Αρχικά, μια κύρια διαφορά που παρουσιάζουν τα δύο είδη συστημάτων είναι οι περιοχές στις οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποδοτικότερα. Πιο αναλυτικά, τα PVT συστήματα νερού δύναται να χρησιμοποιούνται σε περιοχές όπου η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι μεγαλύτερη από 20 °C καθώς η θερμοκρασία του νερού που προέρχεται από το δίκτυο είναι πάντα μικρότερη των 20 °C. Αντίθετα, τα PVT συστήματα αέρα χρησιμοποιούνται σε περιοχές όπου η θερμοκρασία περιβάλλοντος κυμαίνεται στο εύρος 15 °C – 25 °C. Αυτό συμβαίνει καθώς αυτό το είδος PVT συστημάτων (αέρα) χρησιμοποιείται για διαφορετικές εφαρμογές. Στο κομμάτι των εφαρμογών τους, τα PVT συστήματα νερού χρησιμοποιούνται κυρίως για θέρμανση του ζεστού νερού για οικιακή χρήση, για απόσταξη του νερού καθώς επίσης και για τη λειτουργία μονάδων αφαλάτωσης. Από την άλλη, η κύρια εφαρμογή των PVT συστημάτων αέρα είναι κυρίως για τη θέρμανση χώρων (εξού και η εφαρμογή τους σε περιοχές με θερμοκρασία περιβάλλοντος 15 °C – 25 °C, καθώς ο ζεστός αέρας χρησιμοποιείται απευθείας για τη θέρμανση του χώρου) και σε αγροτικές δραστηριότητες, κυρίως για τη ξήρανση γεωργικών προϊόντων. Επιπροσθέτως, όσον αφορά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που παρουσιάζουν, στην περίπτωση όπου το εργαζόμενο μέσο είναι το νερό, παρουσιάζεται μεγαλύτερη ικανότητα μεταφορά θερμότητας λόγω των ιδιοτήτων του νερού ενώ παράλληλα η απόδοση είναι υψηλότερη τόσο σε ηλεκτρικό όσο και σε θερμικό επίπεδο. Στα μειονεκτήματα που παρουσιάζονται, τα PVT συστήματα νερού αποτελούν πολύπλοκες κατασκευές και χαρακτηρίζονται από υψηλό κόστος. Τέλος, σε περίπτωση διαρροής είναι πολύ πιθανό να υπάρξει υλική ζημιά. Στον αντίποδα, τα PVT συστήματα αέρα είναι ουσιαστικά απλές κατασκευές και παρουσιάζουν χαμηλό κόστος συντήρησης ενώ δεν υπάρχει ο κίνδυνος είτε ψύξης είτε βρασμού του εργαζόμενου μέσου σε αντίθεση με τα PVT συστήματα νερού. Στα μειονεκτήματα, προσφέρουν χαμηλότερη θερμική απόδοση αφού υπάρχει χαμηλή μεταφορά θερμότητας λόγω των ιδιοτήτων του αέρα, σε περίπτωση διαρροής όπως αναφέρθηκε δεν υπάρχει κίνδυνος ζημιάς στην κατασκευή ωστόσο υπάρχουν αρκετά μεγάλες θερμικές απώλειες και τέλος οι εφαρμογές του θερμού αέρα είναι λιγοστές.

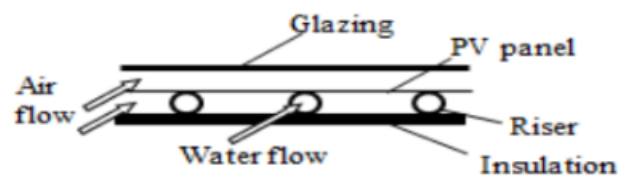
2.5 PVT συστήματα νερού – αέρα

Τα συγκεκριμένα PVT συστήματα χρησιμοποιούν ως εργαζόμενο μέσο τόσο το νερό όσο και τον αέρα. Η διάταξη τους αποτελείται συνήθως από μια φωτοβολταϊκή μονάδα, έναν αγωγό αέρα, σωληνώσεις, μόνωση και ένα πλαίσιο. Παράλληλα, υπάρχει ένα ή περισσότερα γυάλινα καλύμματα ή ένα διάφανο υλικό πάνω από την απορροφητική πλάκα, γύρω από το οποίο ρέει ο αέρας και το νερό. Τα συγκεκριμένα συστήματα διαχωρίζονται σε τέσσερις υποκατηγορίες, οι οποίες είναι:

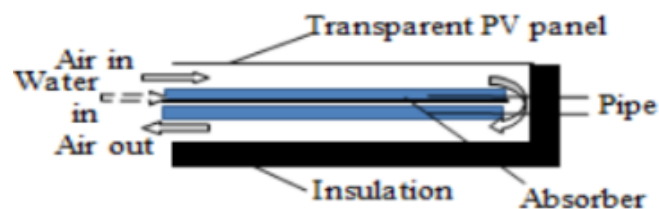
- Χωρίς γυάλινο κάλυμμα, απλής ροής
- Με γυάλινο κάλυμμα, απλής ροής
- Διπλής ροής χωρίς αποθήκευση θερμότητας
- Διπλής ροής με αποθήκευση θερμότητας



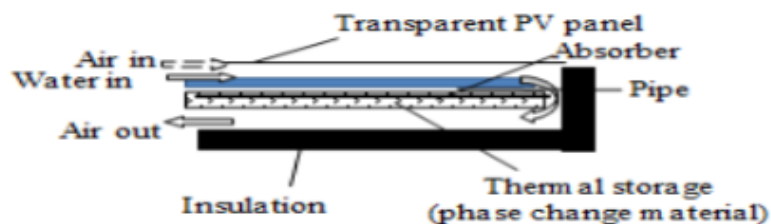
Σχήμα 10. PVT σύστημα νερού-αέρα απλής ροής, χωρίς γυάλινο κάλυμμα. [8]



Σχήμα 11. PVT σύστημα νερού-αέρα απλής ροής, με γυάλινο κάλυμμα. [8]



Σχήμα 12. PVT σύστημα νερού αέρα διπλής ροής χωρίς αποθήκευση θερμότητας. [8]



Σχήμα 13. PVT σύστημα διπλής ροής με αποθήκευση θερμότητας. [8]

Τα συγκεκριμένα συστήματα, τα οποία λειτουργούν με εργαζόμενο μέσο τον αέρα και το νερό ταυτόχρονα, παρουσιάζουν διάφορα πλεονεκτήματα καθώς επίσης και μειονεκτήματα. Πιο αναλυτικά, παρουσιάζουν υψηλότερη θερμική και ηλεκτρική απόδοση συγκριτικά με τα συστήματα νερού και τα συστήματα αέρα ενώ ταυτόχρονα είναι δυνατή η ταυτόχρονη παροχή ζεστού νερού και ζεστού αέρα. Τέλος, λόγω του γεγονότος ότι χρησιμοποιούνται δύο εργαζόμενα μέσα (αέρας και νερό), πραγματοποιείται γρηγορότερη και καλύτερη ψύξη του φωτοβολταϊκού που υπάρχει στην εγκατάσταση. Στα μειονεκτήματα, όπως παρατηρείται και από τα **Σχήματα 10÷13**, τα συγκεκριμένα συστήματα αποτελούν μια πολύπλοκη κατασκευή οδηγώντας έτσι σε υψηλότερο κόστος ενώ τα πεδία εφαρμογής του συγκεκριμένου συστήματος είναι περιορισμένα και αφορούν κυρίως τη θέρμανση χώρων και τη θέρμανση νερού για οικιακή χρήση [6].

2.6 Ιστορική αναδρομή στα PVT συστήματα

2.6.1 Ιστορική αναδρομή στα PVT συστήματα νερού

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας των PVT συστημάτων νερού ξεκίνησε τη δεκαετία του 1970 από τον Martin Wolf [9]. Ο Wolf, ενσωμάτωσε σε έναν μη συγκεντρωτικό θερμικό συλλέκτη μια ηλιακή συστοιχία πυριτίου και χρησιμοποίησε ως μέσο αποθήκευσης μια μπαταρία μολυβδου-οξέος, για θέρμανση κατοικίας. Από τα αποτελέσματα της έρευνας του κατέληξε στο συμπέρασμα ότι ένα τέτοιο σύστημα ήταν τεχνικά εφικτό καθώς επίσης και οικονομικά αποδοτικό. Αργότερα, έγιναν κι άλλες έρευνες σχετικά με τους PVT συλλέκτες, όπως αυτή του MIT [10]. Στη συγκεκριμένη έρευνα χρησιμοποιήθηκαν 3 PVT συλλέκτες και πιο συγκεκριμένα 2 με εργαζόμενο μέσο το νερό και 1 με εργαζόμενο μέσο τον αέρα. Τα αποτελέσματα των αποδόσεων τους ήταν κατώτερα των προδιαγραφών τους, οι οποίες ανέφεραν ηλεκτρική απόδοση ίση με 6,5% και θερμική απόδοση ίση με 40%. Για το λόγο αυτό,

αναπτύχθηκαν νέοι PVT συλλέκτες με διαφορετική τεχνολογία. Πιο συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα της έρευνας οδήγησαν στην ανάπτυξη 7 νέων σχεδιασμών PVT, εκ των οποίων δύο διαθέσιμοι προς παραγωγή με εργαζόμενο μέσο το νερό, δύο πειραματικοί με εργαζόμενο μέσο τον αέρα και τρεις νέοι σχεδιασμοί PVT με εργαζόμενο μέσο το νερό, για διάφορες χρήσεις. Εκείνη την εποχή, σχεδόν όλη η έρευνα για αυτού του είδους τα συστήματα διεξαγόταν στην Αμερική, ώσπου το 1980 οι Suzuki και Kitamura, στην Ιαπωνία, ανέπτυξαν για λογαριασμό της εταιρείας Sharp δύο απλούς επίπεδους PVT συλλέκτες [11]. Παράλληλα, στην ίδια χώρα, το 1982 ο Nakata παρουσίασε μια έρευνα πάνω σε έναν συγκεντρωτικό PVT συλλέκτη και πάλι για λογαριασμό της Sharp [12]. Ακόμα, έρευνα για τους PVT συλλέκτες ξεκίνησε να διεξάγεται και στην Ευρώπη και πιο συγκεκριμένα στη Γερμανία. Εκεί, ο Karl, ανέπτυξε έναν συλλέκτη PVT με γυάλινο κάλυμμα [13] ενώ και στη Γαλλία, έγιναν μελέτες πάνω σε συγκεντρωτικούς PVT συλλέκτες, αρχικά από τον Gibart [14], ο οποίος έβγαλε χρήσιμα συμπεράσματα τόσο για την τεχνολογία των συγκεκριμένων συλλεκτών όσο και για την απόδοσή τους, ωστόσο δεν ήταν εφικτό να βγάλει οικονομικά συμπεράσματα καθώς εκείνη την εποχή δεν υπήρχαν σταθερά οικονομικά στοιχεία για τους συλλέκτες. Η άλλη έρευνα που διεξήχθη στη Γαλλία εκείνη την εποχή ήταν από τον Buffet [15]. Εκείνη την εποχή δεν διεξήχθησαν κάπου αλλού στον κόσμο άλλες έρευνες. Κατά τη δεκαετία του 1990 και λόγω της αναγνώρισης της υπερθέρμανσης του πλανήτη, οι ερευνητές στράφηκαν ξανά προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Στην Ολλανδία, διεξήχθη έρευνα πάνω σε PVT συλλέκτη χωρίς κάλυμμα για εφαρμογή σε αντλίες θερμότητας [16], ωστόσο η συγκεκριμένη έρευνα σταμάτησε το 1996. Στη συνέχεια, το Πανεπιστήμιο Τεχνολογίας του Αϊντχόφεν, ξεκίνησε έρευνα πάνω σε PVT συλλέκτες με κάλυμμα για χρήση στη θέρμανση ζεστού νερού οικιακής χρήσης [17] και εξήγαγε σημαντικά συμπεράσματα όσον αφορά τη σύγκριση του συγκεκριμένου συστήματος με τα ήδη υπάρχοντα. Το 1999, διεξήχθη έρευνα πάνω στους PVT συλλέκτες από το Κέντρο Έρευνας Ενέργειας της Ολλανδίας, όπου αναπτύχθηκαν σχέδια τόσο για PVT συλλέκτες όσο και για συστήματα, τα οποία αναφέρονται στην έρευνα του Zondag [16]. Τέλος, στην Ολλανδία, υλοποιήθηκε ένα μεγάλο έργο το οποίο αποτελούνταν από την εγκατάσταση 54 m² επιφάνειας PVT συλλεκτών στα κεντρικά γραφεία του Renewable Energy Systems. Σιγά σιγά, ολοένα και περισσότερες χώρες ξεκίνησαν να ασχολούνται και να πραγματοποιούν έρευνες πάνω στους PVT συλλέκτες και συστήματα μεταξύ των οποίων, πέρα των προαναφερθέντων, η Δανία, η Νορβηγία

και το Ισραήλ. Στη χώρα μας, το Πανεπιστήμιο Πατρών, πραγματοποίησε έναν μεγάλο αριθμό ερευνών οι οποίες περιελάμβαναν πειραματικές μελέτες σε PVT συλλέκτες τόσο με όσο και χωρίς γυάλινο κάλυμμα. Οι συγκεκριμένες έρευνες, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν κυρίως από τον καθηγητή Τρυπαναγνωστόπουλο, περιλαμβάνουν τόσο μελέτες πάνω σε υπάρχοντες συλλέκτες [18] όσο και σε μεθόδους βελτίωσης της απόδοσης αυτού του είδους συλλεκτών [19]. Τέλος, έγιναν μελέτες και στην Κύπρο, οι οποίες περιελάμβαναν μια αριθμητική μελέτη σε ένα θερμοσιφωνικό PVT σύστημα με τη χρήση του λογισμικού TRNSYS [20] όπως επίσης και βιβλιογραφικές ανασκοπήσεις.

2.6.2 Ιστορική αναδρομή στα PVT συστήματα αέρα

Η πρώτη έρευνα πάνω στα PVT συστήματα αέρα έγινε από τον καθηγητή Boer και αφορά την οικία "Solar One" [21], μια οικία η οποία τόσο στην οροφή όσο και στην πρόσοψη, είχε εγκατεστημένους PVT συλλέκτες αέρα, 24 στο σύνολο. Σε συνέχεια της δουλειάς του Boer, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το MIT ανέπτυξε δύο επίπεδους PVT συλλέκτες αέρα, δίχως όμως να λάβουν τα αναμενόμενα αποτελέσματα όσον αφορά τις αποδόσεις τους οπότε και προέβησαν σε ανάπτυξη νέων μοντέλων (αποδοτικότερων) [10]. Όπως έγινε με την έρευνα των PVT συστημάτων νερού, έτσι και με αυτά του αέρα, κατά την περίοδο 1980-1990, δεν πραγματοποιήθηκαν αρκετές έρευνες, με εξαίρεση την έρευνα των Komp και Reeser [22] όπου αναπτύχθηκε και σχεδιάστηκε ένα συγκεντρωτικό PVT σύστημα αέρα με γυάλινο κάλυμμα. Ακολούθως, στην Ιαπωνία, πραγματοποιήθηκε μια πειραματική προσέγγιση σε ένα PVT σύστημα αέρα χωρίς γυάλινο κάλυμμα, πάνω στο οποίο είχαν τοποθετηθεί μερικώς διαφανή φωτοβολταϊκά στοιχεία [23]. Στη συγκεκριμένη πειραματική διαδικασία, η ροή του εργαζόμενου μέσου, δηλαδή του αέρα, πραγματοποιούνταν ανάμεσα στο φωτοβολταϊκό στοιχείο και το επάνω κάλυμμα. Στα αποτελέσματα, παρατηρήθηκε ότι η θερμική απόδοση κυμάνθηκε στα επίπεδα του 40%, ωστόσο σημαντικό ρόλο έπαιζε η ταχύτητα του ανέμου. Στη Γαλλία, το 1994, αναπτύχθηκε από τη γαλλική εταιρεία Cythelia, ένας PVT συλλέκτης αέρα ονόματι Carthel, ο οποίος σύμφωνα με τους επιστήμονες Ricaud και Roubeau, χαρακτηριζόταν από συνολική απόδοση της τάξεως του 66% [24]. Στη Γερμανία, συνεργάστηκαν δύο εταιρείες (Grammer Solar και Aidt Miljo) και ανέπτυξαν έναν PVT συλλέκτη αέρα με μικρό συντελεστή κάλυψης f [25]. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, ένα μικρό μέρος της απορροφητικής επιφάνειας ήταν καλυμμένο με

φωτοβολταϊκά, σκοπός των οποίων ήταν η τροφοδοσία του ανεμιστήρα για την παροχή αέρα. Η κύρια εφαρμογή του συγκεκριμένου συλλέκτη ήταν σε εξοχικές κατοικίες για περιπτώσεις αφύγρανσης. Στη χώρα μας, στο Πανεπιστήμιο Πατρών, πραγματοποιήθηκε μια έρευνα πάνω σε PVT συλλέκτη αέρα χωρίς γυάλινο κάλυμμα [26]. Η υψηλότερη απόδοση φάνηκε να παρουσιάζεται όταν το φωτοβολταϊκό στοιχείο βρισκόταν σε απευθείας επαφή με την απορροφητική επιφάνεια και τις σωληνώσεις ενώ η ροή του αέρα κάτω από την απορροφητική επιφάνεια παρείχε ζεστό αέρα.

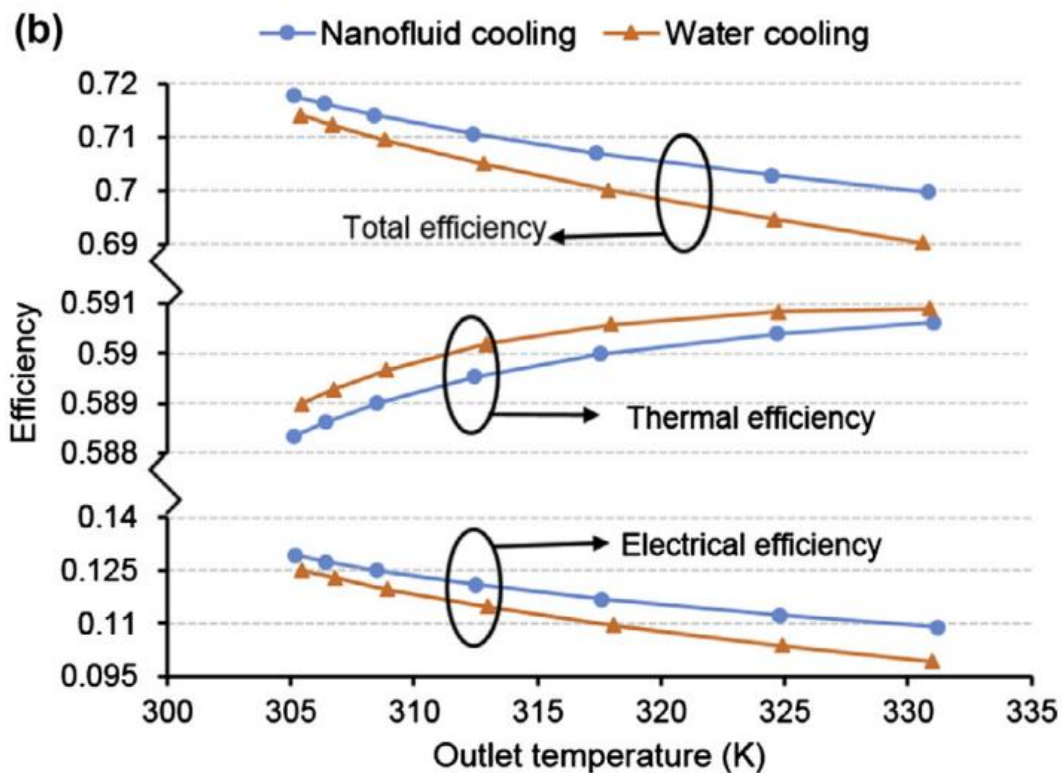
2.7 Τεχνολογική Εξέλιξη των PVT συστημάτων - Βιβλιογραφική ανασκόπηση σε δημοσιευμένες έρευνες

Λόγω της συνεχώς αυξανόμενης ζήτησης για ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο, τα PVT συστήματα αποτελούν έναν σημαντικό τομέα έρευνας τα τελευταία χρόνια. Οι ερευνητές, εργάζονται τις τελευταίες 2-3 δεκαετίες με σκοπό τη βελτιστοποίηση των συγκεκριμένων συστημάτων, ωστόσο πολύ λίγα αποδοτικά PVT συστήματα είναι διαθέσιμα στην αγορά [27]. Πέρα από το νερό και τον αέρα, ως εργαζόμενα μέσα, οι ερευνητές έχουν καταλήξει και σε άλλες θερμικές τεχνολογίες όπως: χρήση νανορευστού, χρήση σωλήνα θερμότητας και χρήση υλικών αλλαγής φάσεως. Τέτοιες έρευνες μαζί με τα αποτελέσματά τους παρουσιάζονται στη συγκεκριμένη ενότητα.

2.7.1 Έρευνες με χρήση νανορευστού

- **Συγκεντρωτικό PVT σύστημα συμπαραγωγής με χρήση νανορευστών για ψύξη και θέρμανση**

Οι Xu και Kleinstreuer [28], στην έρευνα που πραγματοποίησαν, χρησιμοποίησαν νανορευστό ως μέσο θέρμανσης και ψύξης για ένα συγκεντρωτικό PVT σύστημα. Ο υπολογισμός τόσο της θερμικής όσο και της ηλεκτρικής απόδοσης πραγματοποιήθηκε για διαφορετικές συνθήκες περιβάλλοντος. Στα αποτελέσματα της συγκεκριμένης έρευνας, όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 14**, φαίνεται ότι στην περίπτωση που η θερμοκρασία εξόδου του νανορευστού είναι 62 °C, τότε η συνολική απόδοση του συστήματος θα μπορούσε να είναι ίση με 70%, με την ηλεκτρική και τη θερμική απόδοση ίσες με 11% και 59% αντίστοιχα.

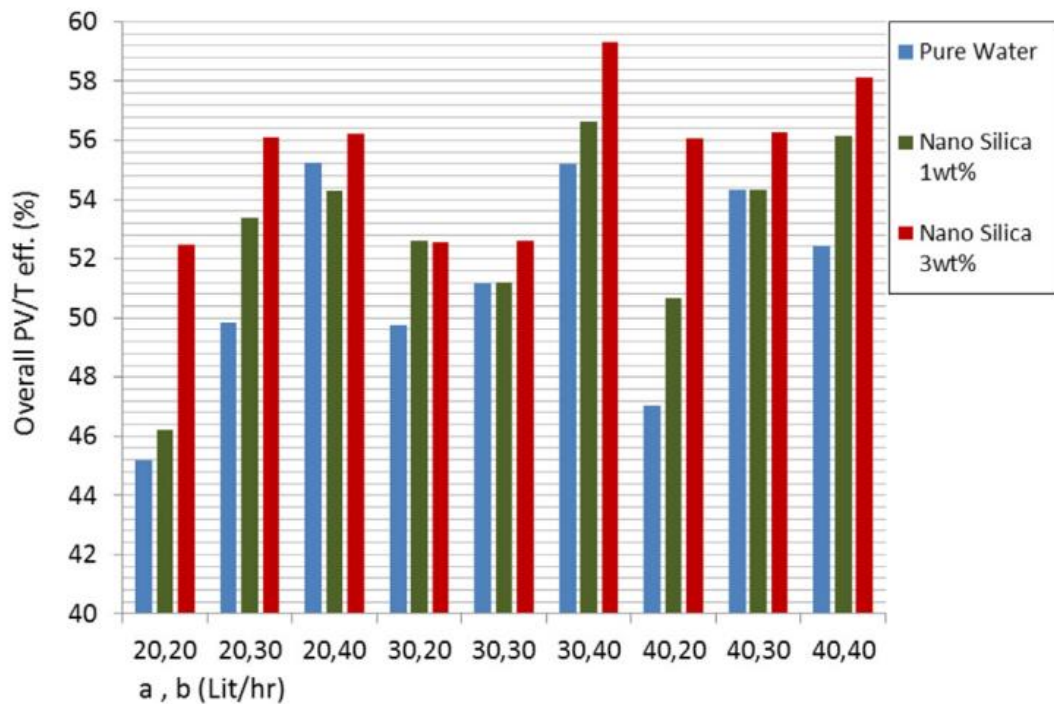


Σχήμα 14. Διάγραμμα απόδοσης συγκεντρωτικού PVT συστήματος, με χρήση νερού και νανορευστού ως ψυκτικό μέσο, συναρτήσει της θερμοκρασίας εξόδου. [28]

Στα συμπεράσματα της συγκεκριμένης έρευνας, παρατηρείται ότι η χρήση νανορευστού βελτιώνει τόσο την ηλεκτρική όσο και τη συνολική απόδοση του συστήματος, ωστόσο μετά βίας παρατηρείται βελτίωση όσον αφορά τη θερμική απόδοση. Η συγκεκριμένη παρατήρηση είναι εύκολα αντιληπτή και από το **Σχήμα 14**.

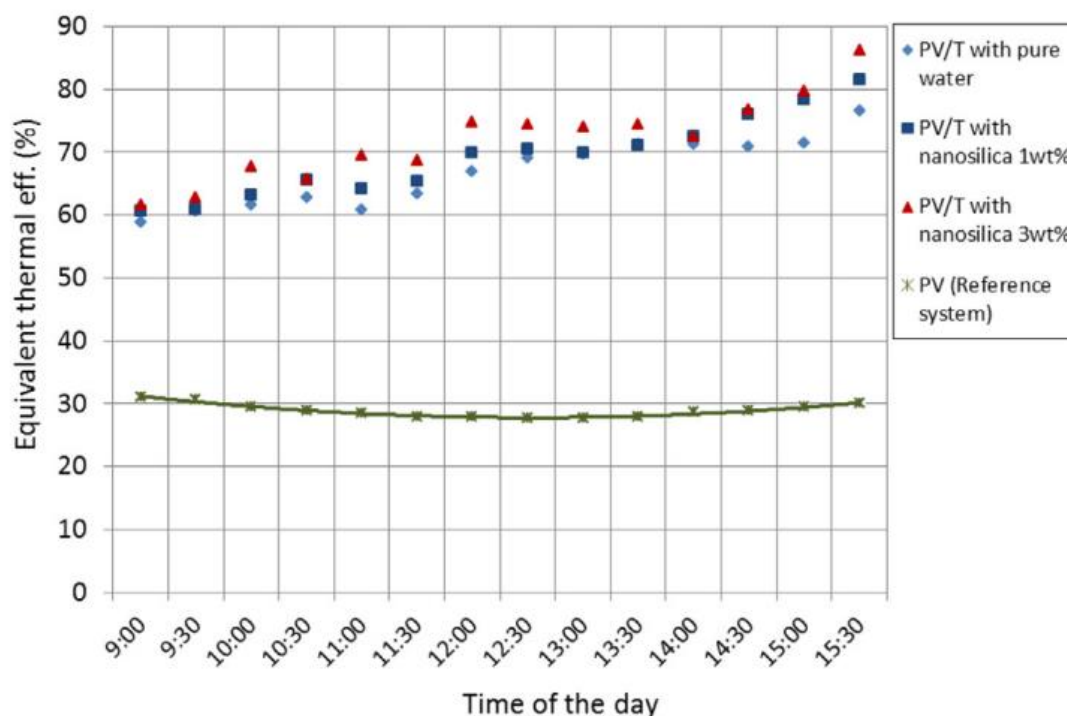
□ **Πειραματική διερεύνηση των επιδράσεων νανορευστού πυριτίου/νερού σε ένα PVT συλλέκτη**

Στη συγκεκριμένη έρευνα [29], μελετώνται πειραματικά οι επιδράσεις χρήσης νανορευστού ως ψυκτικό μέσο για έναν PVT συλλέκτη. Τα ψυκτικά μέσα που χρησιμοποιούνται είναι καθαρό νερό και νανορευστό πυριτίου/νερού 1% και 3% κατά βάρος. Τα αποτελέσματα της συνολικής απόδοσης του συλλέκτη σε συνάρτηση με την παροχή μάζας του εργαζόμενου μέσου (α) και του νερού της πόλης (b), για κάθε μια περίπτωση εργαζόμενου μέσου (με χρήση καθαρού νερού, νανορευστό 1% κατά βάρος, νανορευστό 3% κατά βάρος), παρουσιάζονται στο **Σχήμα 15**.



Σχήμα 15. Ραβδόγραμμα της συνολικής απόδοσης του συλλέκτη συναρτήσει της παροχής μάζας. [29]

Όπως είναι αντιληπτό από το **Σχήμα 15**, η χρήση νανορευστού πυριτίου/νερού 3% κατά βάρος ως ψυκτικό μέσο αποφέρει υψηλότερη συνολική απόδοση συλλέκτη συγκριτικά με τη χρήση καθαρού νερού ή νανορευστού πυριτίου/νερού 1% κατά βάρος, για κάθε παροχή μάζας. Ακολουθώς, παρουσιάζεται η θερμική απόδοση κατά τη διάρκεια της ημέρας που πραγματοποιήθηκε το συγκεκριμένο πείραμα στο **Σχήμα 16**.



Σχήμα 16. Θερμική απόδοση ανά ώρα της ημέρας. [29]

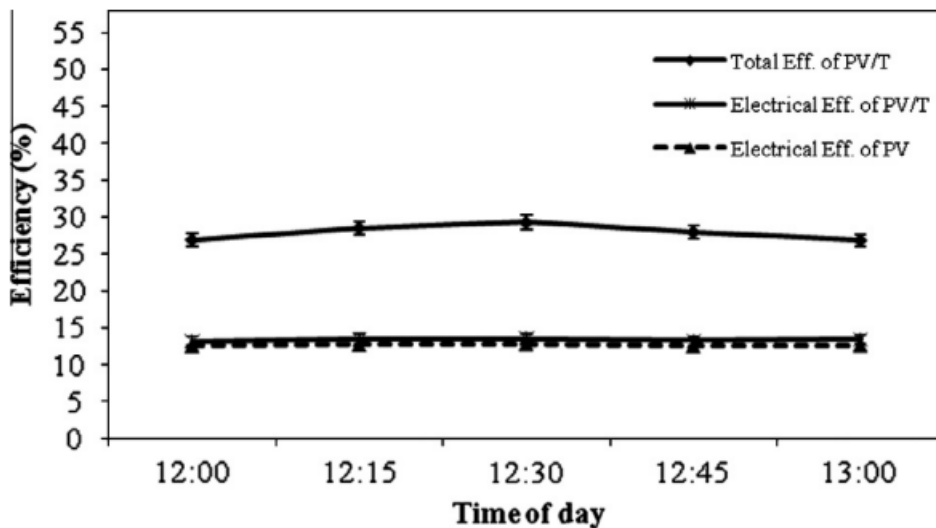
Σύμφωνα με το **Σχήμα 16** και τους υπολογισμούς των ερευνητών, η θερμική απόδοση του συστήματος αναφοράς βρέθηκε 28.9% ενώ από την άλλη, για τη χρήση καθαρού νερού 66,8%, για τη χρήση νανορευστού πυριτίου/νερού 1% κατά βάρος 69.2% και για τη χρήση νανορευστού πυριτίου/νερού 3% 72.1%. Τέλος, παρατηρήθηκε ότι η συνολική απόδοση αυξήθηκε κατά 3.6% και η θερμική απόδοση κατά 7.6% για την περίπτωση όπου το ψυκτικό μέσο ήταν το νανορευστό πυριτίου/νερού 1% κατά βάρος. Από την άλλη, για την περίπτωση χρήσης νανορευστού πυριτίου/νερού 3% κατά βάρος, η συνολική απόδοση αυξήθηκε κατά 7.9% ενώ η θερμική απόδοση κατά 12.8%.

2.7.2 Έρευνες με χρήση σωλήνων θερμότητας

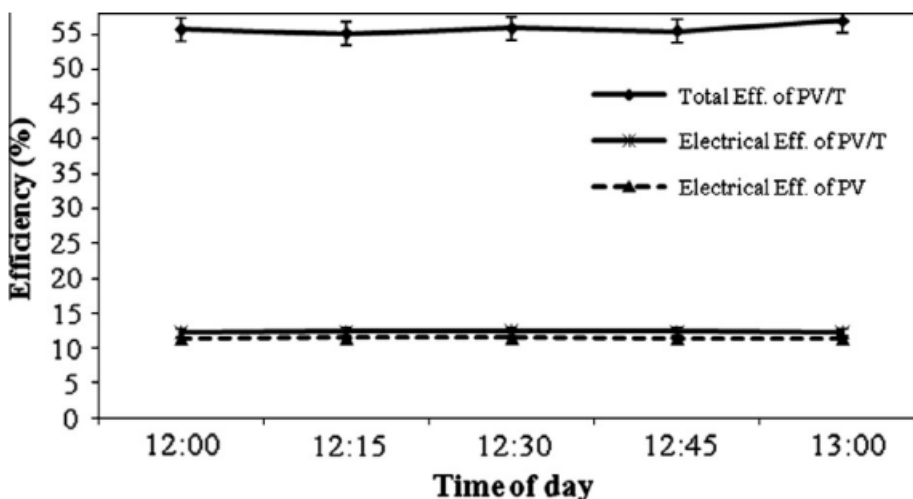
- **Εφαρμογή σωλήνα θερμότητας σε πειραματική έρευνα πάνω σε ένα νέο PVT σύστημα**

Στη συγκεκριμένη έρευνα [30], προτάθηκε ένα θερμοσιφωνικό PVT σύστημα βασισμένο σε σωλήνα θερμότητας, για την απορρόφηση της περίσσειας θερμότητας από το μονοκρυσταλλικό φωτοβολταϊκό κύτταρο πυριτίου. Η συγκεκριμένη έρευνα, πραγματοποιήθηκε σε 2 περιόδους, την άνοιξη και το καλοκαίρι. Κατά την περίοδο της άνοιξης, ως εργαζόμενο μέσο χρησιμοποιήθηκε η μεθανόλη με το PVT σύστημα

να βρίσκεται υπό γωνία κλίσης 30° ενώ κατά την περίοδο του καλοκαιριού, ως εργαζόμενο μέσο χρησιμοποιήθηκε η προπανόνη, με το PVT σύστημα να βρίσκεται υπό γωνία κλίσης 40°. Κατά τη δοκιμή αυτού του συστήματος, παρατηρήθηκε μείωση της θερμοκρασίας της φωτοβολταϊκής μονάδας έως και 15°C. Τα αποτελέσματα των ερευνητών καθώς επίσης και τα συμπεράσματα στα οποία κατέληξαν, παρατίθενται παρακάτω.



Σχήμα 17. Απόδοση PVT συστήματος και PV συστήματος κατά την άνοιξη. [30]



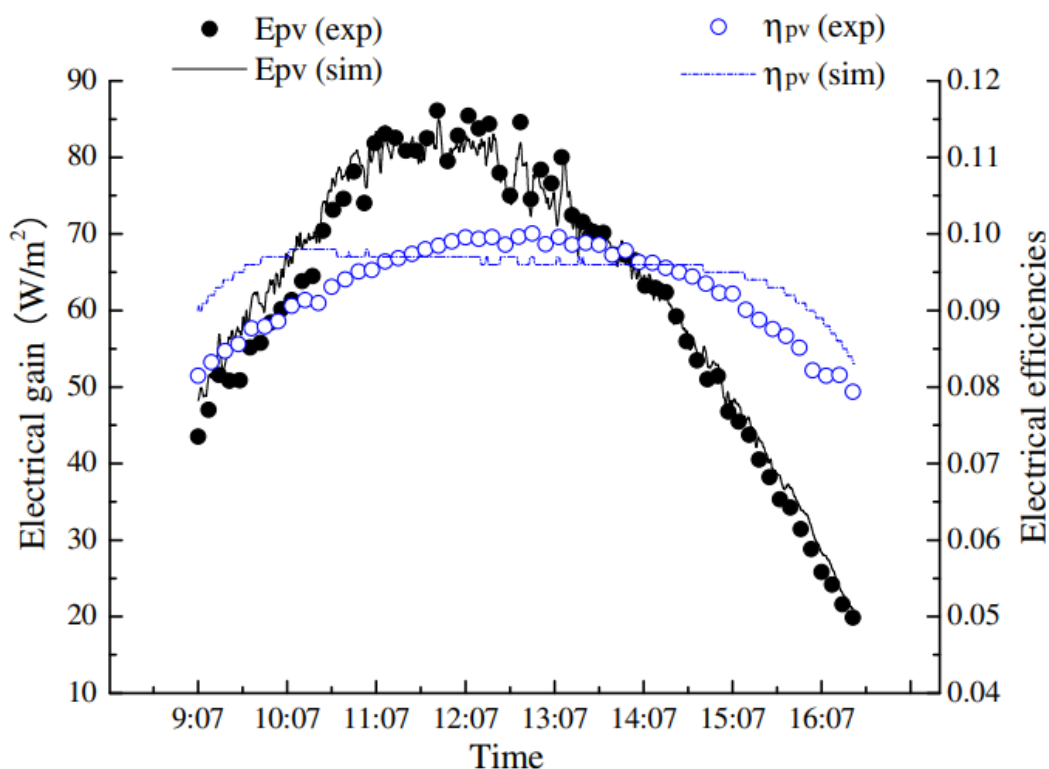
Σχήμα 18. Απόδοση PVT συστήματος και PV συστήματος κατά το καλοκαίρι. [30]

Οι ερευνητές, παρατήρησαν ότι κατά την άνοιξη υπήρξε αύξηση της θερμικής και της ηλεκτρικής απόδοσης κατά 16.35% και 5.67% αντίστοιχα, ενώ κατά την περίοδο

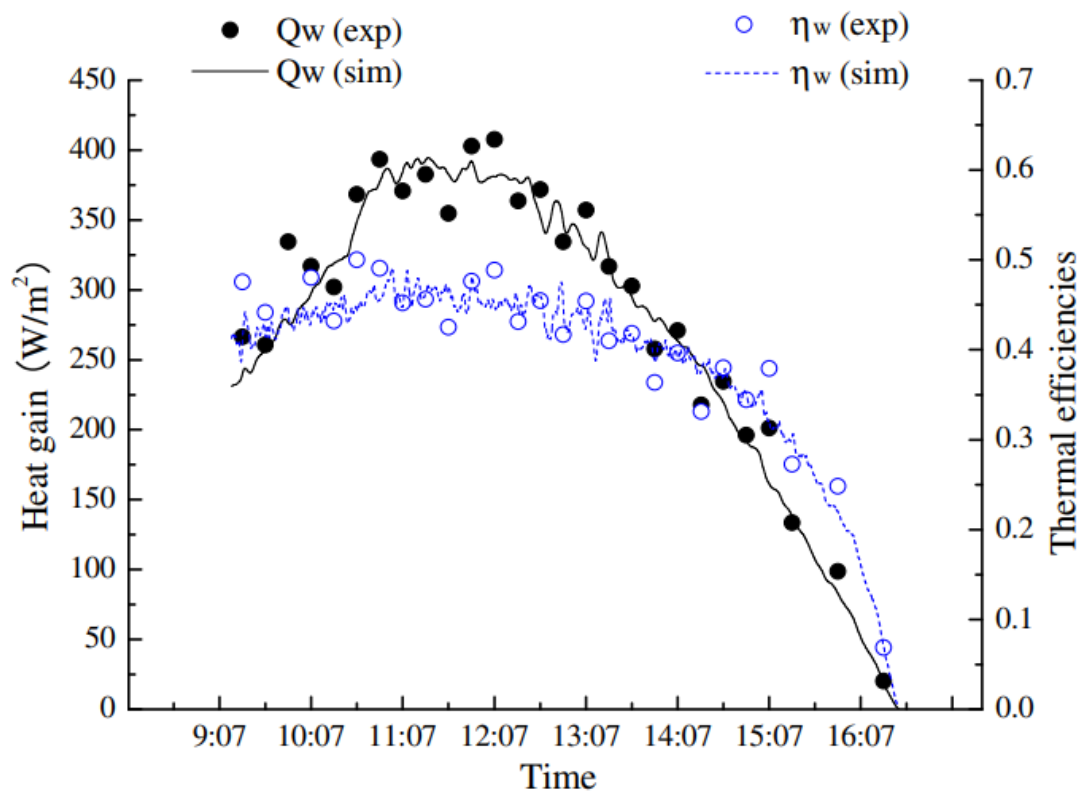
του καλοκαιριού υπήρξε μια αύξηση της θερμικής και της ηλεκτρικής απόδοσης, της τάξεως του 7.7% και 45.14% αντίστοιχα. Παράλληλα, υπήρξε αύξηση της συνολικής απόδοσης συγκριτικά με ένα απλό φωτοβολταϊκό σύστημα κατά 15.3% την άνοιξη και κατά 44.38% το καλοκαίρι.

□ **Αριθμητική και πειραματική μελέτη σε PVT σύστημα με σωλήνα θερμότητας**

Στη συγκεκριμένη αριθμητική και πειραματική μελέτη [31], οι ερευνητές σχεδίασαν και κατασκεύασαν ένα νέο PVT σύστημα σωλήνων θερμότητας. Το συγκεκριμένο σύστημα, σε αντίθεση με ένα απλό PVT σύστημα νερού, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιοχές ψυχρού κλίματος δίχως να υπάρχει ο κίνδυνος να παγώσει. Όσον αφορά τη μεθοδολογία που ακολούθησαν οι ερευνητές, αρχικά αναπτύχθηκε ένα μοντέλο προσομοίωσης αυτού του συστήματος ώστε να υπολογιστεί η απόδοση του και στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν πειραματικές μελέτες πάνω στο συγκεκριμένο σύστημα ώστε να είναι εφικτή σύγκριση με το μοντέλο προσομοίωσης για να επικυρωθούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Τα αποτελέσματα τόσο της ηλεκτρικής απόδοσης όσο και της θερμικής απόδοσης της προσομοίωσης και του πειράματος παρουσιάζονται παρακάτω.



Σχήμα 19. Ηλεκτρική απόδοση και ηλεκτρική ενέργεια (προσομοίωσης και πειράματος) συναρτήσει του χρόνου. [31]



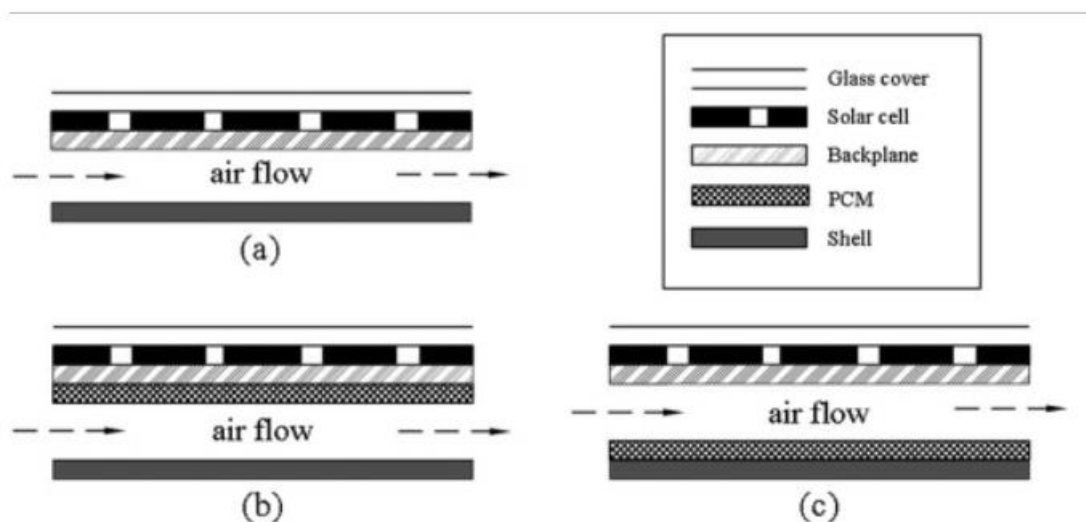
Σχήμα 20. Θερμική απόδοση και θερμική ενέργεια (προσομοίωσης και πειράματος) συναρτήσει του χρόνου. [31]

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα (Σχήμα 19 & Σχήμα 20), διακρίνεται ότι η παραγόμενη θερμική ενέργεια ανά επιφάνεια συλλέκτη ανέρχεται σε 276.9 W/m^2 και η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια ανά επιφάνεια συλλέκτη ανέρχεται σε 62.3 W/m^2 . Παράλληλα, η θερμική απόδοση ανέρχεται σε 41.9% και η ηλεκτρική απόδοση σε 9.4% . Τέλος, τονίζεται το γεγονός ότι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, όπως η θερμοκρασία των κελιών, της βάσης, του σωλήνα θερμότητας και του νερού είναι σχετικά κοντά με τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας, παρουσιάζοντας σχετικό σφάλμα μικρότερο ή ίσο του $\pm 5\%$. Όσον αφορά την παραγόμενη θερμική και ηλεκτρική ενέργεια όσο και τη θερμική και ηλεκτρική απόδοση, η μέση απόκλιση μεταξύ της προσομοίωσης και της πειραματικής διαδικασίας είναι μικρότερη ή ίση του $\pm 2.4\%$.

2.7.3 Έρευνα με χρήση υλικών αλλαγής φάσης

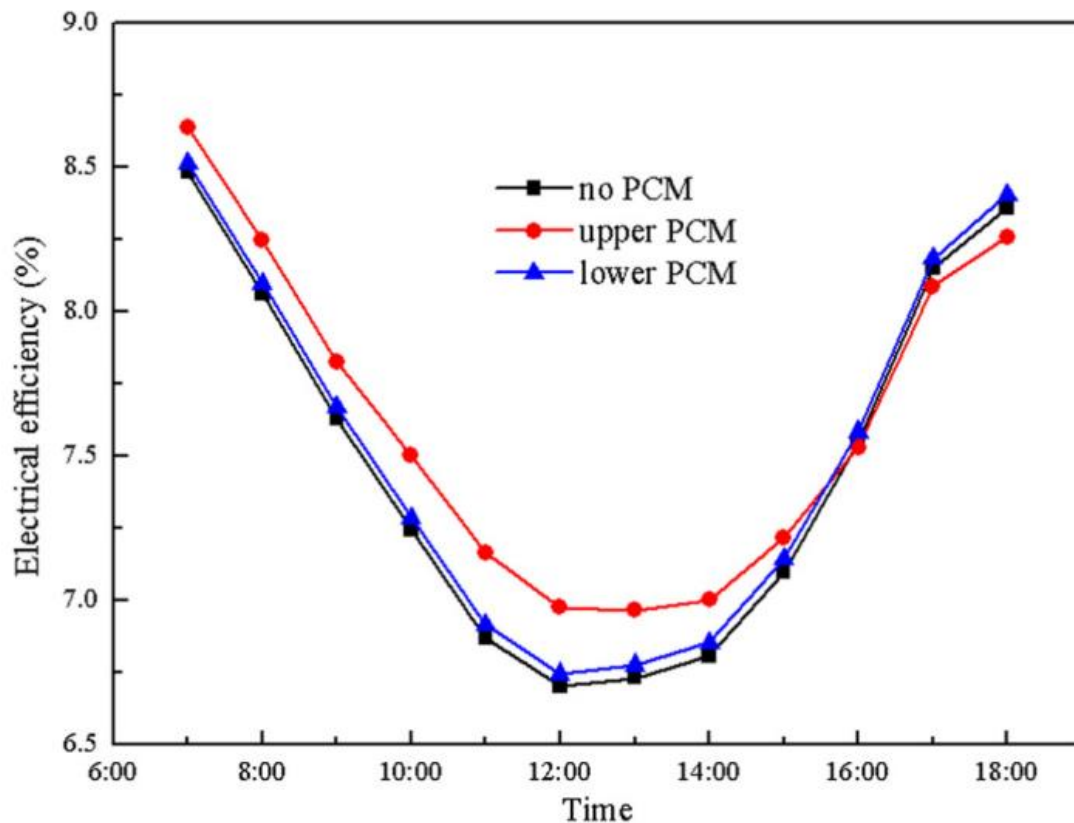
□ Συγκριτικές αναλύσεις δυναμικών επιδόσεων PVT συλλεκτών με υλικό αλλαγής φάσης

Στη συγκεκριμένη έρευνα [32], οι ερευνητές, έχοντας ως στόχο τη βελτίωση της απόδοσης ενός PVT συλλέκτη, πραγματοποίησαν συγκριτικές αναλύσεις σε έναν PVT συλλέκτη με ενσωματωμένο υλικό αλλαγής φάσης. Πιο αναλυτικά, η σύγκριση έγινε μεταξύ ενός απλού PVT συλλέκτη, ενός PVT συλλέκτη με υλικό αλλαγής φάσης στο άνω μέρος και ενός PVT συλλέκτη με υλικό αλλαγής φάσης στο κάτω μέρος, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 21**, όπου παρουσιάζονται οι διατάξεις των PVT συλλεκτών.



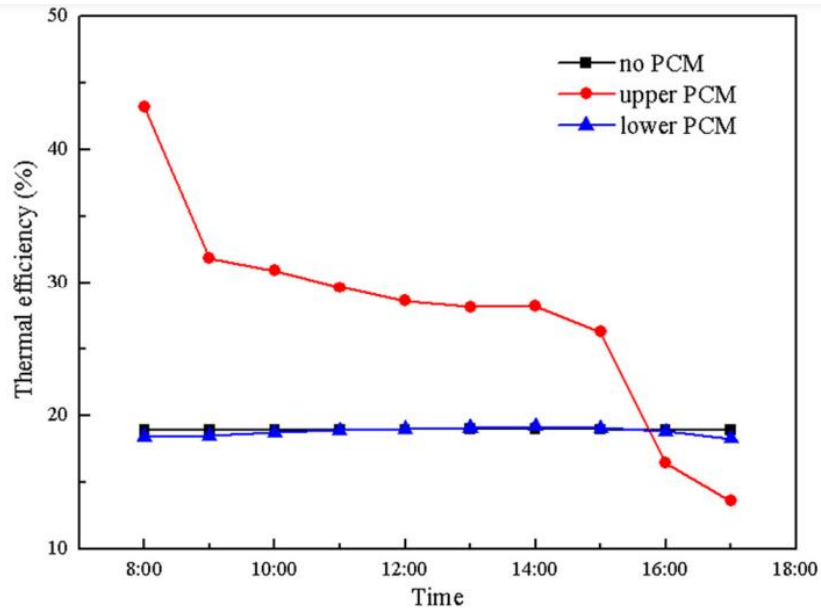
Σχήμα 21. Διάταξη PVT συλλεκτών: a) χωρίς υλικό αλλαγής φάσης, b) με υλικό αλλαγής φάσης στο άνω μέρος, c) με υλικό αλλαγής φάσης στο κάτω μέρος. [32]

Στα αποτελέσματα της συγκεκριμένης έρευνας, όπως αυτά παρουσιάζονται στα **Σχήματα 22÷24**, φαίνεται ότι όσον αφορά την ηλεκτρική απόδοση, η ύπαρξη υλικού αλλαγής φάσης στο άνω μέρος βελτιώνει την ηλεκτρική απόδοση ενώ η ύπαρξη υλικού αλλαγής φάσης στο κάτω μέρος τη βελτιώνει ελάχιστα (**Σχήμα 22**).



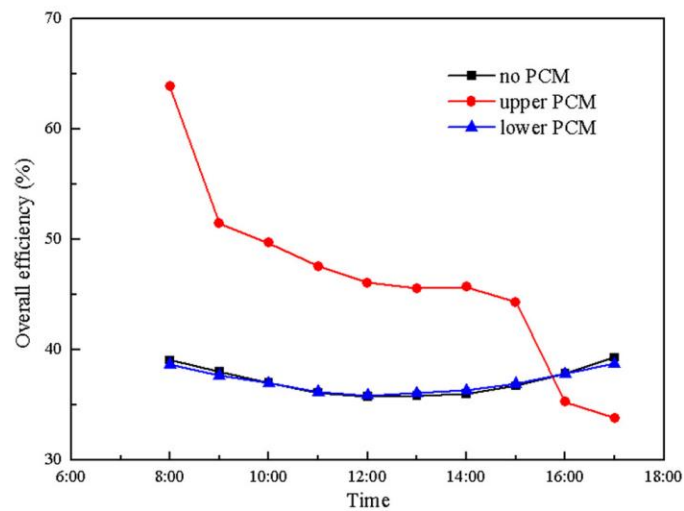
Σχήμα 22. Ηλεκτρική απόδοση απλού PVT συλλέκτη και PVT συλλεκτών με υλικό αλλαγής φάσης συναρτήσει του χρόνου. [32]

Από την άλλη, όσον αφορά τη θερμική απόδοση (Σχήμα 23), παρατηρείται ότι ο PVT συλλέκτης χωρίς υλικό αλλαγής φάσης και ο PVT συλλέκτης με υλικό αλλαγής φάσης στο κάτω μέρος, χαρακτηρίζονται από σταθερές τιμές θερμικής απόδοσης της τάξεως του 19%. Όσον αφορά τον PVT συλλέκτη με υλικό αλλαγής φάσης στο άνω μέρος, στην αρχή της ημέρας, παρατηρείται μια πτώση της θερμικής απόδοσης του, στη συνέχεια υπάρχει μια σταθερότητα περίπου στο 28% και ακολούθως μειώνεται περαιτέρω. Αυτό συμβαίνει διότι ο PVT συλλέκτης με υλικό αλλαγής φάσης στο άνω μέρος χαρακτηρίζεται από 3 φάσεις του υλικού: α) θερμαίνεται μέχρι τη θερμοκρασία αλλαγής φάσης, β) αρχίζει να λιώνει, γ) έχει λιώσει εντελώς.



Σχήμα 23. Θερμική απόδοση απλού PVT συλλέκτη και PVT συλλεκτών με υλικό αλλαγής φάσης συναρτήσει του χρόνου. [32]

Τέλος, όσον αφορά την ολική απόδοση του συλλέκτη, παρατηρείται ότι η ύπαρξη υλικού αλλαγής φάσης στο άνω μέρος του συλλέκτη οδηγεί σε βελτίωση της ολικής απόδοσης ενώ η ύπαρξη του στο κάτω μέρος προσδίδει μια μικρή βελτίωση όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 24**.



Σχήμα 24. Ολική απόδοση απλού PVT συλλέκτη και PVT συλλεκτών με υλικό αλλαγής φάσης συναρτήσει του χρόνου. [32]

Κεφάλαιο 3

3. Θερμική ανάλυση PVT

Όπως είναι γνωστό, ένας υβριδικός φωτοβολταϊκός θερμικός συλλέκτης (PVT), συνδυάζει την ταυτόχρονη παραγωγή τόσο ηλεκτρικής όσο και θερμικής ενέργειας. Η παραγόμενη θερμική ενέργεια συνήθως χρησιμοποιείται για την παραγωγή ζεστού νερού οικιακής χρήσης. Η ωφέλιμη θερμική ισχύς που παράγεται, ουσιαστικά εκφράζει την ενέργεια που έχει απορροφήσει ο συλλέκτης μειωμένη κατά τις θερμικές απώλειες προς το περιβάλλον οι οποίες προκαλούνται από διάφορους παράγοντες. Η ωφέλιμη θερμική ισχύς υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση [33]:

$$\dot{Q} = F_R \cdot A_c \cdot [G_T \cdot (\tau\alpha) - U_L \cdot (t_m - t_a)] \quad (1)$$

- \dot{Q} , ωφέλιμη θερμική ισχύς
- F_R , συντελεστής θερμικής απολαβής συλλέκτη
- A_c , επιφάνεια συλλέκτη (m^2)
- G_T , ένταση ηλιακής ακτινοβολίας ανά επιφάνεια του συλλέκτη (W/m^2)
- τ , συντελεστής διαπερατότητας διαφανούς καλύμματος
- α , συντελεστής απορρόφησης ηλιακής ακτινοβολίας
- U_L , συνολικός ισοδύναμος συντελεστής θερμικών απωλειών συλλέκτη
- t_m , μέση θερμοκρασία συλλέκτη (υπολογίζεται ως $\frac{T_i + T_o}{2}$), όπου T_i η θερμοκρασία εισόδου ($^{\circ}C$) και T_o η θερμοκρασία εξόδου ($^{\circ}C$) του ρευστού

Για την αξιολόγηση της θερμικής συμπεριφοράς του συλλέκτη, είναι δυνατό να υπολογιστεί τόσο ο στιγμιαίος βαθμός απόδοσης του όσο και η μακροχρόνια απόδοση του. Ο στιγμιαίος βαθμός απόδοσης υπολογίζεται με τα δεδομένα που επικρατούν εκείνη τη χρονική στιγμή.

3.1 Απόδοση ηλιακού συλλέκτη

Η απόδοση ενός ηλιακού συλλέκτη ελέγχεται σύμφωνα με τα πρότυπα EN 12975-1 (2001) και EN 12975-2 (2002) και γίνονται δοκιμές των ηλιακών συλλεκτών σε πιστοποιημένα εργαστήρια. Η στιγμιαία απόδοση του ηλιακού συλλέκτη, εξ'ορισμού είναι η ωφέλιμη θερμότητα που αποδίδεται από το συλλέκτη προς την προσπίπτουσα ακτινοβολία και υπολογίζεται από την εξίσωση [34]:

$$\eta = \frac{\dot{m} \cdot C_p \cdot (T_o - T_i)}{A_c \cdot G_T} = F_R(\tau\alpha)_n - F_R U_L \cdot \frac{(T_m - T_a)}{G_T} \quad (2)$$

- \dot{m} , ρυθμός παροχής μάζας (kg/s)
- C_p , ειδική θερμοχωρητικότητα νερού (J/kg °C)
- T_o , θερμοκρασία εξόδου (°C)
- T_i , θερμοκρασία εισόδου (°C)
- T_a , θερμοκρασία περιβάλλοντος (°C)

Με βάση το πρότυπο EN 15316-4-3 (2017), στην παραπάνω εξίσωση έχουν αλλάξει οι συμβολισμοί, με την προσθήκη του η_0 , του α_1 ενώ αντίστοιχα έχει προστεθεί και ο όρος α_2 . Έτσι, καταλήγουμε στην τελική μορφή της εξίσωσης υπολογισμού της στιγμιαίας απόδοσης ενός ηλιακού συλλέκτη:

$$\eta = \eta_0 - \alpha_1 \cdot \frac{(t_m - t_a)}{G_T} - \alpha_2 \cdot \frac{(t_m - t_a)^2}{G_T} \quad (3)$$

- η_0 , οπτικός βαθμός απόδοσης με μηδενικές απώλειες για $t_m = t_a$
- α_1 , συντελεστής απωλειών θερμότητας (W/m² K)
- α_2 , συντελεστής απωλειών θερμότητας 2^{ου} βαθμού (W/m²K²)
- t_m , μέση θερμοκρασία ρευστού

Ο συντελεστής α_2 εκφράζει τη θερμοκρασιακή εξάρτηση του συντελεστή απωλειών θερμότητας (α_1).

Σε περίπτωση που ο συντελεστής α_2 είναι αρνητικός (σύμφωνα με το πρότυπο EN 15316-4-3), τότε αγνοείται και ο υπολογισμός της απόδοσης δίνεται από την εξίσωση:

$$\eta = \eta_0 - \alpha_1 \cdot \frac{(t_m - t_a)}{G_T} \quad (4)$$

Με βάση την παραπάνω εξίσωση, είναι εύκολο να διακρίνουμε ότι η θερμική απόδοση ενός ηλιακού συλλέκτη εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τους συντελεστές η_0 , α_1 καθώς επίσης και από τη θερμοκρασιακή διαφορά $t_m - t_a$. Επειδή ο συντελεστής α_2 είναι σχετικά μικρός, πολλές φορές είναι αμελητέος. Στην παραπάνω εξίσωση δεν αναφέρεται η παροχή μάζας του ρευστού, η οποία επηρεάζει την απόδοση του καθώς μικρή παροχή μάζας αντιστοιχεί με αύξηση της θερμοκρασίας του ρευστού, η οποία σύμφωνα με τη εξίσωση (2) οδηγεί σε μείωση της απόδοσης του συλλέκτη. Τα

μεγέθη $F_R(\tau_a)_n$ και $F_R U_L$, είναι χαρακτηριστικά μεγέθη του συλλέκτη και δίνονται από τον κατασκευαστή. Οι τιμές τόσο του γινομένου $(\tau_a)_n$ όσο και των συντελεστών F_R και U_L κυμαίνονται σε συγκεκριμένο εύρος τιμών, επομένως για προσεγγιστικούς και πιο γρήγορους υπολογισμούς χρησιμοποιούνται μέσες τιμές για αυτά τα μεγέθη όπως έχουν προκύψει από τα τεχνικά χαρακτηριστικά διαφόρων κατασκευαστών ανάλογα με τον εκάστοτε τύπο του ηλιακού συλλέκτη. Αυτές οι τιμές παρουσιάζονται στον **Πίνακα 1**.

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά μεγέθη ηλιακών συλλεκτών. [35]

Περιγραφή συλλέκτη	$F_R(\tau_a)_n$	$F_R U_L$ (W/m ² °C)
Πλαστικός συλλέκτης, χωρίς τζάμι και μόνωση (δοκιμή σε ταχύτητα αέρα 2,2 m/s)	0,86	21,5
Μαύρο χρώμα – Μονό τζάμι	0,82	7,5
Μαύρο χρώμα – Διπλό τζάμι, ή επιλεκτική επιφάνεια – Μονό τζάμι	0,75	5,0
Σωλήνες κενού	0,45	1,25

Ο συντελεστής F_R ονομάζεται συντελεστής θερμικής απολαβής του συλλέκτη και υπολογίζεται κάτω από διάφορες δοκιμές του κατασκευαστή. Η τιμή του εξαρτάται από την κατασκευή του ηλιακού συλλέκτη, την παροχή του ρευστού καθώς επίσης και από τα υλικά της συλλεκτικής επιφάνειας κ.λπ. Εκφράζει την πραγματική ωφέλιμη ενέργεια που συλλέγει ο συλλέκτης προς την ωφέλιμη ενέργεια που θα είχε συλλέξει εάν ολόκληρη η επιφάνεια του είχε θερμοκρασία ίση με αυτή της εισόδου του ρευστού, δηλαδή οι θερμικές απώλειες ήταν μηδαμινές [33] και δίνεται από την εξίσωση:

$$F_R = \frac{\dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{out} - T_{in})}{A_c \cdot [G_T - U_L \cdot (T_{out} - T_a)]} \quad (5)$$

Ο συντελεστής θερμικής απολαβής μπορεί να εκφραστεί και ως:

$$F_R = \frac{\dot{m} \cdot c_p}{A_c \cdot U_L} \left[1 - \exp \left(- \frac{A_c \cdot U_L \cdot F'}{\dot{m} \cdot c_p} \right) \right] \quad (6)$$

Το γινόμενο $(\tau\alpha)_n$ είναι το γινόμενο διαπερατότητας – απορροφητικότητας του ηλιακού συλλέκτη για κάθετη γωνία πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας (0°). Πιο αναλυτικά, καθώς η ηλιακή ακτινοβολία (G_T) προσπίπτει σε έναν συλλέκτη, του οποίου το κάλυμμα έχει συντελεστή διαπερατότητας τ και η απορροφητική επιφάνεια έχει συντελεστή απορροφητικότητας α , τότε από την ακτινοβολία απορροφάται ένα μέρος της ίσο με $G_T \cdot \tau\alpha$. Στη συνέχεια, υπάρχει ένα ποσοστό της ακτινοβολίας που δεν έχει απορροφηθεί, το οποίο επιστρέφει πίσω στο κάλυμμα με αποτέλεσμα ένα μέρος αυτού του ποσοστού ίσο με $\tau(1-\alpha)\rho_d$ (όπου ρ_d , ο συντελεστής ανακλαστικότητας του καλύμματος) να ανακλάται πίσω στην απορροφητική επιφάνεια [36]. Αυτή η διαδικασία είναι επαναλαμβανόμενη και περιγράφεται από την εξίσωση:

$$(\tau\alpha)_n = (\tau'\alpha) \sum_{n=0}^{\infty} [(1-\alpha)\rho_d]^n = \frac{(\tau'\alpha)}{1-(1-\alpha)\rho_d} \quad (7)$$

Όπου ο δείκτης n συμβολίζει τον αριθμό των επαναλήψεων της συγκεκριμένης διαδικασίας (όπως αναφέρθηκε παραπάνω) ενώ το γινόμενο $(\tau'\alpha)$ εκφράζει το γινόμενο διαπερατότητας – απορροφητικότητας για κάθε γωνία πρόσπτωσης.

Ο συντελεστής συνολικών θερμικών απωλειών U_L λαμβάνει υπόψη το σύνολο των θερμικών απωλειών προς το περιβάλλον τόσο λόγω συναγωγής όσο και λόγω αγωγής και ακτινοβολίας [33]. Πιο αναλυτικά, ο συντελεστής U_L , υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$U_L = U_t + U_b + U_e \quad (8)$$

Στην παραπάνω εξίσωση, το U_t συμβολίζει τις θερμικές απώλειες στο πάνω μέρος του συλλέκτη, το U_b τις θερμικές απώλειες στο κάτω μέρος του συλλέκτη και τέλος, το U_e τις θερμικές απώλειες στις άκρες του συλλέκτη. Ο συντελεστής θερμικών απωλειών στο πάνω μέρος του συλλέκτη λαμβάνει υπόψη τις απώλειες λόγω της θερμικής συναγωγής και της ακτινοβολίας, ο συντελεστής θερμικών απωλειών στο κάτω μέρος του συλλέκτη λαμβάνει υπόψη τις απώλειες λόγω αγωγής και συναγωγής. Ο συντελεστής θερμικών απωλειών στις άκρες του συλλέκτη, για τους περισσότερους συλλέκτες, πρέπει να είναι μικρός (τυπικές τιμές: 1.5-2.0 W/m²K) ώστε να μην είναι απαραίτητος ο υπολογισμός του με μεγάλη ακρίβεια [34].

Η παράμετρος $F_R(\tau\alpha)_n$ εκφράζει τον τρόπο εκείνο με τον οποίο η ενέργεια απορροφάται από τον συλλέκτη, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τον συντελεστή θερμικής απολαβής όσο και το γινόμενο διαπερατότητας – απορροφητικότητας. Αντίθετα, η παράμετρος $F_R U_L$ περιγράφει τον τρόπο εκείνο με τον οποίο χάνεται η θερμική ενέργεια από τον συλλέκτη, καθώς λαμβάνει υπόψη τις θερμικές απώλειες.

Η παραπάνω εξίσωση (3) για τον υπολογισμό της θερμικής απόδοσης ενός ηλιακού συλλέκτη αφορά τον στιγμιαίο βαθμό απόδοσης του. Για τη σωστή αξιολόγηση της απόδοσης ενός ηλιακού συλλέκτη θα πρέπει να υπολογιστεί και ο μακροχρόνιος βαθμός απόδοσης του, ο οποίος περιγράφει το ποσοστό εκείνο της απαιτούμενης θερμικής ενέργειας της εγκατάστασης το οποίο μπορεί να καλυφθεί από τον ηλιακό συλλέκτη [37]. Στην παρούσα διπλωματική, για τον υπολογισμό του συγκεκριμένου ποσοστού, θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος καμπυλών f η οποία αναπτύχθηκε από τους S. Klein, W.A. Beckman και J.A Duffie [38].

3.2 Μέθοδος καμπυλών f

Η συγκεκριμένη μέθοδος οδηγεί στον υπολογισμό του ποσοστού f της απαιτούμενης θερμικής ενέργειας το οποίο μπορούν να καλύψουν οι ηλιακοί συλλέκτες, με τη χρήση της παρακάτω εξίσωσης:

$$f = 1.029 \cdot Y - 0.065 \cdot X - 0.245 \cdot Y^2 + 0.0018 \cdot X^2 + 0.0215 \cdot Y^3 \quad (9)$$

Οι συντελεστές X και Y κυμαίνονται σε εύρη $0 < Y < 3$ και $0 < X < 18$.

Σε περαιτέρω ανάλυση, ο συντελεστής X εκφράζει το πηλίκο του ποσού των ενεργειακών απωλειών που υπάρχουν προς το συνολικό θερμικό φορτίο του εκάστοτε μήνα και υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$X = F_R U_L \cdot \frac{F_R'}{F_R} \cdot (t_{ref} - \underline{t}_a) \cdot \Delta t \cdot \frac{A_c}{L} \cdot K_2 \cdot K_3 \quad (10)$$

Από την άλλη, ο συντελεστής Y εκφράζει το πηλίκο της ενέργειας την οποία είναι σε θέση να αξιοποιήσει ο ηλιακός συλλέκτης προς το συνολικό θερμικό φορτίο του εκάστοτε μήνα "L" και υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$Y = F_R(\tau\alpha)_n \cdot \frac{F_R'}{F_R} \cdot \frac{(\tau'\alpha)}{(\tau\alpha)_n} \cdot \frac{H_T}{L} \cdot \frac{A_c}{L} \cdot K_4 \quad (11)$$

Όπου:

$\frac{F'_R}{F_R}$, ο διορθωτικός συντελεστής συλλέκτη – εναλλάκτη, στην περίπτωση κλειστού κυκλώματος όπου υπάρχει εναλλάκτης θερμότητας παίρνει τιμές από 0÷1. Σε περίπτωση όπου δεν υπάρχει εναλλάκτης θερμότητας τότε ισούται με 1 [37].

t_{ref} , η θερμοκρασία αναφοράς, η οποία λαμβάνεται ίση με 100 °C.

t_a , η μέση μηνιαία ημερήσια θερμοκρασία (°C).

Δt , η χρονική περίοδος ενός μήνα σε sec, η οποία υπολογίζεται ως: $\Delta t = 24 \cdot 3600 \cdot N$, όπου "N" ο αριθμός των ημερών του μήνα.

L , το μέσο μηνιαίο θερμικό φορτίο για την παροχή ζεστού νερού και τη θέρμανση χώρων, το οποίο υπολογίζεται ως:

$$L = L_w + L_p \text{ (Joule)} \quad (12)$$

L_p , το μηνιαίο φορτίο για τη θέρμανση χώρων.

L_w , το απαιτούμενο φορτίο για την παροχή ζεστού νερού, το οποίο για έναν μήνα υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$L_w = N \cdot V_w \cdot \rho \cdot C_p \cdot (\theta_w - \theta_m) \quad (13)$$

Όπου:

V_w , η μέση ημερήσια κατανάλωση ζεστού νερού (lt/ημέρα).

ρ , η πυκνότητα του νερού σε kg/lt.

C_p , η ειδική θερμοχωρητικότητα του νερού, η οποία είναι ίση με 4179 Joule/kg °C).

θ_w , η επιθυμητή θερμοκρασία ζεστού νερού.

θ_m , η μέση θερμοκρασία προσαγωγής του κρύου νερού από το δίκτυο.

H_T , η μέση μηνιαία ακτινοβολία στην επιφάνεια του ηλιακού συλλέκτη ($J/m^2 \cdot mo$).

$\frac{(\tau' \alpha)}{(\tau \alpha)_n}$, ο διορθωτικός συντελεστής ο οποίος λαμβάνει υπόψιν του την κλίση τοποθέτησης του ηλιακού συλλέκτη. Ο συγκεκριμένος διορθωτικός συντελεστής

διαφέρει ανάλογα με τον τύπου του ηλιακού συλλέκτη που χρησιμοποιείται και αποτελεί ουσιαστικά το διορθωτικό συντελεστή γωνίας πρόσπτωσης K_{α} (Incidence Angle Modifier) [34].

- K_2 , ο διορθωτικός συντελεστής χωρητικότητας της δεξαμενής. Η μέθοδος καμπυλών f έχει αναπτυχθεί για ανηγμένη χωρητικότητα δεξαμενής ίση με 75 lt/m^2 με $K_2 = 1$. Όταν όμως δεν ισχύει αυτή η περίπτωση, χρησιμοποιείται ο διορθωτικός συντελεστής K_2 , ο οποίος υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$K_2 = (75/M)^{0.25} \quad (14)$$

με M τον ανηγμένο όγκο της δεξαμενής σε lt/m^2 .

- K_3 , ο διορθωτικός συντελεστής ζεστού νερού. Η μέθοδος καμπυλών f , έχει αναπτυχθεί θεωρώντας ότι $L_w/L_p \ll 1$, επομένως και $K_3=1$. Σε περίπτωση που ο υπολογισμός αφορά μόνο τη θέρμανση νερού χρήσης, τότε ο συντελεστής K_3 υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$K_3 = (11.6 + 1.18 \cdot \theta_w + 3.86 \cdot \theta_m - 2.32 \cdot \theta_a) / (100 - \theta_a) \quad (15)$$

με θ_a τη μέση μηνιαία θερμοκρασία περιβάλλοντος.

- K_4 , ο διορθωτικός συντελεστής για τον εναλλάκτη θερμότητας μεταξύ φορτίου και εργαζόμενου μέσου συλλέκτη. Η μέθοδος καμπυλών f , έχει αναπτυχθεί θεωρώντας ότι $\frac{\varepsilon_L \cdot C_{min}}{(U \cdot A_c)_b} = 2$.

Όπου:

- ε_L , ο βαθμός εκμετάλλευσης του εναλλάκτη.
- C_{min} , η μικρότερη θερμική παροχή μεταξύ εργαζόμενου μέσου - νερού κυκλώματος θέρμανσης και συστήματος δεξαμενής ($\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$).
- $(U \cdot A_c)_b$, το γινόμενο του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας και της περιβάλλουσας επιφάνειας του συλλέκτη ($\text{W}/^\circ\text{C}$).

Σε περίπτωση που ο συντελεστής $\frac{\varepsilon_L \cdot C_{min}}{(U \cdot A_c)_b}$ παίρνει διαφορετική τιμή, τότε ο K_4 υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$K_4 = 0.39 + 0.65 \exp. \left[\frac{-0.139}{\frac{\varepsilon_L \cdot C_{min}}{(U \cdot A_c)_b}} \right] \quad (16)$$

Για παραγωγή ζεστού νερού, ο συντελεστής K_4 παίρνει τιμή ίση με $K_4=1$ καθώς δεν παρεμβάλλεται εναλλάκτης φορτίου.

Με βάση όλα τα παραπάνω, υπολογίζεται το ποσοστό f για κάθε μήνα του χρόνου ενώ παράλληλα το μέσο μηνιαίο ωφέλιμο φορτίο που καλύπτει ο συλλέκτης, δίνεται από την εξίσωση:

$$\dot{Q}_{\omega\phi-mo} = L \cdot f \quad (17)$$

Αντίστοιχα, το συνολικό ετήσιο φορτίο που είναι σε θέση να καλύψει ο συλλέκτης υπολογίζεται ως:

$$Q_{\omega\phi} = \Sigma(L_i \cdot f_i) \quad (18)$$

Ενώ ο μέσος ετήσιος συντελεστής κάλυψης της υπάρχουσας εγκατάστασης (F), υπολογίζεται ως:

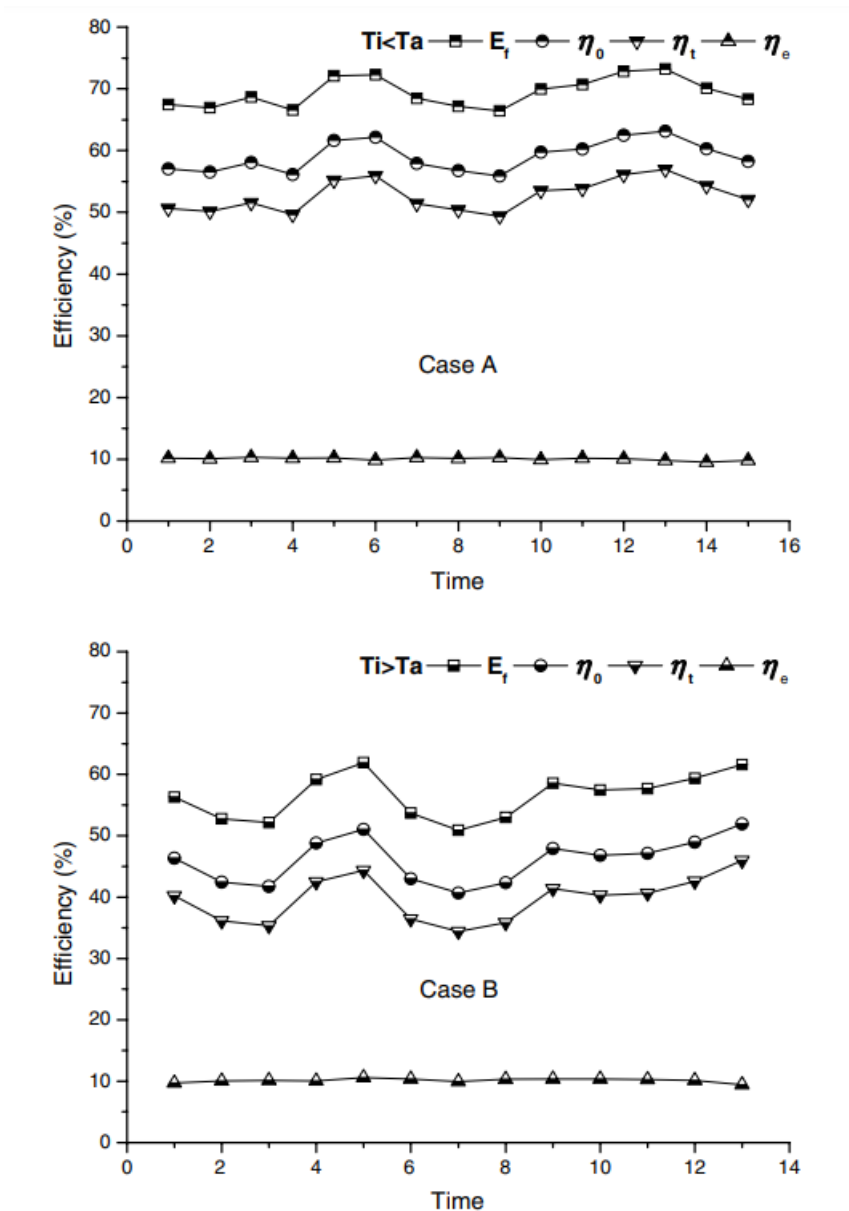
$$F = \frac{Q_{\omega\phi}}{\Sigma L_i} = \frac{\Sigma (L_i \cdot f_i)}{\Sigma L_i} \quad (19)$$

3.3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση δημοσιευμένων ερευνών υπολογισμού του βαθμού απόδοσης ενός PVT συστήματος

Γενικά, έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές έρευνες όσον αφορά τον υπολογισμό της απόδοσης ενός PVT συστήματος τόσο νερού όσο και αέρα. Παράλληλα, γίνονται έρευνες για την εύρεση τρόπων βελτίωσης της θερμικής απόδοσης των συγκεκριμένων συστημάτων.

Σε μια έρευνα που πραγματοποιήθηκε [39], σκοπός ήταν η κατασκευή ενός επίπεδου PVT συλλέκτη με πολυκρυσταλλικά κελιά πυριτίου εγκατεστημένα σε έναν ηλιακό συλλέκτη και ακολούθως ο υπολογισμός της θερμικής απόδοσης του. Οι δοκιμές του πειράματος ενός βελτιωμένου πρωτότυπου έγιναν σε εξωτερικό χώρο σε ζώνη ήπιου κλίματος. Όσον αφορά τις μετρήσεις που ελήφθησαν για τη διεξαγωγή της μελέτης, αυτές πάρθηκαν ανά 8ωρο (από τις 8:00 έως τις 16:00) κατά τα τέλη Ιουλίου έως τα μέσα Οκτωβρίου. Οι μετρήσεις που λήφθηκαν, αφορούσαν την ηλιακή ακτινοβολία, τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, τις θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου του ρευστού και τέλος την παροχή μάζας του ρευστού. Για τον υπολογισμό

του στιγμιαίου βαθμού απόδοσης χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση (3) (χωρίς τον συντελεστή α_2 καθώς αυτός ήταν ίσος με 0). Η πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε για δύο περιπτώσεις: α) όταν η θερμοκρασία εισόδου του νερού είναι μεγαλύτερη από αυτή του περιβάλλοντος και β) όταν η θερμοκρασία εισόδου του νερού είναι μικρότερη από αυτή του περιβάλλοντος. Όπως φαίνεται και από το **Σχήμα 25**, τα αποτελέσματα της ημερήσιας θερμικής απόδοσης για την περίπτωση (α) είναι υψηλότερα κατά 13% από αυτά της περίπτωσης (β).



Σχήμα 25. Απόδοση (θερμική, οπτική) συναρτήσει του χρόνου. [39]

Στα αποτελέσματα, βρέθηκε ότι η ημερήσια θερμική απόδοση ξεπερνούσε το 45% και η συνολική απόδοση (λαμβάνοντας υπόψη και την ηλεκτρική απόδοση) ξεπερνούσε το 52%.

Σε μια άλλη έρευνα [40], σχεδιάστηκε και δοκιμάστηκε στο Νέο Δελχί, ένα PVT σύστημα με διπλό τζάμι. Η δοκιμή έγινε κατά την περίοδο Φεβρουαρίου – Απριλίου 2007 και πάρθηκαν μετρήσεις καθημερινά ανά μία ώρα, οι οποίες αφορούσαν τις εξής παραμέτρους:

- Θερμοκρασία εισόδου του ρευστού
- Θερμοκρασία εξόδου του ρευστού
- Θερμοκρασία θερμοδοχείου
- Θερμοκρασία περιβάλλοντος
- Ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια του συλλέκτη

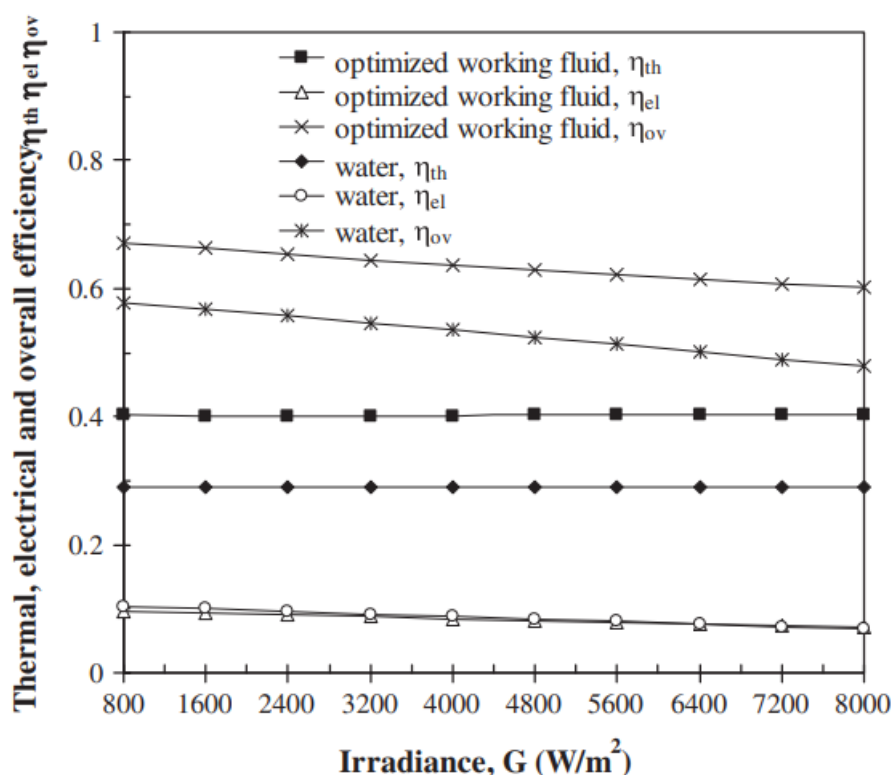
Παράλληλα, η ροή μάζας ήταν 0.045 kg/s, 0.06 kg/s και 0.09 kg/s. Γνωρίζοντας την οπτική απόδοσης ‘ η_0 ’ και τον συντελεστή θερμικών απωλειών ‘ a_1 ’, χρησιμοποιήθηκε πάλι η εξίσωση (3) ενώ παράλληλα έγιναν δοκιμές για τρεις περιπτώσεις:

- 1^η περίπτωση: η απορροφητική επιφάνεια καλύπτεται εξ’ολοκλήρου με φωτοβολταϊκό διπλού τζαμιού
- 2^η περίπτωση: η απορροφητική επιφάνεια καλύπτεται κατά 50% από φωτοβολταϊκό διπλού τζαμιού
- 3^η περίπτωση: η απορροφητική επιφάνεια καλύπτεται κατά 30.56% από φωτοβολταϊκό και είναι συνδεδεμένη σε σειρά με έναν απλό συλλέκτη.

Στα αποτελέσματα, βρέθηκε ότι η στιγμιαία θερμική απόδοση αυξήθηκε από 33% σε 64% από την 1^η περίπτωση στην 3^η περίπτωση αντίστοιχα. Η χαμηλότερη θερμική απόδοση υπολογίστηκε κατά την 1^η περίπτωση ενώ η υψηλότερη κατά την 3^η περίπτωση.

Το 2010, μια ομάδα Κινέζων ερευνητών [41], σχεδίασε ένα PVT σύστημα χρησιμοποιώντας τόσο μη συγκεντρωτική όσο και συγκεντρωτική ακτινοβολία. Το σύστημα αποτελούνταν από μια φωτοβολταϊκή μονάδα από ηλιακά κελιά πυριτίου

και μια θερμική μονάδα που βασιζόταν στην αρχή λειτουργίας ενός συλλέκτη που απορροφά απευθείας την ηλιακή ακτινοβολία. Στη συγκεκριμένη έρευνα, ο υπολογισμός της θερμικής απόδοσης έγινε με βάση την εξίσωση (2). Στα αποτελέσματα της συγκεκριμένης έρευνας (όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 26**), η θερμική απόδοση του συστήματος ήταν σταθερή στο 40% ενώ η συνολική απόδοση του συστήματος (λαμβάνοντας υπόψη και την ηλεκτρική απόδοση) κυμάνθηκε μεταξύ 60% - 67%.

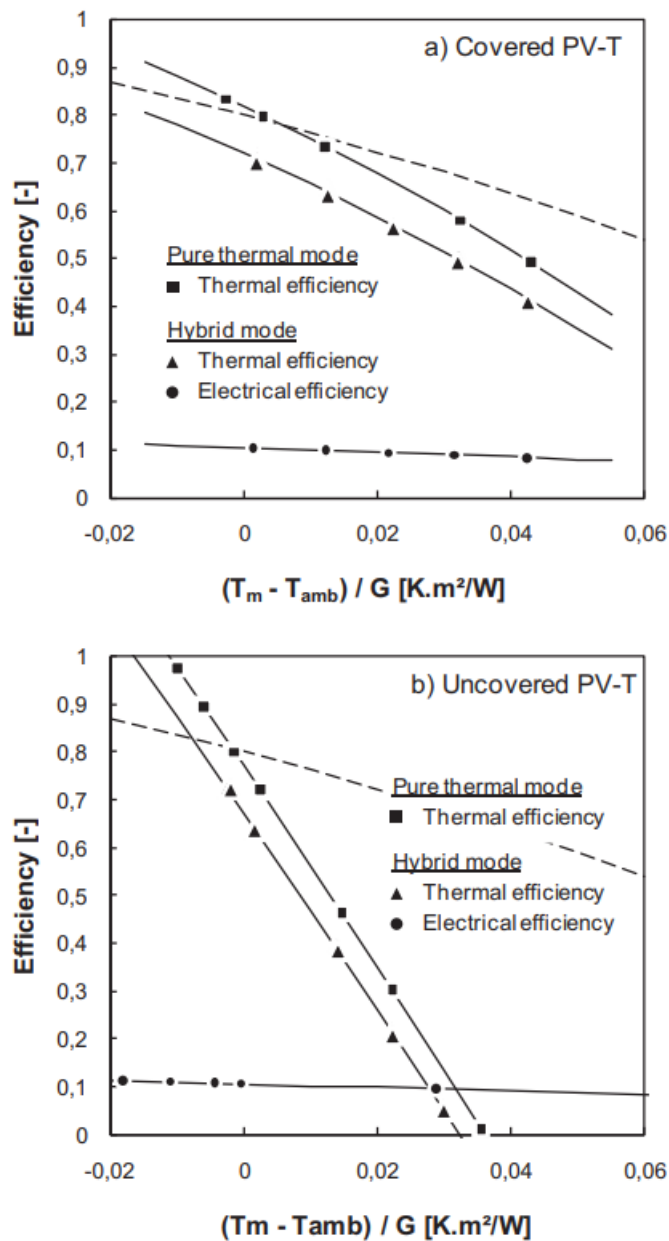


Σχήμα 26. Διάγραμμα θερμικής, ηλεκτρικής και ολικής απόδοσης συστήματος συναρτήσει της ηλιακής ακτινοβολίας. [41]

Στο **Σχήμα 26**, παρατίθεται το διάγραμμα των αποδόσεων (θερμική, ηλεκτρική, ολική) του συστήματος τόσο για νερό όσο και για το βέλτιστο εργαζόμενο μέσο.

Σε μια άλλη έρευνα [42], πραγματοποιήθηκε η αξιολόγηση ενός PVT συλλέκτη ως μέρος ενός ηλιακού συστήματος. Αρχικά, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δοκιμής του PVT συλλέκτη και στη συνέχεια προσδιορίζεται η απόδοση του, η οποία συγκρίνεται με εκείνη συστημάτων που λειτουργούν με απλούς ηλιακούς συλλέκτες,

μέσω του προγράμματος TRNSYS. Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης έρευνας παρουσιάζονται στο **Σχήμα 27**.



Σχήμα 27. Θερμική και ηλεκτρική απόδοση PVT συλλέκτη α) με κάλυμμα και β) χωρίς κάλυμμα. [42]

Με βάση το **Σχήμα 27**, παρατηρείται ότι η οπτική απόδοση του PVT συλλέκτη με κάλυμμα είναι 70% ενώ η ηλεκτρική του απόδοση είναι 11%. Από την άλλη, η οπτική απόδοση του PVT συλλέκτη χωρίς κάλυμμα είναι 67%. Τέλος, οι ερευνητές, από τη συγκεκριμένη έρευνα, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η χρήση ενός PVT

συστήματος σε μια περιορισμένη επιφάνεια οροφής προσφέρει εξοικονόμηση ενέργειας συγκριτικά με την εγκατάσταση απλών συμβατικών ηλιακών συλλεκτών και φωτοβολταϊκών μονάδων σε σειρά.

Κεφάλαιο 4

4. Μεθοδολογία και Αποτελέσματα

4.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά συλλεκτών και δεδομένα

Στην παρούσα διπλωματική, η διερεύνηση της θερμικής απόδοσης του PVT έγινε μέσω του εμπορικού προγράμματος T*SOL, το οποίο είναι ένα πρόγραμμα δυναμικής προσομοίωσης για τον σχεδιασμό, τη βελτιστοποίηση και τον υπολογισμό ηλιοθερμικών συστημάτων. Σκοπός ήταν η σύγκριση του βαθμού απόδοσης και του ποσοστού f της απαιτούμενης θερμικής ενέργειας ανάμεσα σε έναν επίπεδο ηλιακό συλλέκτη και έναν PVT συλλέκτη διπλάσιας επιφάνειας. Μέσα από τη βάση δεδομένων της ιστοσελίδας ‘‘CEN Keymark’’ (keymark.eu), η οποία είναι μια ιστοσελίδα που παρέχει τα πιστοποιητικά διάφορων ηλιακών συλλεκτών και συστημάτων, εναρμονισμένα με τα διεθνή πρότυπα πιστοποίησης, επιλέχθηκαν 4 PVT συλλέκτες (συνολικός αριθμός PVT συλλεκτών που υπήρχαν διαθέσιμοι στην ιστοσελίδα) και 4 επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες. Η επιλογή τους έγινε με κριτήριο η επιφάνεια τόσο των PVT όσο και των επίπεδων ηλιακών συλλεκτών να είναι ίδια ή σχεδόν ίδια, ώστε στη συνέχεια να είναι δυνατή η πραγματοποίηση της σύγκρισης με τους PVT συλλέκτες. Οι PVT συλλέκτες και οι απλοί ηλιακοί συλλέκτες που επιλέχθηκαν παρουσιάζονται στον **Πίνακα 2**:

Πίνακας 2: Επιφάνεια PVT συλλεκτών και επίπεδων ηλιακών συλλεκτών.

		Name	A_c (m^2)			Name	A_c (m^2)
PVT	1	Volther Excell PVT	1,68	ST	1	Dedalos 1.7	1,66
	2	THERMAU280PV	1,64		2	Phaethon SA170	1,65
	3	PVT warmtepomppaneel	1,98		3	C2000D12c	2,06
	4	SOLINK PVT	1,98		4	FLATINMASTER 2000	2

Πέρα από την επιφάνεια των συλλεκτών, για να είναι δυνατή η σύγκριση του βαθμού απόδοσης και του ποσοστού f , είναι απαραίτητα και τα τεχνικά χαρακτηριστικά των

συλλεκτών. Αυτά παρουσιάζονται στους **Πίνακες 3÷6**, τόσο για τους PVT συλλέκτες όσο και για τους επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες.

Πίνακας 3: Τεχνικά χαρακτηριστικά PVT συλλεκτών.

PVT	Name	η_0	α_1 (W/m ² K)	α_2 (W/m ² K ²)	Heat Capacity (J/m ² K)	IAM (50°)	K_d
		Volther Excell PVT	0,396	6,18	0	76123	0,86
	PVTHERMAU280	0,535	10,74	0	22100	0,97	0,95
	PVT warmtepompaneel	0,468	22,99	0	26050	1	0,953
	SOLINK PVT*	0,137	84,35	0	41580	1	1

*Ο PVT συλλέκτης Νο4 (SOLINK PVT) παρουσιάζει αρκετά χαμηλό οπτικό βαθμό απόδοσης (απόδοση με μηδαμινές απώλειες) και αρκετά υψηλό συντελεστή θερμικών απωλειών, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τα αποτελέσματα που θα ληφθούν από τον συγκεκριμένο συλλέκτη δεν θα είναι αρκετά χρήσιμα για τη σύγκριση που θα πραγματοποιηθεί. Για τον λόγο αυτό, θα επιλεγεί ένας ακόμα PVT συλλέκτης (ελληνικής εταιρείας), τα τεχνικά χαρακτηριστικά του οποίου παρουσιάζονται παρακάτω.

Πίνακας 4: Τεχνικά χαρακτηριστικά PVT συλλέκτη (ελληνικής εταιρείας).

Name	A_c (m ²)	η_0	α_1 (W/m ² K)	α_2 (W/m ² K)	Heat Capacity (J/m ² K)	IAM (50°)	K_d
FEGEN PVT CSK6-16PS	1,63	0,4617	9,0893	0	28091	0,88	0,91

Η σύγκριση έγινε με βάση τη σειρά των συλλεκτών στον **Πίνακα 2** και δημιουργήθηκαν 4 περιπτώσεις σύγκρισης οι οποίες παρουσιάζονται στον **Πίνακα 5**.

Πίνακας 5: Περιπτώσεις σύγκρισης.

1 ^η περίπτωση σύγκρισης	Dedalos 1.7 – Volther Excell PVT
2 ^η περίπτωση σύγκρισης	Phaethon SA170 – PVTHERMAU280
3 ^η περίπτωση σύγκρισης	C2000D12c - PVT warmtepompaneel
4 ^η περίπτωση σύγκρισης	Phaethon SA170 - FEGEN PVT CSK6-16PS

Πίνακας 6: Τεχνικά χαρακτηριστικά επίπεδων ηλιακών συλλεκτών.

ST	Name	η_0	α_1 (W/m ² K)	α_2 (W/m ² K ²)	Heat Capacity (J/m ² K)	IAM (50°)	K _d
	Dedalos 1.7	0,629	3,77	0,01	8	0,86	0,83
	Phaethon SA170	0,73	3,59	0,021	7970	0,84	0,8
	C2000D12c	0,699	3,82	0,016	6361	0,86	0,81
	FLATINMASTER 2000	0,723	4,457	0,023	2570	0,88	0,847

Στη συνέχεια, μέσω του προγράμματος ορίστηκαν οι περιβαλλοντικές συνθήκες να αντιστοιχούν σε αυτές της Αθήνας. Οι περιβαλλοντικές συνθήκες περιλαμβάνουν:

- Θερμοκρασία περιβάλλοντος, T_a (°C)
- Ηλιακή Ενέργεια, G horizontal (kWh)
- Ταχύτητα ανέμου, u (m/s)

Ταυτόχρονα, μαζί με τις περιβαλλοντικές συνθήκες καθορίστηκε και η θερμοκρασία νερού προσαγωγής από το δίκτυο να αντιστοιχεί σε αυτή της Αθήνας. Εφόσον ορίστηκαν οι περιβαλλοντικές συνθήκες, καθορίστηκε ένα ηλιοθερμικό σύστημα το οποίο αποσκοπούσε στη θέρμανση νερού οικιακής χρήσης και αποτελούνταν από:

- Ηλιακό συλλέκτη
- Θερμοδοχείο

Ακολούθως, υπολογίστηκε ο βαθμός απόδοσης και το ποσοστό f των θερμικών αναγκών για τους επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες. Αρχικά μέσω του προγράμματος εισήχθησαν στις παραμέτρους του ηλιακού συλλέκτη του συστήματος, ανά περίπτωση, η επιφάνεια και τα τεχνικά χαρακτηριστικά που παρουσιάζονται στους Πίνακες 2÷6. Στη συνέχεια, καθορίστηκε ο όγκος του θερμοδοχείου με βάση την αναλογία 75lt για 1 m² επιφάνειας συλλέκτη. Έτσι, για τους απλούς ηλιακούς συλλέκτες προέκυψαν οι παρακάτω όγκοι θερμοδοχείου.

Πίνακας 7: Όγκος θερμοδοχείου για κάθε απλό ηλιακό συλλέκτη.

ST	Name	V _{th} (lt)
1.	Dedalos 1.7	130
2.	Phaethon SA170	130
3.	C2000D12c	160
4.	FLATINMASTER 2000	150

Στην περίπτωση του συλλέκτη C2000D12c, ο όγκος του θερμοδοχείου ήταν καθορισμένος από τη βάση δεδομένων καθώς αποτελούσε μέρος ενός πιστοποιημένου ηλιοθερμικού συστήματος. Ο όγκος θερμοδοχείου παρέμεινε ίδιος για την περίπτωση των PVT συλλεκτών.

Εφόσον εισήχθησαν στο πρόγραμμα προσομοίωσης όλα τα παραπάνω απαραίτητα στοιχεία, λήφθηκαν τα απαραίτητα δεδομένα για τον υπολογισμό τόσο του μέσου μηνιαίου βαθμού απόδοσης του εκάστοτε συλλέκτη όσο και του ποσοστού κάλυψης f της απαιτούμενης θερμικής ενέργειας που μπορεί να καλύψει ο συλλέκτης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται αναλυτικά στους πίνακες που βρίσκονται στο **Παράρτημα (Πίνακας 9 ÷ 22)** και συγκεκριμένα, αρχικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τους επίπεδους συλλέκτες και στη συνέχεια τα αποτελέσματα των PVT συλλεκτών τόσο για την κανονική επιφάνεια (βάσει τεχνικών χαρακτηριστικών) όσο και για τη διπλάσια επιφάνεια.

Στους **Πίνακες 9 ÷ 22**, παρουσιάζονται όλα τα απαραίτητα αποτελέσματα που εξήχθησαν από το πρόγραμμα προσομοίωσης με σκοπό τη σύγκριση μεταξύ των επίπεδων ηλιακών συλλεκτών και των PVT συλλεκτών. Η βάση δεδομένων απ' όπου αντλήθηκαν τα τεχνικά χαρακτηριστικά των συλλεκτών (Solar Keymark), μέσω των εγγράφων πιστοποίησης, συμπεριλαμβάνει διαφόρων ειδών και αποδόσεων συλλέκτες και όχι μόνο αποδοτικούς. Παράδειγμα σε αυτό αποτελεί ο PVT συλλέκτης No4 (SOLINK PVT), όπου παρατηρώντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση (**Πίνακας 19 & Πίνακας 20**) συμπεραίνεται ότι δεν είναι καθόλου αποδοτικός και γι' αυτό το λόγο δεν θα επεκταθεί σε περαιτέρω σύγκριση με τον επίπεδο ηλιακό συλλέκτη No4.

Όσον αφορά τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στους πίνακες που προαναφέρθηκαν, αυτά περιλαμβάνουν τις απώλειες του εκάστοτε συστήματος (θερμικές, σωληνώσεων), την ωφέλιμη θερμική ενέργεια για την παραγωγή ζεστού νερού οικιακής χρήσης καθώς επίσης και το ποσοστό κάλυψης f της απαιτούμενης θερμικής ενέργειας. Οι θερμικές απώλειες που προκύπτουν, χαρακτηρίζονται από τον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας, ο οποίος αποτελείται από τους συντελεστές α_1 και α_2 και περιγράφει το ποσό εκείνο της θερμότητας που διαφεύγει στο περιβάλλον ανά m^2 επιφάνειας συλλέκτη και θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ της θερμοκρασίας του συλλέκτη και του περιβάλλοντος. Το ποσοστό κάλυψης f της

απαιτούμενης θερμικής ενέργειας, σύμφωνα με το εγχειρίδιο χρήσης του προγράμματος, προκύπτει ως:

$$f = \frac{E_{Th}}{E_{Thtotal}} \quad (20)$$

Όπου:

- E_{Th} , η θερμική ενέργεια που παρέχεται στο θερμοδοχείο από το σύστημα
- $E_{Thtotal}$, η συνολική θερμική ενέργεια που παρέχεται στο θερμοδοχείο από το σύστημα και τη βοηθητική θέρμανση

4.2 Υπολογισμός μηνιαίας απόδοσης συλλεκτών και ποσοστού κάλυψης f

Ο μέσος μηνιαίος βαθμός απόδοσης του κάθε συλλέκτη για όλους τους μήνες, υπολογίστηκε από την εξίσωση:

$$\eta_{sc} = \frac{E}{\underline{H}_T \cdot A_c} \quad (20)$$

όπου:

- η_{sc} , ο μηνιαίος βαθμός απόδοσης
- E , η παραγόμενη θερμική ενέργεια για θέρμανση νερού οικιακής χρήσης
- A_c , η επιφάνεια του συλλέκτη
- \underline{H}_T , η ηλιακή ακτινοβολία ανά m^2 επιφάνειας συλλέκτη

Για την εφαρμογή της μεθόδου καμπυλών f , είναι απαραίτητα ορισμένα δεδομένα (αναφέρονται στο κεφάλαιο 3.2). Τα δεδομένα αυτά, πέρα από τα τεχνικά χαρακτηριστικά των συλλεκτών και τις εκάστοτε περιβαλλοντικές συνθήκες, αφορούν επίσης τη μέση θερμοκρασία του κρύου νερού προσαγωγής από το δίκτυο, τη μέση θερμοκρασία του κρύου νερού προσαγωγής από το δίκτυο, τη μέση ημερήσια κατανάλωση ζεστού νερού, την ειδική θερμοχωρητικότητα του νερού, την πυκνότητα του νερού, τον όγκο του θερμοδοχείου καθώς επίσης και την επιθυμητή θερμοκρασία του νερού.

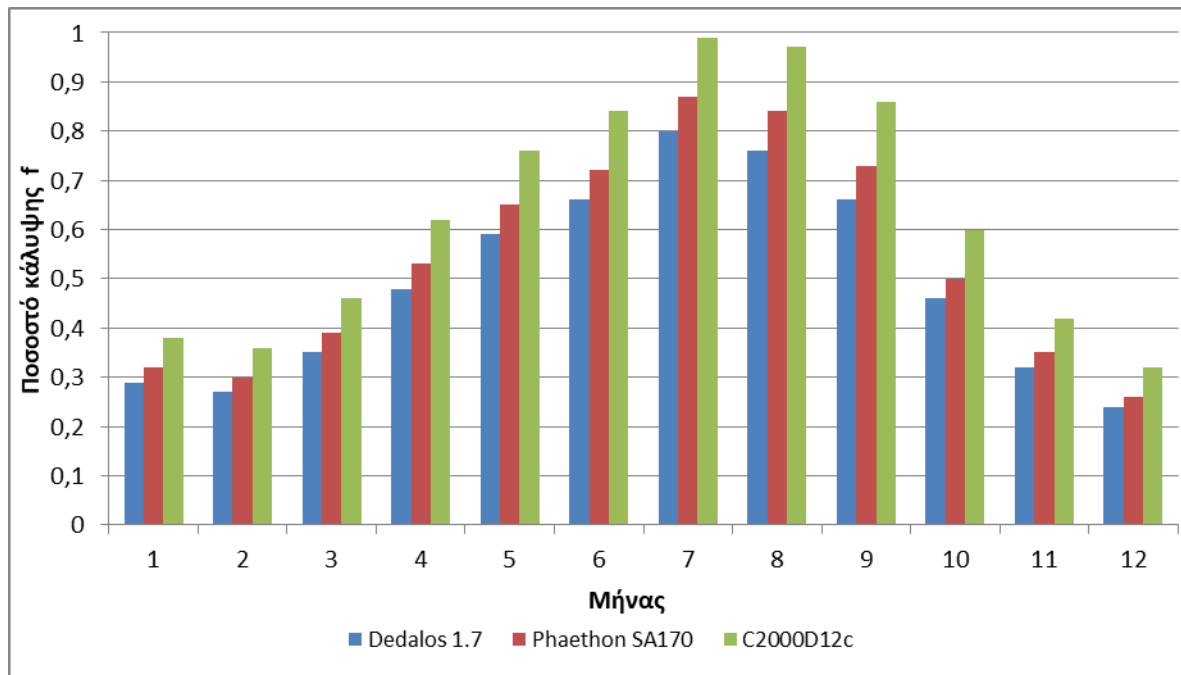
Πίνακας 8: Δεδομένα μεθόδου καμπυλών f.

Ημερήσια κατανάλωση ζεστού νερού	100 lt/ημέρα
Ειδική θερμοχωρητικότητα νερού, C_p	4179 Joule/kg °C
Πυκνότητα νερού, ρ_w	970 kg/m ³
Επιθυμητή θερμοκρασία νερού, t_w	50 °C

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν τόσο μέσω του προγράμματος (όσον αφορά το ποσοστό κάλυψης f) όσο και από την εφαρμογή της μεθόδου καμπυλών f όπως επίσης και η μηνιαία απόδοση των συλλεκτών, παρουσιάζονται, συγκριτικά για κάθε περίπτωση, στα ακόλουθα διαγράμματα.

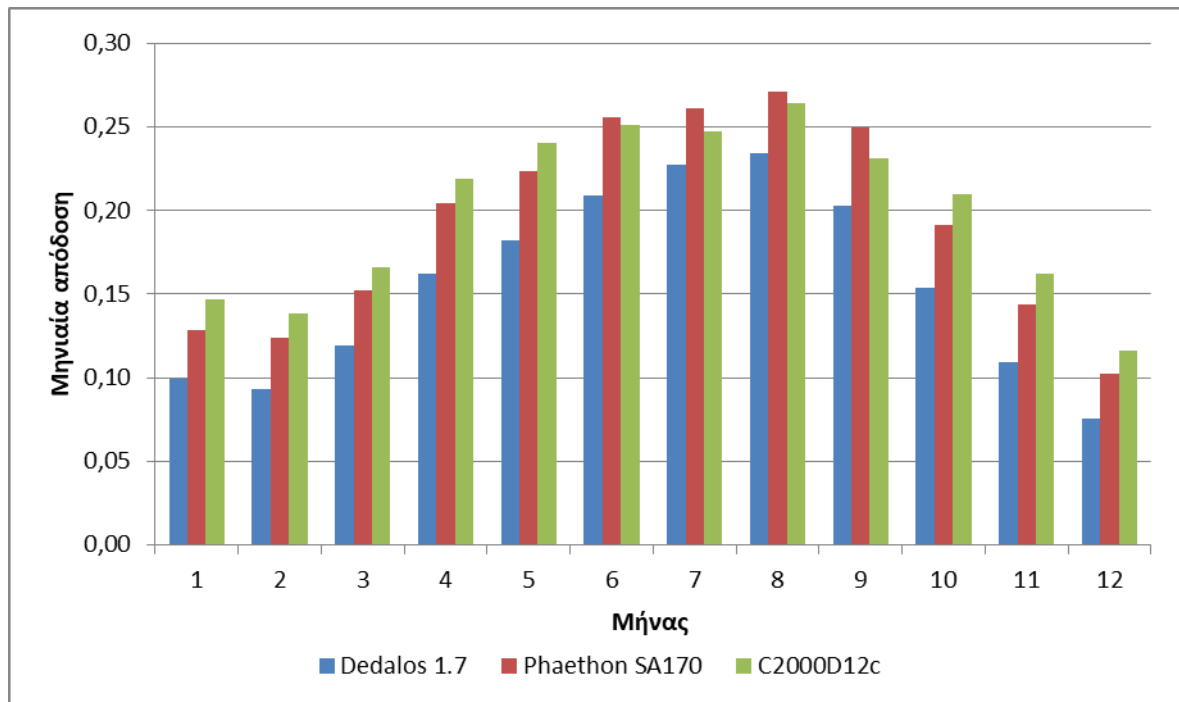
4.3 Σύγκριση θερμικής απόδοσης επίπεδων ηλιακών συλλεκτών και PVT συλλεκτών

Με βάση τα τεχνικά χαρακτηριστικά τόσο των επίπεδων ηλιακών συλλεκτών (Πίνακας 6) όσο και των PVT συλλεκτών (Πίνακας 3 & Πίνακας 4), όπως παρατηρείται από τα Σχήματα 28÷31, το ποσοστό κάλυψης f αλλά και η μηνιαία απόδοση του εκάστοτε συλλέκτη διαφοροποιείται.



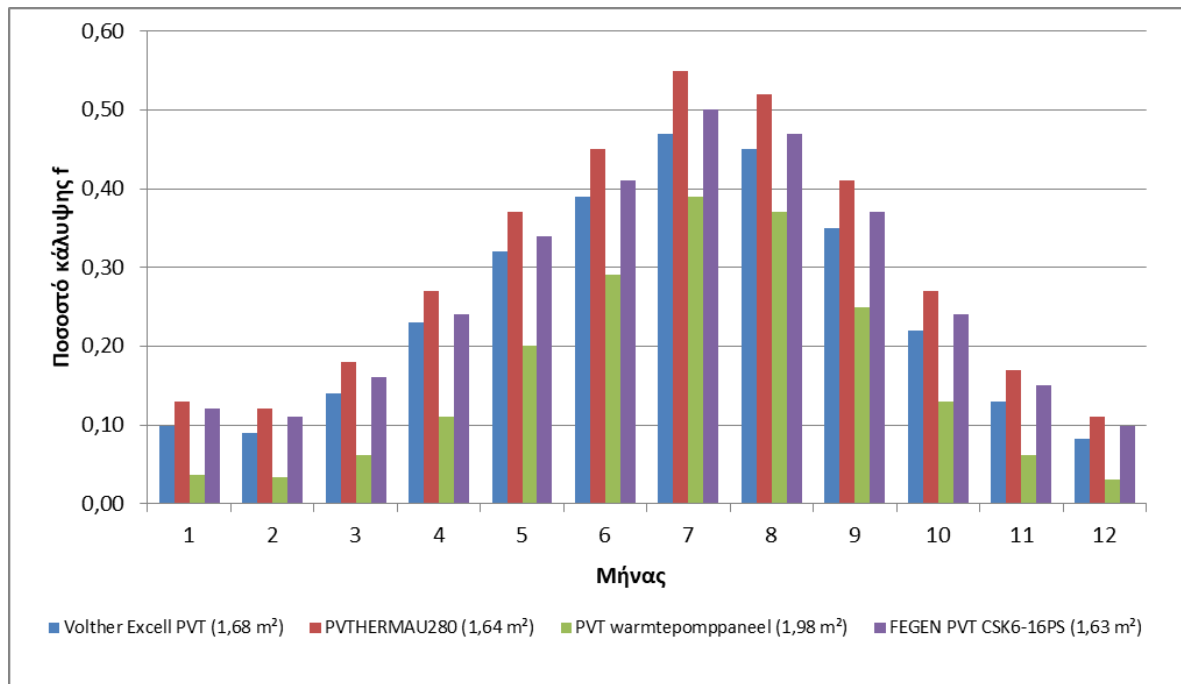
Σχήμα 28. Συγκριτικό διάγραμμα ποσοστού κάλυψης f για τους επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες.

Από το **Σχήμα 28**, παρατηρείται ότι το ποσοστό κάλυψης f διαφοροποιείται για κάθε επίπεδο ηλιακό συλλέκτη λόγω των διαφορετικών τεχνικών χαρακτηριστικών του καθενός. Πιο αναλυτικά, παρατηρείται ότι ο επίπεδος ηλιακός συλλέκτης Νο3, παρουσιάζει υψηλότερο ποσοστό κάλυψης f συγκριτικά με τους υπόλοιπους ηλιακούς συλλέκτες της τάξεως του $6\% \div 21\%$.



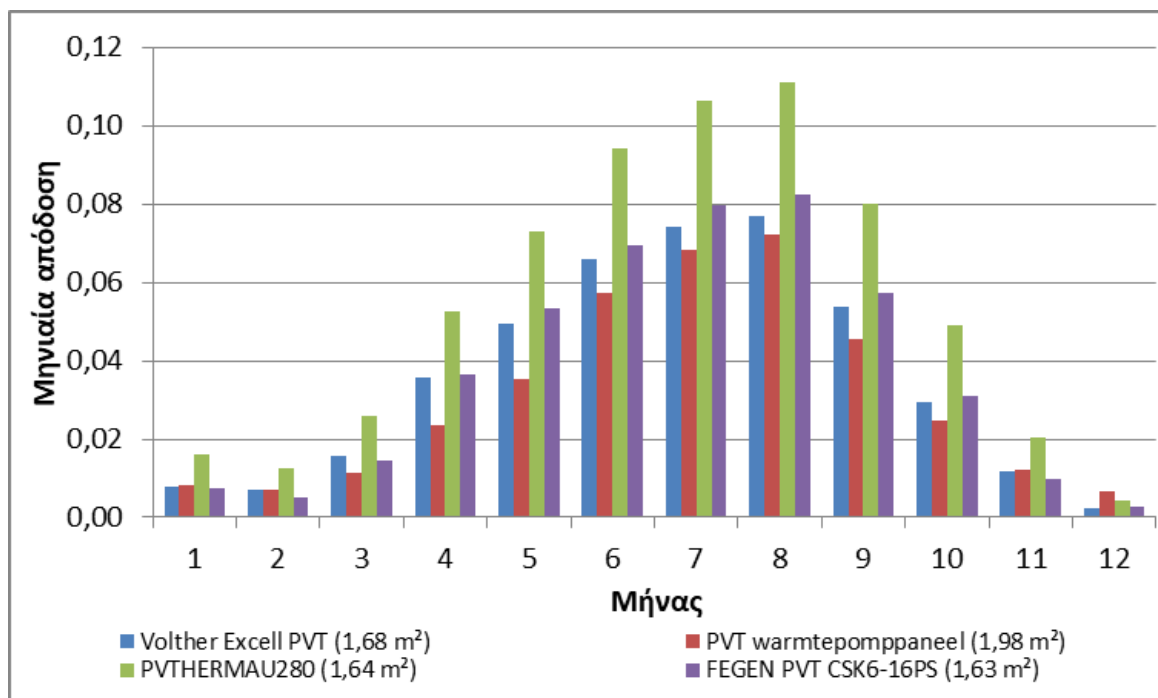
Σχήμα 29. Συγκριτικό διάγραμμα μηνιαίας απόδοσης επίπεδων ηλιακών συλλεκτών.

Σύμφωνα με το **Σχήμα 29**, η μηνιαία απόδοση των επίπεδων ηλιακών συλλεκτών διαφοροποιείται ανάλογα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κάθε ηλιακού συλλέκτη. Πιο αναλυτικά, ο επίπεδος ηλιακός συλλέκτης No3 (C2000D12c) παρουσιάζει υψηλότερη μηνιαία απόδοση συγκριτικά με τους υπόλοιπους της τάξεως του 2%÷6% με εξαίρεση τους μήνες Ιούνιο και Ιούλιο, όπου υψηλότερη μηνιαία απόδοση παρουσιάζει ο συλλέκτης No2 (Phaethon SA170).



Σχήμα 30. Συγκριτικό διάγραμμα ποσοστού κάλυψης f PVT συλλεκτών.

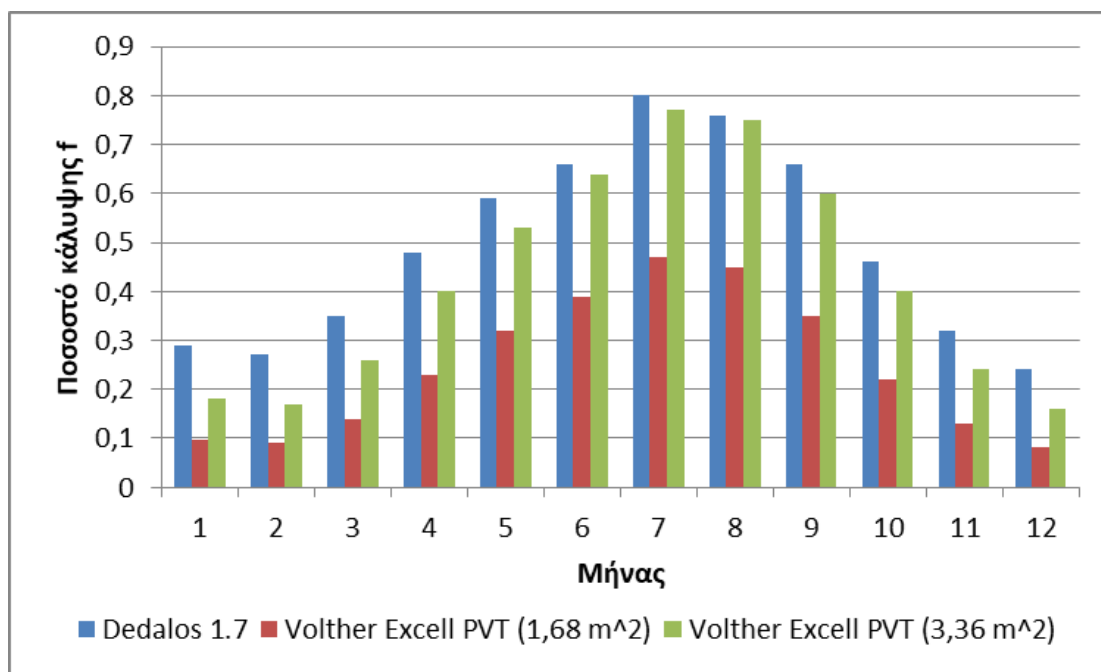
Όπως παρουσιάζεται στο **Σχήμα 30**, το ποσοστό κάλυψης f διαφοροποιείται ανάλογα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κάθε PVT συλλέκτη. Πιο αναλυτικά, ο PVT συλλέκτης No2 (PV THERMAU280) παρουσιάζει υψηλότερο ποσοστό κάλυψης f συγκριτικά με τους υπόλοιπους PVT συλλέκτες της τάξεως του 1% ÷ 17%.



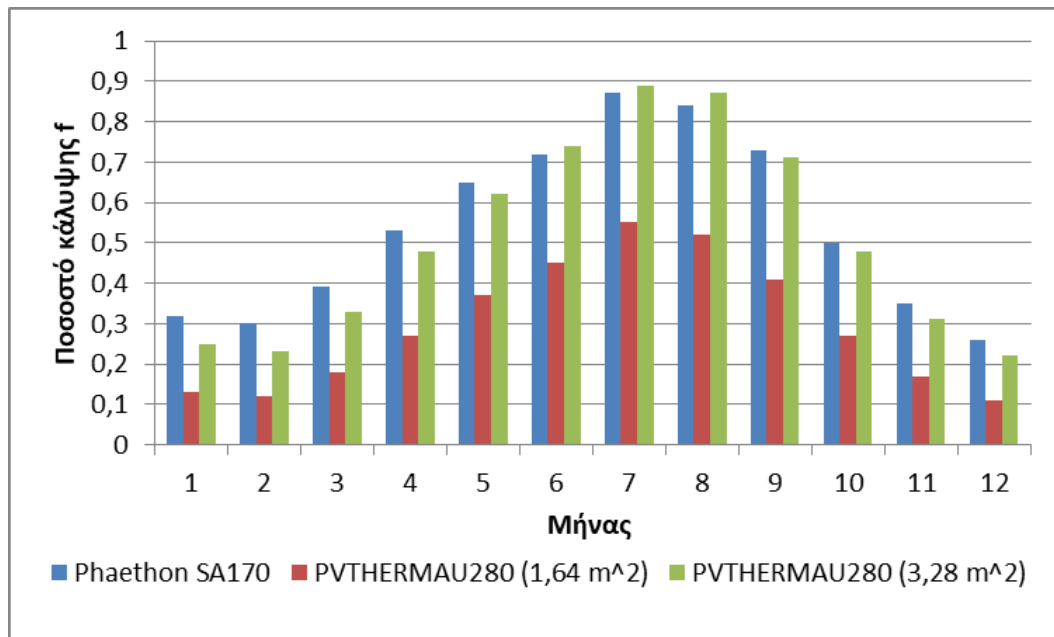
Σχήμα 31. Συγκριτικό διάγραμμα μηνιαίας απόδοσης PVT συλλεκτών.

Σύμφωνα με το Σχήμα 31, παρατηρείται ότι εκτός από το ποσοστό κάλυψης f διαφοροποιείται και η μηνιαία απόδοση των PVT συλλεκτών για τους λόγους που προαναφέρθηκαν. Αναλυτικότερα, ο PVT συλλέκτης No2 (PVThermaU280) παρουσιάζει υψηλότερη μηνιαία απόδοση συγκριτικά με τους υπόλοιπους PVT συλλέκτες της τάξεως του $1\% \div 4\%$, με εξαίρεση το μήνα Δεκέμβριο.

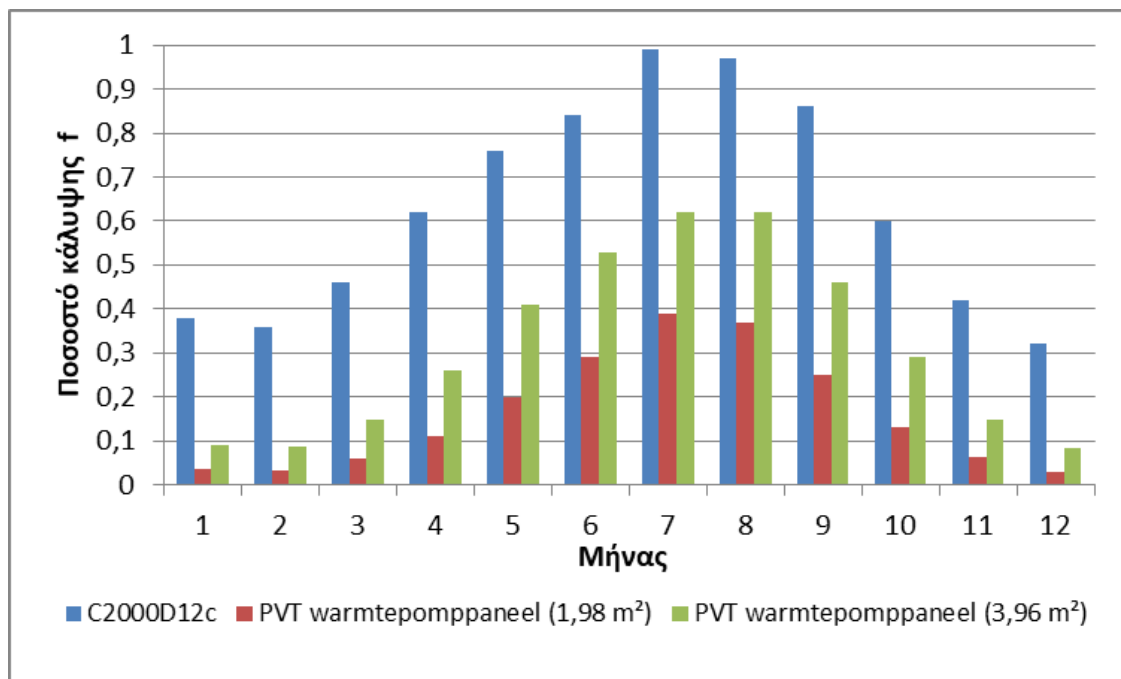
4.4 Αποτελέσματα μεθόδου καμπυλών f (προγράμματος)



Σχήμα 32. Διάγραμμα ποσοστού κάλυψης f συναρτήσει των μηνών για την 1η περίπτωση (προγράμματος).



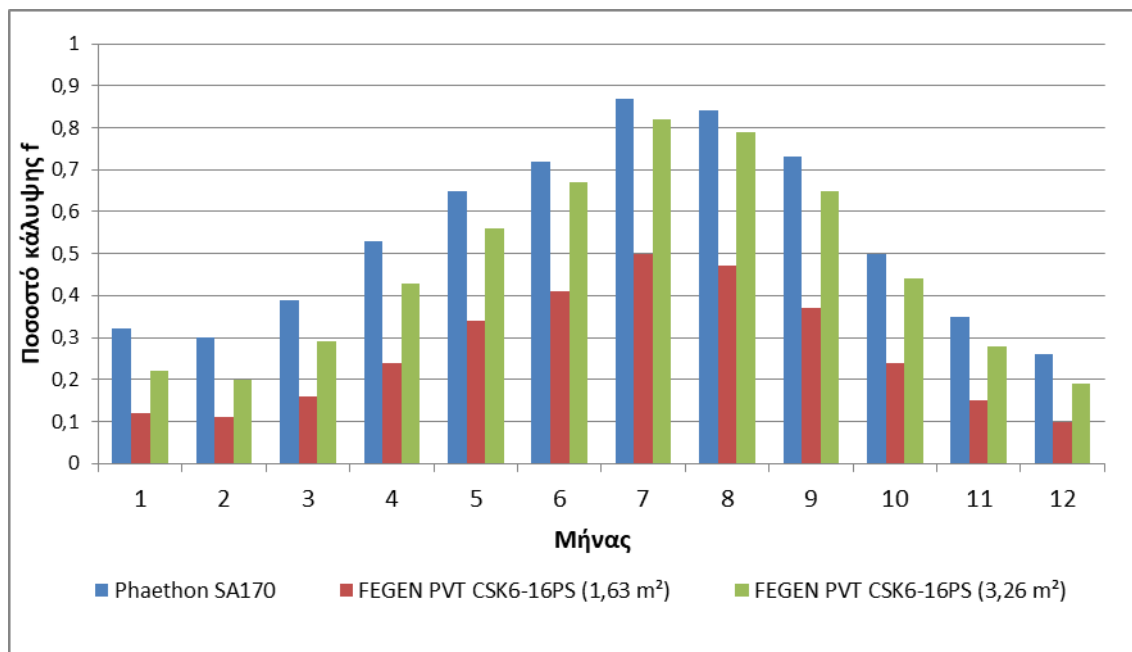
Σχήμα 33. Διάγραμμα ποσοστού κάλυψης f συναρτήσει των μηνών για την 2η περίπτωση (προγράμματος).



Σχήμα 34. Διάγραμμα ποσοστού κάλυψης f συναρτήσει των μηνών για την 3η περίπτωση (προγράμματος).

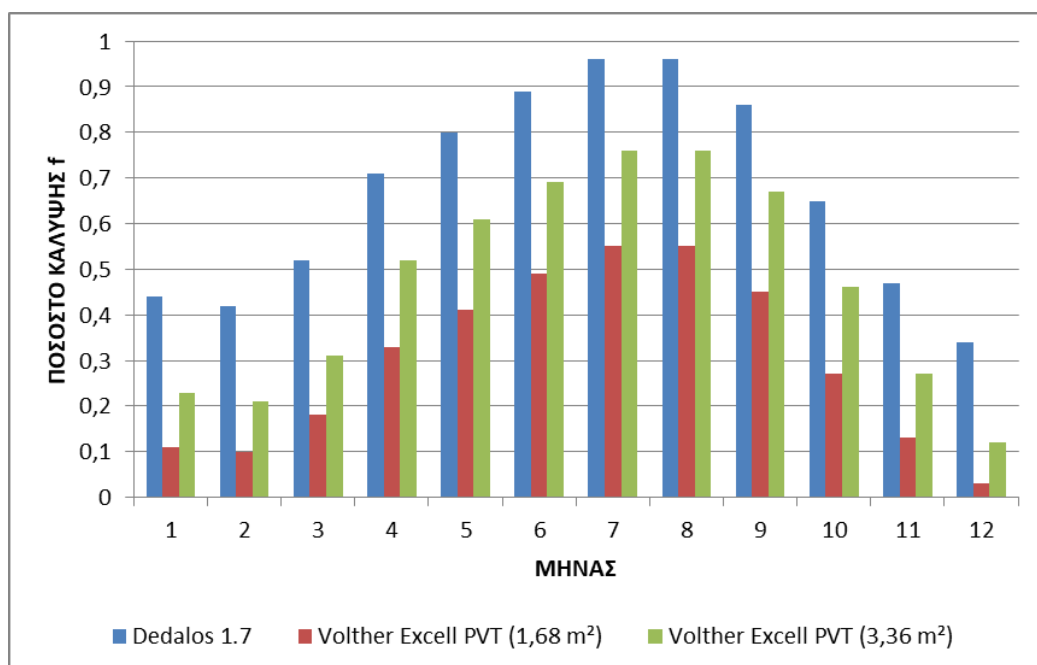
Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η περίπτωση του PVT συλλέκτη Νο4 (SOLINK PVT) δεν εξετάστηκε περαιτέρω λόγω του χαμηλού οπτικού βαθμού απόδοσης και του υψηλού συντελεστή θερμικών απωλειών. Επομένως, η επόμενη περίπτωση σύγκρισης περιλαμβάνει τον PVT συλλέκτη μιας ελληνικής εταιρείας (FEGEN PVT CSK6-16PS) ο οποίος θα συγκριθεί με τον επίπεδο ηλιακό συλλέκτη Phaethon

SA170, με τον οποίο έχουν περίπου την ίδια επιφάνεια ($1,63 \text{ m}^2$ και $1,65 \text{ m}^2$ αντίστοιχα).

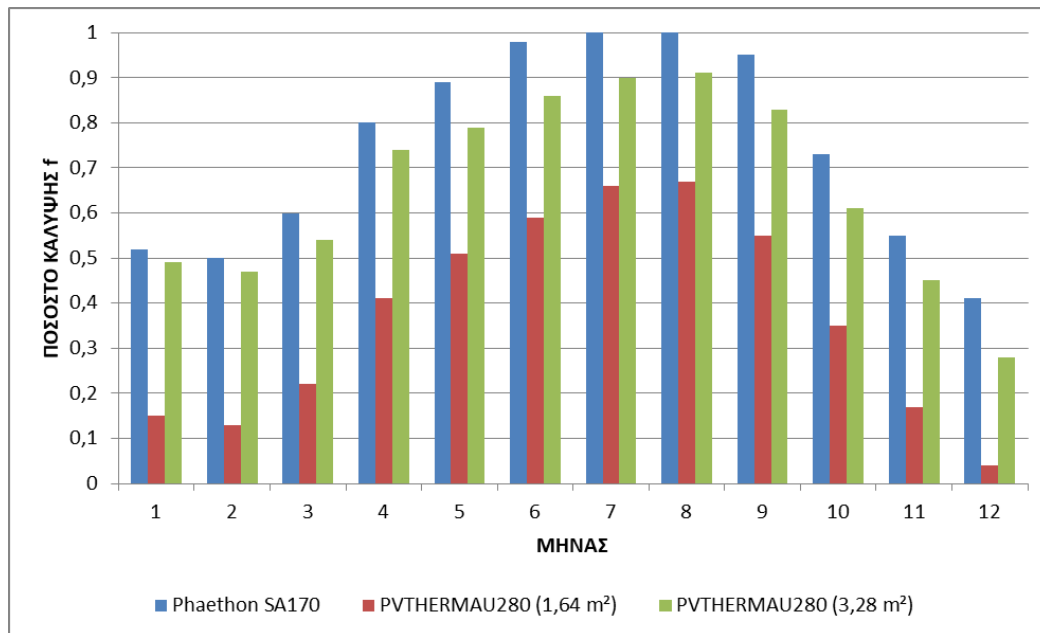


Σχήμα 35. Διάγραμμα ποσοστού κάλυψης f συναρτήσει των μηνών για την καινούργια περίπτωση (προγράμματος).

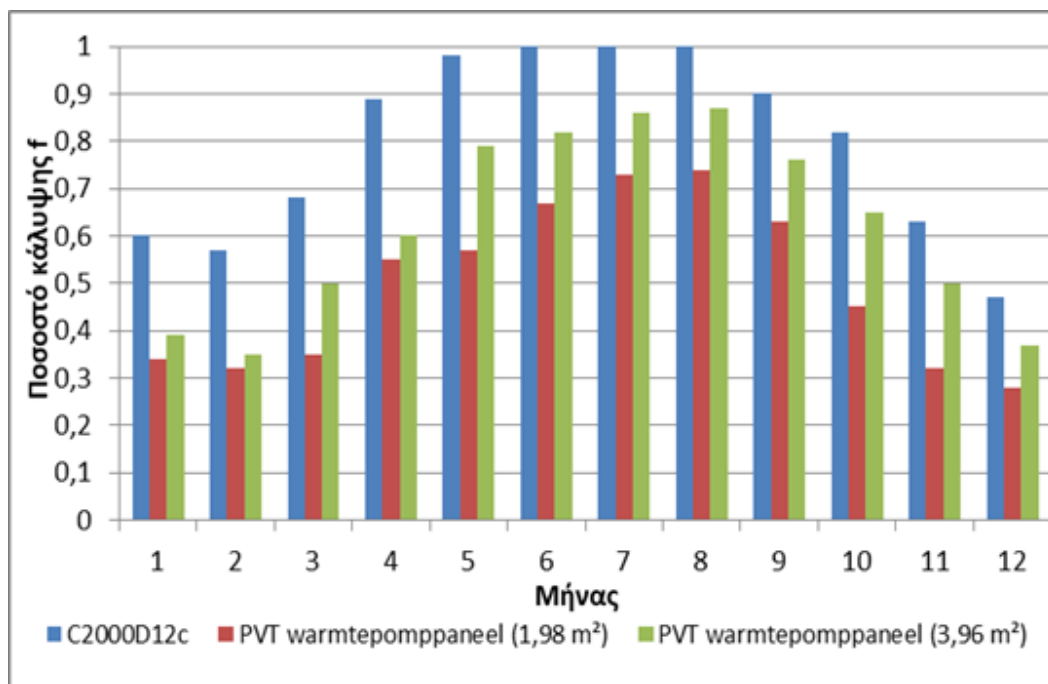
4.5 Αποτελέσματα εφαρμογής μεθόδου καμπυλών f



Σχήμα 36. Διάγραμμα ποσοστού κάλυψης f συναρτήσει των μηνών για την 1η περίπτωση.



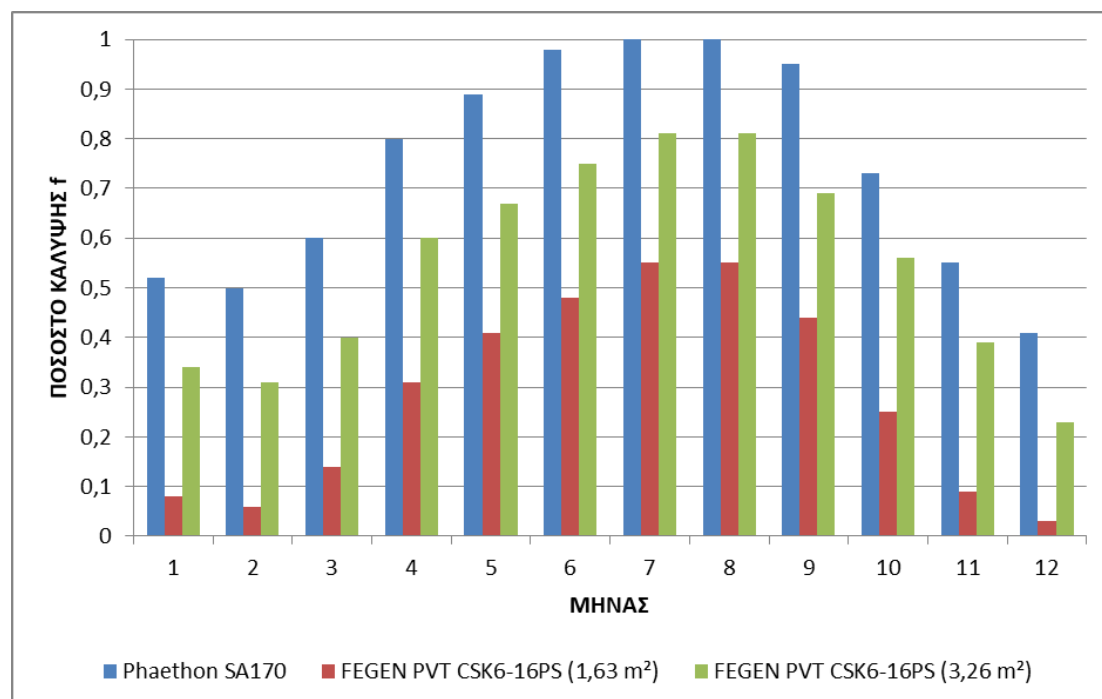
Σχήμα 37. Διάγραμμα ποσοστού κάλυψης f συναρτήσει των μηνών για την 2η περίπτωση.



Σχήμα 38. Διάγραμμα ποσοστού κάλυψης f συναρτήσει των μηνών για την 3η περίπτωση.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η περίπτωση του PVT συλλέκτη Νο4 (SOLINK PVT) δεν εξετάστηκε περαιτέρω λόγω του χαμηλού οπτικού βαθμού απόδοσης και του υψηλού συντελεστή θερμικών απωλειών. Επομένως, η επόμενη περίπτωση σύγκρισης περιλαμβάνει τον PVT συλλέκτη μιας ελληνικής εταιρείας (FEGEN PVT CSK6-16PS) ο οποίος θα συγκριθεί με τον επίπεδο ηλιακό συλλέκτη Phaethon

SA170, με τον οποίο έχουν περίπου την ίδια επιφάνεια (1,63 m² και 1,65 m² αντίστοιχα).



Σχήμα 39. Διάγραμμα ποσοστού κάλυψης f συναρτήσει των μηνών για την καινούργια περίπτωση.

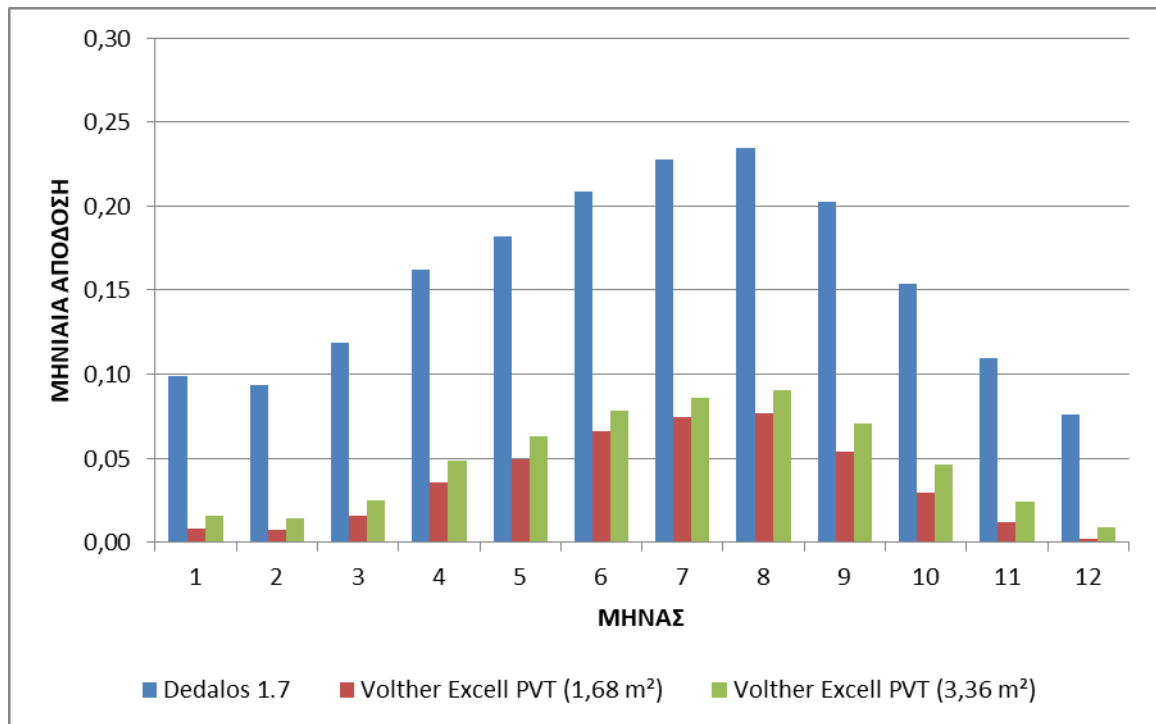
Όπως παρατηρείται στους Πίνακες 9÷22 όπως επίσης και στα Σχήματα 28÷31, τα αποτελέσματα του ποσοστού κάλυψης f που προέκυψαν από την προσομοίωση μέσω του προγράμματος διαφέρουν συγκριτικά με αυτά που υπολογίστηκαν με την εφαρμογή της μεθόδου καμπυλών f (Σχήμα 32 ÷ Σχήμα 35). Η διαφορά αυτή προκύπτει από τον διαφορετικό τρόπο υπολογισμού του ποσοστού κάλυψης f μέσω του προγράμματος συγκριτικά με τη μέθοδο καμπυλών f και είναι της τάξεως του . Πιο συγκεκριμένα, η εφαρμογή της μεθόδου καμπυλών f δεν λαμβάνει υπόψη όλες τις απώλειες που υπάρχουν στο σύστημα σε αντίθεση με το πρόγραμμα προσομοίωσης. Για τον λόγο αυτό, τα αποτελέσματα του ποσοστού κάλυψης f που προέκυψαν μέσω του προγράμματος είναι μικρότερα συγκριτικά με τα αποτελέσματα που προέκυψαν με την εφαρμογή της μεθόδου καμπυλών f. Τα αποτελέσματα μπορεί να διαφέρουν, ωστόσο αυτή η διαφορά που προκύπτει δεν είναι μεγάλη με εξαίρεση ορισμένες περιπτώσεις. Η σύγκριση στην παρούσα διπλωματική πραγματοποιείται με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθόδου καμπυλών f, όπως αυτή αναφέρεται στο **Κεφάλαιο 3.2**.

Από τα παραπάνω διαγράμματα που αφορούν την εφαρμογή της μεθόδου καμπυλών f (Σχήμα 31 ÷ Σχήμα 35), παρατηρείται ότι οι επίπεδοι ηλιακού

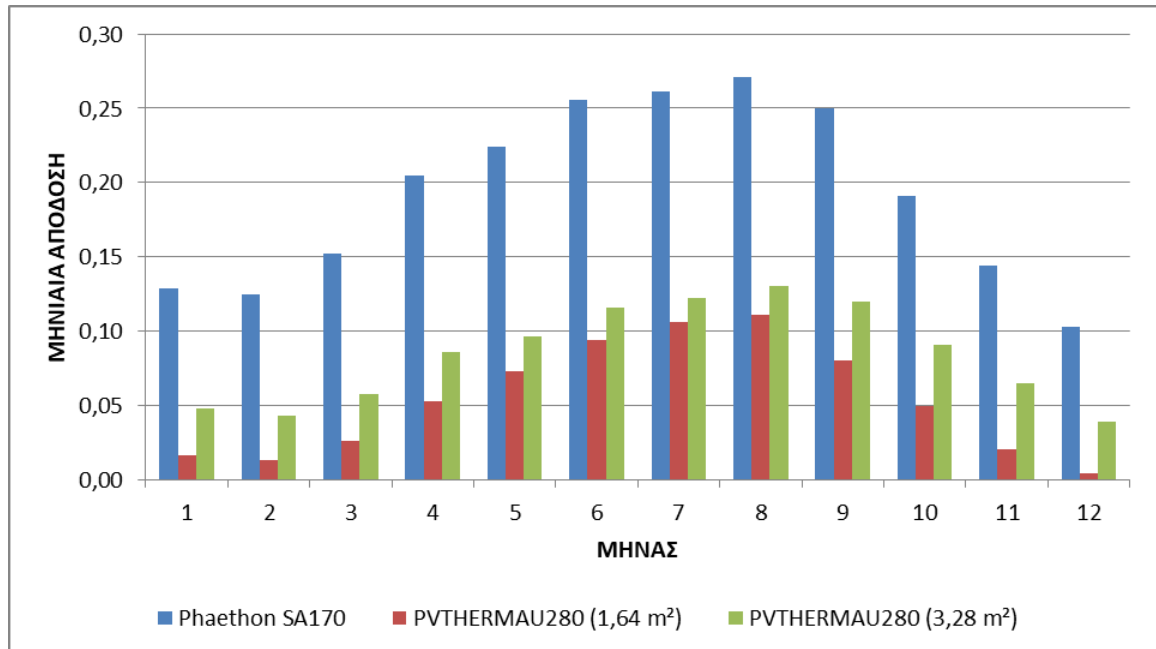
συλλέκτες, χαρακτηρίζονται από υψηλότερο ποσοστό κάλυψης f συγκριτικά με έναν PVT συλλέκτη παρόμοιας ή ίδιας επιφάνειας. Στην περίπτωση όπου ο PVT συλλέκτης έχει διπλάσια επιφάνεια από τον επίπεδο ηλιακό συλλέκτη, παρατηρείται αύξηση του ποσοστού f (για τον PVT συλλέκτη) σε σημείο όπου εκείνο να πλησιάζει την τιμή του επίπεδου ηλιακού συλλέκτη ή ακόμη και να είναι ίσα σε ορισμένους μήνες, χωρίς ωστόσο να το ξεπερνάει.

Πιο αναλυτικά, παρατηρείται ότι ο επίπεδος ηλιακός συλλέκτης συγκριτικά με τον PVT συλλέκτη ίδιας ή παρόμοιας επιφάνειας παρουσιάζει υψηλότερο ποσοστό κάλυψης f καθόλη τη διάρκεια του έτους. Συγκεκριμένα, παρατηρείται τεράστια διαφορά ακόμη και τριπλάσιο ποσοστό κάλυψης f για τον επίπεδο ηλιακό συλλέκτη, ενώ αυτή η διαφορά μειώνεται κατά τους θερινούς μήνες όπου η ηλιακή ακτινοβολία είναι μεγαλύτερη. Η μείωση αυτή ωστόσο δεν είναι σημαντική καθώς ακόμα και τότε, ο επίπεδος ηλιακός συλλέκτης παρουσιάζει διπλάσιο ποσοστό κάλυψης f συγκριτικά με τον PVT συλλέκτη. Όσον αφορά το ποσοστό κάλυψης f του επίπεδου ηλιακού συλλέκτη συγκριτικά με τον PVT συλλέκτη διπλάσιας επιφάνειας, παρατηρείται ότι το ποσοστό κάλυψης f αυξάνεται σημαντικά, σε σημείο που η τιμή του να πλησιάζει εκείνη του επίπεδου ηλιακού συλλέκτη ή ακόμα και να γίνονται ίσες (**Σχήμα 30**). Σε αυτή την περίπτωση, μεγαλύτερη αύξηση του ποσοστού κάλυψης f (για τον PVT συλλέκτη διπλάσιας επιφάνειας) παρατηρείται κατά τους θερινούς μήνες, όπου η ηλιακή ακτινοβολία είναι υψηλότερη.

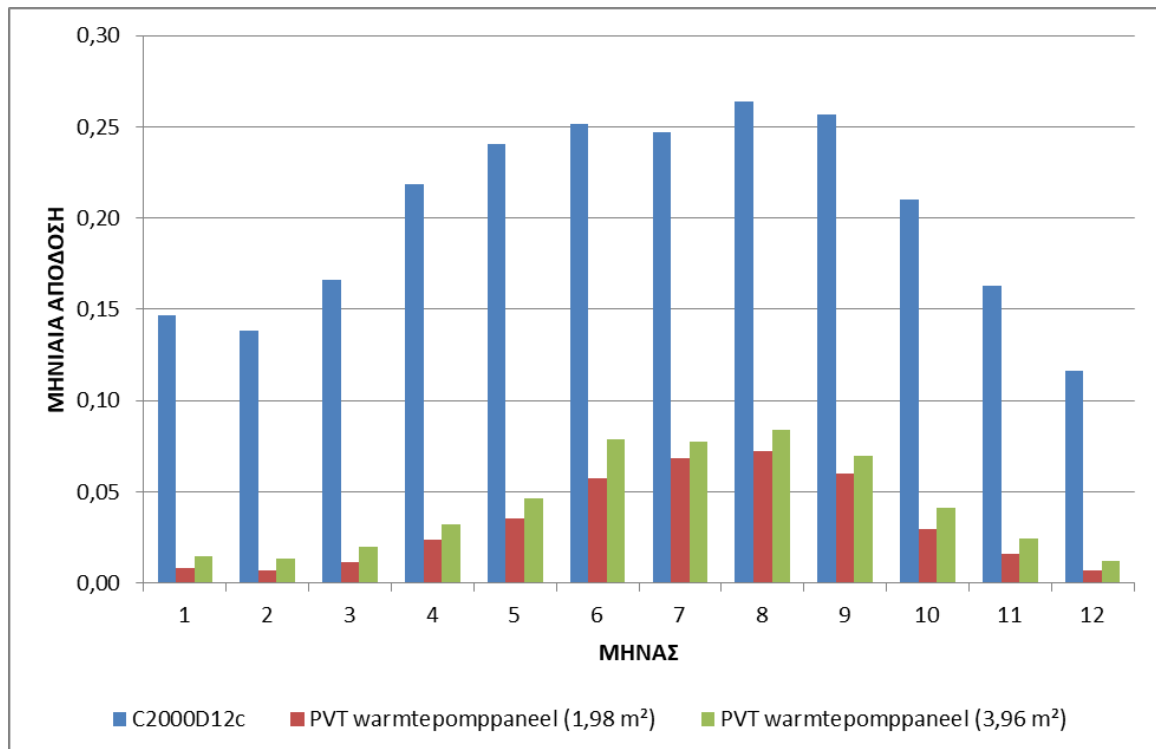
4.6 Αποτελέσματα μηνιαίας απόδοσης



Σχήμα 40. Διάγραμμα μηνιαίας απόδοσης συναρτήσει των μηνών για την 1η περίπτωση.

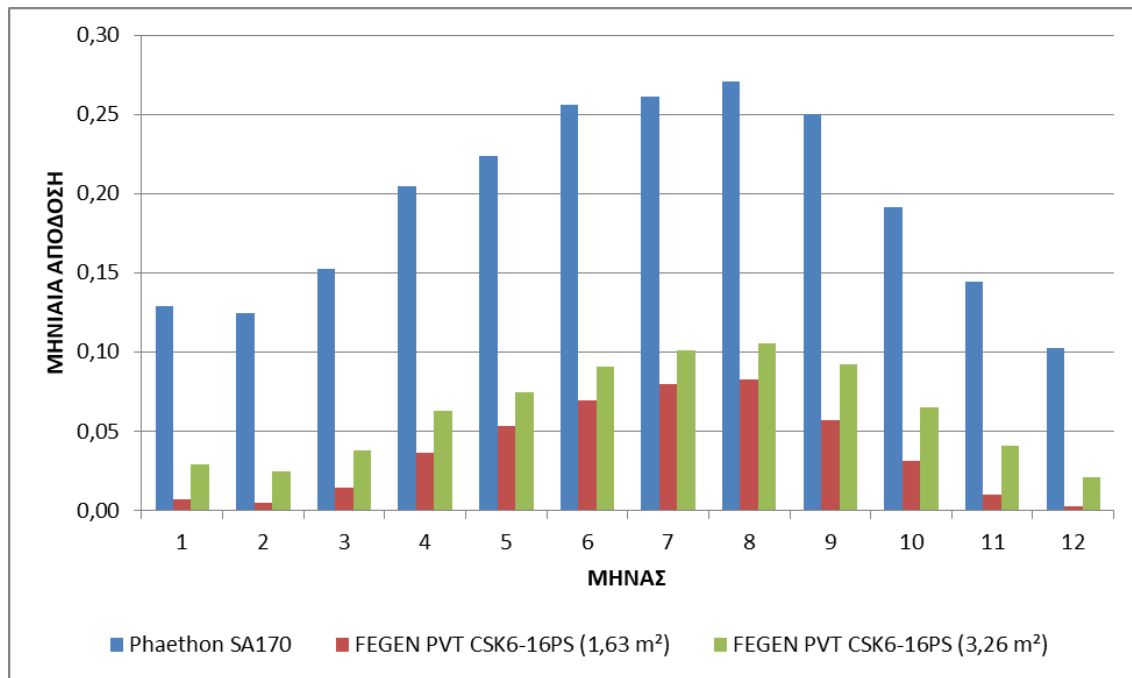


Σχήμα 41. Διάγραμμα μηνιαίας απόδοσης συναρτήσει των μηνών για την 2η περίπτωση.



Σχήμα 42. Διάγραμμα μηνιαίας απόδοσης συναρτήσεως των μηνών για την 3η περίπτωση.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η περίπτωση του PVT συλλέκτη Νο4 (SOLINK PVT) δεν εξετάστηκε περαιτέρω λόγω του χαμηλού οπτικού βαθμού απόδοσης και του υψηλού συντελεστή θερμικών απωλειών. Επομένως, η επόμενη περίπτωση σύγκρισης περιλαμβάνει τον PVT συλλέκτη μιας ελληνικής εταιρείας (FEGEN PVT CSK6-16PS) ο οποίος θα συγκριθεί με τον επίπεδο ηλιακό συλλέκτη Phaethon SA170, με τον οποίο έχουν περίπου την ίδια επιφάνεια (1,63 m² και 1,65 m² αντίστοιχα).

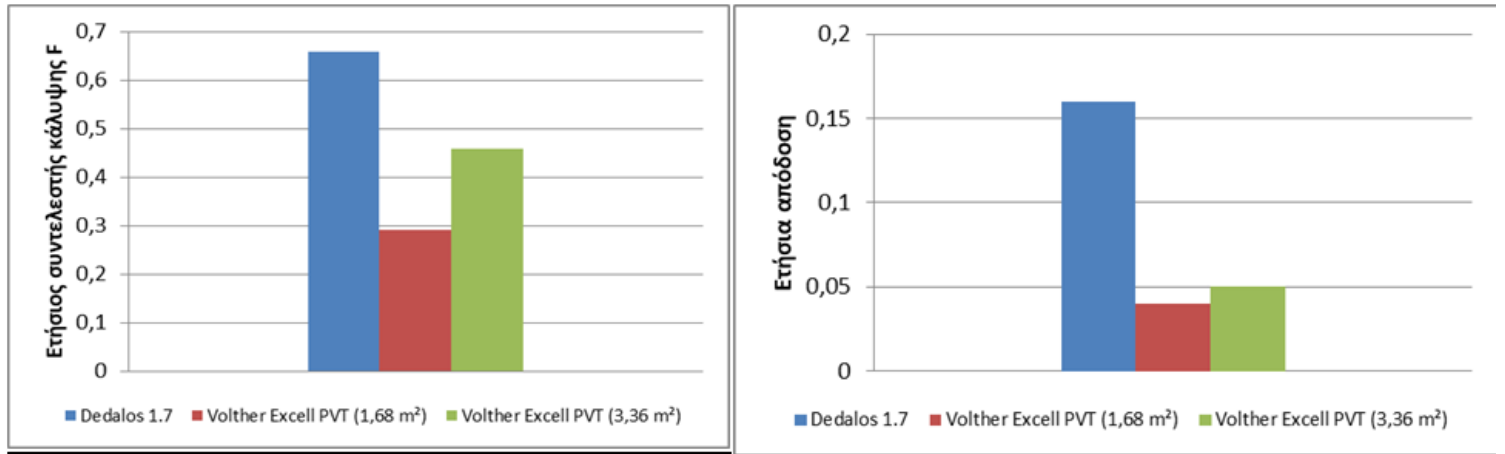


Σχήμα 43. Διάγραμμα μηνιαίας απόδοσης συναρτήσεως των μηνών για την καινούργια περίπτωση.

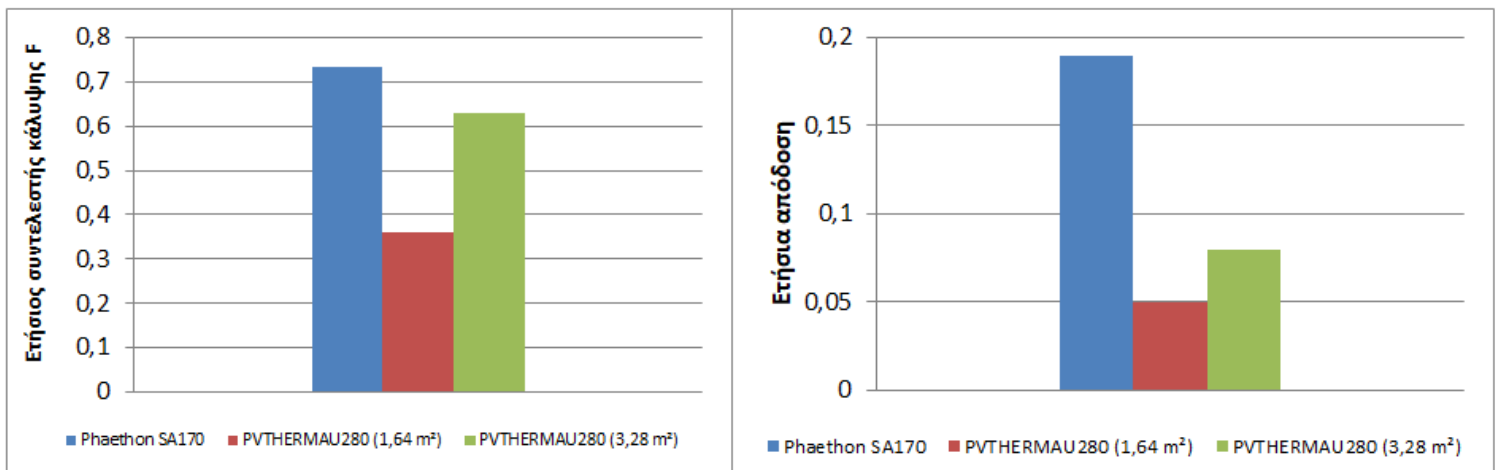
Στα παραπάνω διαγράμματα, όπου περιγράφεται η μηνιαία απόδοση των συλλεκτών, παρατηρείται ότι οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες έχουν υψηλότερη απόδοση συγκριτικά με τους PVT συλλέκτες παρόμοιας επιφάνειας. Στην περίπτωση διπλασιασμού της επιφάνειας των PVT συλλεκτών, παρατηρείται μια ελάχιστη αύξηση του μηνιαίου βαθμού απόδοσης συγκριτικά με την περίπτωση της κανονικής επιφάνειας (περίπου 1% ÷ 4%), χωρίς ωστόσο να πλησιάζουν την απόδοση των επίπεδων ηλιακών συλλεκτών. Παράλληλα, είναι εύκολα αντιληπτό το γεγονός ότι η μηνιαία απόδοση των PVT συλλεκτών είναι αρκετά χαμηλότερη συγκριτικά με τους επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες, ειδικότερα τους μήνες όπου δεν υπάρχει υψηλή ηλιακή ακτινοβολία.

4.7 Αποτελέσματα ετήσιου συντελεστή κάλυψης F & ετήσια απόδοση

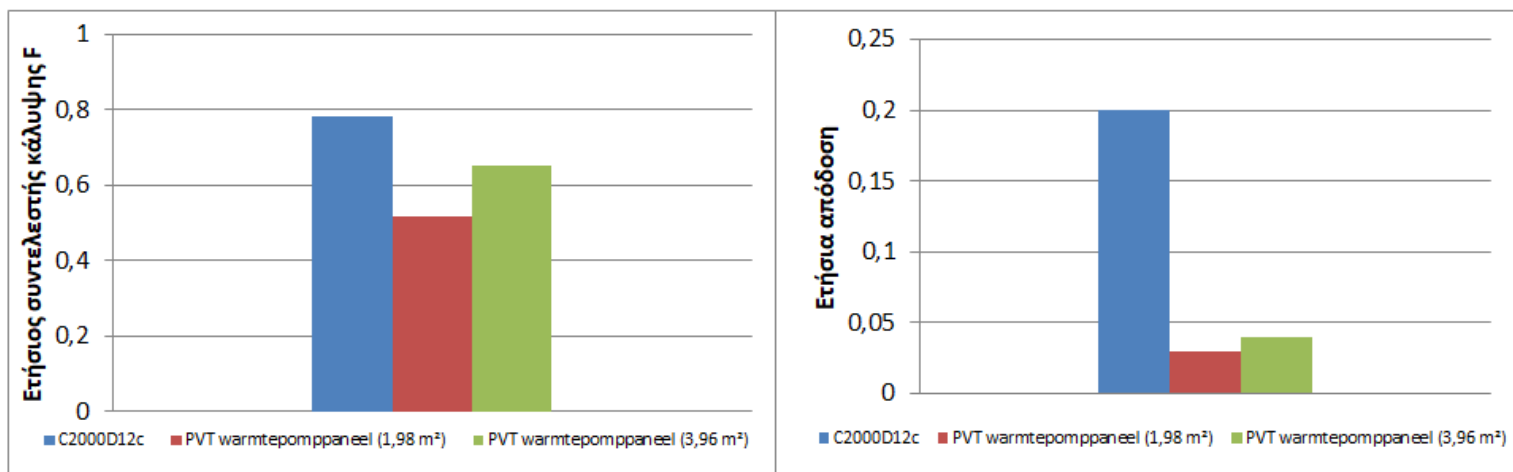
Με βάση όλα τα παραπάνω αποτελέσματα, προκύπτει τόσο ο ετήσιος συντελεστής κάλυψης F όσο και η ετήσια απόδοση του κάθε συστήματος.



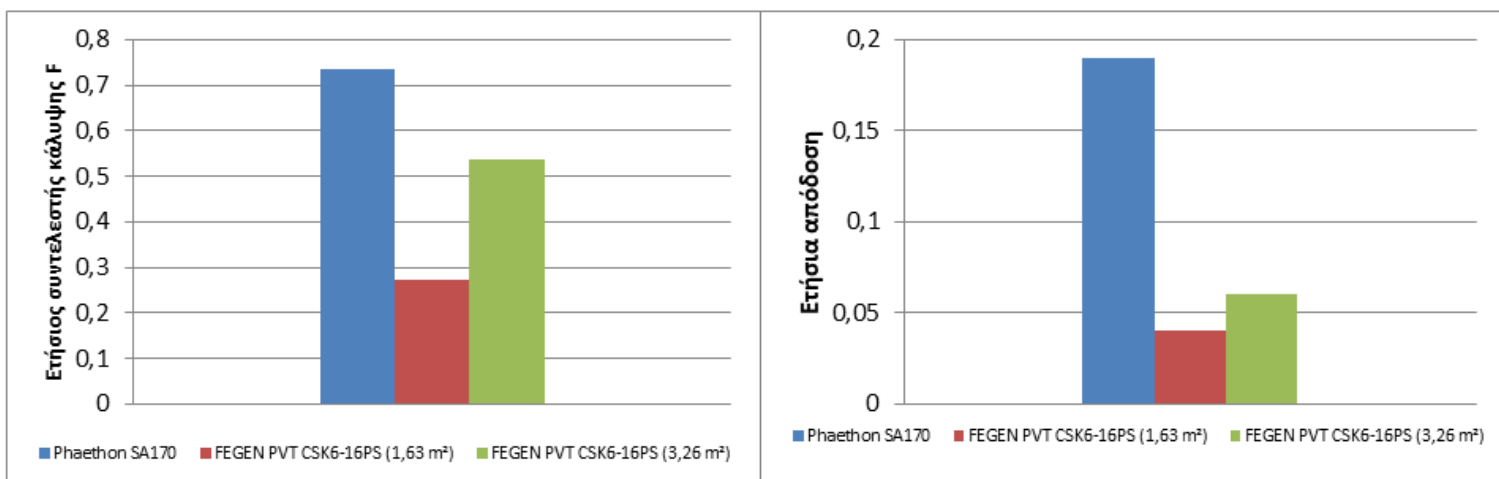
Σχήμα 44. Ετήσιος συντελεστής κάλυψης F & ετήσια απόδοση για την 1η περίπτωση σύγκρισης



Σχήμα 45. Ετήσιος συντελεστής κάλυψης F & ετήσια απόδοση για τη 2η περίπτωση σύγκρισης



Σχήμα 46. Ετήσιος συντελεστής κάλυψης F & ετήσια απόδοση για την 3η περίπτωση σύγκρισης.



Σχήμα 47. Ετήσιος συντελεστής κάλυψης F & ετήσια απόδοση για την 4η περίπτωση σύγκρισης.

Στα παραπάνω διαγράμματα όπου παρουσιάζονται οι τιμές του ετήσιου συντελεστή κάλυψης και της ετήσιας απόδοσης κάθε συλλέκτη για κάθε περίπτωση σύγκρισης, προκύπτουν τα ίδια συμπεράσματα όπως και στα Σχήματα 32-43. Πιο αναλυτικά, παρατηρείται ότι ο επίπεδος ηλιακός συλλέκτης, σε κάθε περίπτωση σύγκρισης, παρουσιάζει υψηλότερο ετήσιο συντελεστή κάλυψης και ετήσια απόδοση συγκριτικά με έναν PVT συλλέκτη ίδιας επιφάνειας. Όσον αφορά τον διπλασιασμό της επιφάνειας του PVT συλλέκτη, παρατηρείται ότι ο ετήσιος συντελεστής κάλυψης αυξάνεται πλησιάζοντας την τιμή του αντίστοιχου για τον επίπεδο ηλιακό συλλέκτη ενώ στο κομμάτι της ετήσιας απόδοσης παρατηρείται μια μικρή αύξηση.

Κεφάλαιο 5

5. Συμπεράσματα

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας όπως επίσης και τη σύγκριση των διαγραμμάτων που προέκυψαν στο κεφάλαιο 4, προκύπτουν ορισμένα συμπεράσματα όσον αφορά τη θερμική απόδοση των PVT συλλεκτών.

Αρχικά, όπως διαπιστώνεται από τα διαγράμματα, ένας PVT συλλέκτης δεν είναι τόσο αποδοτικός όσο ένας απλός επίπεδος ηλιακός συλλέκτης όσον αφορά τη θερμική απόδοση. Αυτό συμβαίνει κατά κύριο λόγο διότι οι PVT συλλέκτες χαρακτηρίζονται από χαμηλότερο οπτικό βαθμό απόδοσης η_0 (βαθμός απόδοσης με μηδαμινές απώλειες) όπως επίσης και από υψηλότερο συντελεστή θερμικών απωλειών συγκριτικά με τους απλούς επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες. Συγκεκριμένα, σε οποιοδήποτε σύστημα εξετάζεται (είτε PVT είτε ηλιακού συλλέκτη), είναι αναμενόμενο ο βαθμός θερμικής απόδοσης που προκύπτει να είναι μικρότερος του οπτικού βαθμού απόδοσης καθώς οι θερμικές απώλειες, που χαρακτηρίζονται από τους συντελεστές α_1 και α_2 , τον επηρεάζουν άμεσα. Το συγκεκριμένο γεγονός παρατηρείται κατά τη σύγκριση που πραγματοποιήθηκε μεταξύ PVT συλλεκτών και απλών επίπεδων ηλιακών συλλεκτών ίδιας ή παρόμοιας επιφάνειας.

Στην περίπτωση όπου οι PVT συλλέκτες είχαν ίδια ή παρόμοια επιφάνεια με τους απλούς επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες, αρχικά, όπως προέκυψε από το πρόγραμμα προσομοίωσης, η θερμική ενέργεια για τη θέρμανση του νερού οικιακής χρήσης, που παράχθηκε κάθε μήνα, ήταν χαμηλότερη για τους PVT συλλέκτες, γεγονός που οφείλεται στον χαμηλότερο οπτικό βαθμό απόδοσης (η_0) και στον υψηλότερο συντελεστή θερμικών απωλειών (α_1).

Από την άλλη, με τον διπλασιασμό της επιφάνειας των PVT συγκριτικά με τους απλούς επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες παρατηρείται αύξηση της παραγόμενης θερμικής ενέργειας για τη θέρμανση του νερού οικιακής χρήσης, όμως παράλληλα αυξάνονται κατά πολύ και οι θερμικές απώλειες. Αυτό συμβαίνει κατά κύριο λόγο διότι αυξάνεται η επιφάνεια που προσπίπτει η ηλιακή ακτινοβολία αλλά ο όγκος του θερμοδοχείου παρέμεινε ίδιος με αυτόν που χρησιμοποιήθηκε στην περίπτωση της

κανονικής επιφάνειας. Είναι γνωστό ότι για τα βέλτιστα αποτελέσματα προτείνεται η αναλογία όγκου θερμοδοχείου 75lt για 1 m² επιφάνειας συλλέκτη, όπως αναφέρεται στο κεφάλαιο 4.

Επιπροσθέτως, όσον αφορά το ποσοστό κάλυψης f των θερμικών αναγκών που προέκυψε μέσω του προγράμματος, παρατηρείται ότι στην περίπτωση ενός PVT συλλέκτη, συγκριτικά με έναν επίπεδο ηλιακό συλλέκτη, αυτό είναι αρκετά χαμηλότερο. Το ποσοστό κάλυψης f που προκύπτει εξαρτάται από τους συντελεστές X και Y , οι οποίοι με τη σειρά τους εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το F_{RU_L} (α_1) και το $F_R(\tau\alpha)_n$ (η_0) όπως αναφέρεται στο **κεφάλαιο 3.2**. Επομένως, ένας PVT συλλέκτης είναι λογικό να παρουσιάζει χαμηλότερο ποσοστό κάλυψης f όπως αναφέρθηκε και παραπάνω.

Στην περίπτωση όπου ο PVT συλλέκτης είχε διπλάσια επιφάνεια από τον απλό επίπεδο ηλιακό συλλέκτη, παρατηρείται ότι το ποσοστό κάλυψης f αυξάνεται λόγω της αύξησης της επιφάνειας και συνεπώς της παραγόμενης θερμικής ενέργειας (για τον PVT συλλέκτη) πλησιάζοντας τις τιμές για εκείνο του απλού επίπεδου ηλιακού συλλέκτη, ενώ κατά τους θερινούς μήνες του χρόνου αρκετές φορές οι τιμές των 2 ειδών συλλεκτών ήταν ίσες (κυρίως στις περιπτώσεις που το ποσοστό f ήταν 100%). Παρόλα αυτά, σε καμία περίπτωση το ποσοστό κάλυψης f των θερμικών αναγκών της περίπτωσης του PVT συλλέκτη δεν ξεπέρασε εκείνο του απλού επίπεδου ηλιακού συλλέκτη.

Στα αποτελέσματα του ποσοστού κάλυψης f μέσω του προγράμματος προσομοίωσης δεν προκύπτει αυτή η μικρή διαφορά μεταξύ των ποσοστών των συλλεκτών, καθώς όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, το πρόγραμμα υπολογίζει με διαφορετικό τρόπο αυτό το ποσοστό. Με την εφαρμογή της μεθόδου καμπυλών f , όπως ακριβώς παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 3.2, τα αποτελέσματα που προκύπτουν τόσο για τον PVT συλλέκτη διπλάσιας επιφάνειας όσο και για τον επίπεδο ηλιακό συλλέκτη είναι αρκετά κοντά μεταξύ τους συγκριτικά με το ποσοστό f που προκύπτει μέσω του προγράμματος.

Τέλος, όπως φαίνεται στα διαγράμματα του μηνιαίου βαθμού απόδοσης των συλλεκτών, ο διπλασιασμός της επιφάνειας του PVT συλλέκτη, αυξάνει τον μηνιαίο βαθμό απόδοσης ωστόσο αυτό συμβαίνει σε ελάχιστο βαθμό χωρίς να πλησιάζει τον μηνιαίο βαθμό απόδοσης του επίπεδου ηλιακού συλλέκτη.

Ολοκληρώνοντας, λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα που προέκυψαν στο κεφάλαιο 4 καθώς επίσης και όσα προαναφέρθηκαν, καταλήγουμε στο συμπέρασμα

ότι η θερμική απόδοση ενός PVT συλλέκτη δεν εξαρτάται μόνο από την επιφάνεια του συλλέκτη. Πιο αναλυτικά, καθοριστικό ρόλο έχουν ο βαθμός οπτικής απόδοσης (η_0), ο συντελεστής θερμικών απωλειών (α_1) όπως επίσης και όγκος του θερμοδοχείου που χρησιμοποιείται. Μικρότερο ρόλο αλλά εξίσου σημαντικό, έχουν οι περιβαλλοντικές συνθήκες της περιοχής εγκατάστασης. Για να υπάρξει αύξηση του θερμικού βαθμού απόδοσης είναι αναγκαίο να βελτιωθεί ο οπτικός βαθμός απόδοσης και να μειωθεί ο συντελεστής θερμικών απωλειών. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί με την εξέλιξη της τεχνολογίας των PVT συλλεκτών (καθώς είναι μια σχετικά νέα τεχνολογία στον τομέα των ηλιοθερμικών συστημάτων), με τρόπους όπως αυτούς που αναφέρονται στο κεφάλαιο 2.7.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Αποτελέσματα δεδομένων για όλες τις περιπτώσεις

Πίνακας 9: Αποτελέσματα δεδομένων για τον επίπεδο ηλιακό συλλέκτη Νο1.

Dedalos 1.7						
Μήνας	Θερμικές Απώλειες (kWh)	Θερμική Ενέργεια για Παραγωγή Ζεστού Νερού (kWh)	Απώλειες λόγω σωληνώσεων (εξωτερικές) (kWh)	Απώλειες λόγω σωληνώσεων (εσωτερικές) (kWh)	\underline{H}_T (kWh/m ²)	f (%)
Ιανουάριος	47	43	2,7	13	115	29
Φεβρουάριος	42	37	2,4	11	100	27
Μάρτιος	50	49	2,9	15	129	35
Απρίλιος	62	63	3,5	22	166	48
Μάιος	63	71	3,6	29	188	59
Ιούνιος	57	76	3,2	35	195	66
Ιούλιος	60	85	3,4	43	216	80
Αύγουστος	60	88	3,4	43	217	76
Σεπτέμβριος	61	74	3,4	32	189	66
Οκτώβριος	51	58	2,9	22	148	46
Νοέμβριος	42	43	2,4	14	111	32
Δεκέμβριος	37	34	2,2	10	92	24

Πίνακας 10: Αποτελέσματα δεδομένων για τον επίπεδο ηλιακό συλλέκτη Νο2.

Phaethon SA170						
Μήνας	Θερμικές Απώλειες (kWh)	Θερμική Ενέργεια για Παραγωγή Ζεστού Νερού (kWh)	Απώλειες λόγω σωληνώσεων (εξωτερικές) (kWh)	Απώλειες λόγω σωληνώσεων (εσωτερικές) (kWh)	\underline{H}_T (kWh/m ²)	f (%)
Ιανουάριος	55	47	3	14	115	32
Φεβρουάριος	48	41	2,7	12	100	30
Μάρτιος	58	54	3,2	17	129	39
Απρίλιος	72	70	3,9	25	166	53
Μάιος	74	78	4	32	188	65
Ιούνιος	68	84	3,6	38	195	72
Ιούλιος	72	93	3,8	47	216	87
Αύγουστος	73	97	3,9	47	217	84
Σεπτέμβριος	73	82	3,9	35	189	73
Οκτώβριος	59	64	3,2	25	148	50
Νοέμβριος	48	48	2,7	16	111	35
Δεκέμβριος	43	38	2,4	12	92	26

Πίνακας 11: Αποτελέσματα δεδομένων για τον επίπεδο ηλιακό συλλέκτη Νο3.

C2000D12c						
Μήνας	Θερμικές Απώλειες (kWh)	Θερμική Ενέργεια για Παραγωγή Ζεστού Νερού (kWh)	Απώλειες λόγω σωληνώσεων (εξωτερικές) (kWh)	Απώλειες λόγω σωληνώσεων (εσωτερικές) (kWh)	\underline{H}_T (kWh/m ²)	f (%)
Ιανουάριος	69	58	3	14	115	38
Φεβρουάριος	60	50	2,6	12	100	36
Μάρτιος	74	65	3,2	18	129	46
Απρίλιος	92	84	3,9	25	166	62
Μάιος	96	95	4,1	33	188	76
Ιούνιος	90	101	3,8	40	195	84
Ιούλιος	99	110	4,2	49	216	99
Αύγουστος	97	118	4,1	48	217	97
Σεπτέμβριος	95	100	4	36	189	86
Οκτώβριος	77	78	3,3	25	148	60
Νοέμβριος	61	59	2,7	16	111	42
Δεκέμβριος	54	47	2,4	12	92	32

Πίνακας 12: Αποτελέσματα δεδομένων για τον επίπεδο ηλιακό συλλέκτη Νο4.

FLATINMASTER 2000						
Μήνας	Θερμικές Απώλειες (kWh)	Θερμική Ενέργεια για Παραγωγή Ζεστού Νερού (kWh)	Απώλειες λόγω σωληνώσεων (εξωτερικές) (kWh)	Απώλειες λόγω σωληνώσεων (εσωτερικές) (kWh)	\underline{H}_T (kWh/m ²)	f (%)
Ιανουάριος	78	53	2,9	14	115	35
Φεβρουάριος	69	45	2,6	12	100	33
Μάρτιος	84	60	3,1	17	129	43
Απρίλιος	106	78	3,9	25	166	58
Μάιος	111	88	4,1	33	188	71
Ιούνιος	105	94	3,8	40	195	79
Ιούλιος	113	104	4,1	49	216	95
Αύγουστος	113	109	4,1	48	217	92
Σεπτέμβριος	110	92	4	36	189	80
Οκτώβριος	88	72	3,3	25	148	56
Νοέμβριος	70	54	2,6	16	111	39
Δεκέμβριος	62	43	2,3	12	92	29

Πίνακας 13: Αποτελέσματα δεδομένων για τον PVT συλλέκτη Νο1 (κανονική επιφάνεια).

Volther Excell PVT (1,68 m ²)						
Μήνας	Θερμικές Απώλειες (kWh)	Θερμική Ενέργεια για Παραγωγή Ζεστού Νερού (kWh)	Απώλειες λόγω σωληνώσεων (εξωτερικές) (kWh)	Απώλειες λόγω σωληνώσεων (εσωτερικές) (kWh)	\underline{H}_T (kWh/m ²)	f (%)
Ιανουάριος	48	14	1,8	3,8	115	9,8
Φεβρουάριος	42	12	1,6	3,2	100	9
Μάρτιος	48	19	1,8	6	129	14
Απρίλιος	55	30	2	10	166	23
Μάιος	51	38	1,9	16	188	32
Ιούνιος	41	44	1,5	23	195	39
Ιούλιος	41	49	1,5	30	216	47
Αύγουστος	41	51	1,5	30	217	45
Σεπτέμβριος	49	38	1,8	20	189	35
Οκτώβριος	45	27	1,7	12	148	22
Νοέμβριος	41	17	1,5	6,2	111	13
Δεκέμβριος	37	12	1,4	3,4	92	8,3

Πίνακας 14: Αποτελέσματα δεδομένων για τον PVT συλλέκτη Νο1 (διπλάσια επιφάνεια).

Volther Excell PVT (3,36 m ²)						
Μήνας	Θερμικές Απώλειες (kWh)	Θερμική Ενέργεια για Παραγωγή Ζεστού Νερού (kWh)	Απώλειες λόγω σωληνώσεων (εξωτερικές) (kWh)	Απώλειες λόγω σωληνώσεων (εσωτερικές) (kWh)	\underline{H}_T (kWh/m ²)	f (%)
Ιανουάριος	102	27	1,9	4,4	115	18
Φεβρουάριος	89	23	1,7	3,7	100	17
Μάρτιος	105	35	2	6,9	129	26
Απρίλιος	126	52	2,3	12	166	40
Μάιος	126	65	2,4	19	188	53
Ιούνιος	115	74	2,1	27	195	64
Ιούλιος	124	82	2,3	36	216	77
Αύγουστος	123	87	2,3	35	217	75
Σεπτέμβριος	126	67	2,3	24	189	60
Οκτώβριος	105	50	2	14	148	40
Νοέμβριος	89	33	1,7	7	111	24
Δεκέμβριος	80	23	1,5	3,9	92	16

Πίνακας 15: Αποτελέσματα δεδομένων για τον PVT συλλέκτη Νο2 (κανονική επιφάνεια).

PVThERMAU280 (1,64 m ²)						
Μήνας	Θερμικές Απώλειες (kWh)	Θερμική Ενέργεια για Παραγωγή Ζεστού Νερού (kWh)	Απώλειες λόγω σωληνώσεων (εξωτερικές) (kWh)	Απώλειες λόγω σωληνώσεων (εσωτερικές) (kWh)	\underline{H}_T (kWh/m ²)	f (%)
Ιανουάριος	72	20	1,6	5,1	115	13
Φεβρουάριος	63	16	1,4	4,3	100	12
Μάρτιος	76	25	1,7	7,3	129	18
Απρίλιος	91	35	2	12	166	27
Μάιος	93	44	2	18	188	37
Ιούνιος	84	51	1,8	25	195	45
Ιούλιος	87	57	1,9	33	216	55
Αύγουστος	87	59	1,9	33	217	52
Σεπτέμβριος	90	45	2	21	189	41
Οκτώβριος	76	34	1,7	14	148	27
Νοέμβριος	63	22	1,4	7,4	111	17
Δεκέμβριος	57	16	1,2	4,5	92	11

Πίνακας 16: Αποτελέσματα δεδομένων για τον PVT συλλέκτη Νο2 (διπλάσια επιφάνεια).

PV THERMAU280 (3,28 m ²)						
Μήνας	Θερμικές Απώλειες (kWh)	Θερμική Ενέργεια για Παραγωγή Ζεστού Νερού (kWh)	Απώλειες λόγω σωληνώσεων (εξωτερικές) (kWh)	Απώλειες λόγω σωληνώσεων (εσωτερικές) (kWh)	\underline{H}_T (kWh/m ²)	f (%)
Ιανουάριος	151	37	1,7	5,8	115	25
Φεβρουάριος	134	30	1,5	4,8	100	23
Μάρτιος	163	45	1,8	8,2	129	33
Απρίλιος	202	63	2,2	13	166	48
Μάιος	216	75	2,4	21	188	62
Ιούνιος	209	86	2,3	28	195	74
Ιούλιος	225	96	2,5	37	216	89
Αύγουστος	222	102	2,4	36	217	87
Σεπτέμβριος	212	80	2,3	24	189	71
Οκτώβριος	171	62	1,9	15	148	48
Νοέμβριος	137	43	1,5	8,2	111	31
Δεκέμβριος	119	31	1,3	5	92	22

Πίνακας 17: Αποτελέσματα δεδομένων για τον PVT συλλέκτη Νο3 (κανονική επιφάνεια).

PVT warmtepompaneel (1,98 m ²)						
Μήνας	Θερμικές Απώλειες (kWh)	Θερμική Ενέργεια για Παραγωγή Ζεστού Νερού (kWh)	Απώλειες λόγω σωληνώσεων (εξωτερικές) (kWh)	Απώλειες λόγω σωληνώσεων (εσωτερικές) (kWh)	\underline{H}_T (kWh/m ²)	f (%)
Ιανουάριος	77	5,4	0,65	1,1	115	3,7
Φεβρουάριος	56	4,4	0,48	0,83	100	3,3
Μάρτιος	65	8,3	0,55	1,9	129	6,1
Απρίλιος	87	14	0,74	3,9	166	11
Μάιος	82	23	0,69	8,8	188	20
Ιούνιος	71	33	0,6	16	195	29
Ιούλιος	83	40	0,71	24	216	39
Αύγουστος	89	42	0,75	24	217	37
Σεπτέμβριος	97	27	0,82	13	189	25
Οκτώβριος	80	16	0,68	6,7	148	13
Νοέμβριος	67	8,4	0,56	2,5	111	6,2
Δεκέμβριος	59	4,4	0,5	1,1	92	3

Πίνακας 18: Αποτελέσματα δεδομένων για τον PVT συλλέκτη Νο3 (διπλάσια επιφάνεια).

PVT warmtepompaneel (3,96 m ²)						
Μήνας	Θερμικές Απώλειες (kWh)	Θερμική Ενέργεια για Παραγωγή Ζεστού Νερού (kWh)	Απώλειες λόγω σωληνώσεων (εξωτερικές) (kWh)	Απώλειες λόγω σωληνώσεων (εσωτερικές) (kWh)	\underline{H}_T (kWh/m ²)	f (%)
Ιανουάριος	102	27	1,9	4,4	115	18
Φεβρουάριος	89	23	1,7	3,7	100	17
Μάρτιος	105	35	2	6,9	129	26
Απρίλιος	126	52	2,3	12	166	40
Μάιος	126	65	2,4	19	188	53
Ιούνιος	115	74	2,1	27	195	64
Ιούλιος	124	82	2,3	36	216	77
Αύγουστος	123	87	2,3	35	217	75
Σεπτέμβριος	126	67	2,3	24	189	60
Οκτώβριος	105	50	2	14	148	40
Νοέμβριος	89	33	1,7	7	111	24
Δεκέμβριος	80	23	1,5	3,9	92	16

Πίνακας 19: Αποτελέσματα δεδομένων για τον PVT συλλέκτη Νο4 (κανονική επιφάνεια).

SOLINK PVT (1,98 m ²)						
Μήνας	Θερμικές Απώλειες (kWh)	Θερμική Ενέργεια για Παραγωγή Ζεστού Νερού (kWh)	Απώλειες λόγω σωληνώσεων (εξωτερικές) (kWh)	Απώλειες λόγω σωληνώσεων (εσωτερικές) (kWh)	\underline{H}_T (kWh/m ²)	f (%)
Ιανουάριος	31	0	0,072	0,000065	115	0
Φεβρουάριος	27	0	0,063	0,0000056	100	0
Μάρτιος	35	0	0,081	0,12	129	0
Απρίλιος	44	0,65	0,1	0,52	166	0,51
Μάιος	39	7,2	0,089	4,6	188	6,2
Ιούνιος	19	20	0,044	12	195	18
Ιούλιος	9,4	27	0,022	19	216	26
Αύγουστος	9,9	27	0,023	19	217	24
Σεπτέμβριος	35	7,5	0,082	7,8	189	7
Οκτώβριος	36	1	0,084	2,8	148	0,84
Νοέμβριος	30	0	0,069	0,27	111	0
Δεκέμβριος	25	0	0,058	0,022	92	0

Πίνακας 20: Αποτελέσματα δεδομένων για τον PVT συλλέκτη Νο4 (διπλάσια επιφάνεια).

SOLINK PVT (3,96 m ²)						
Μήνας	Θερμικές Απώλειες (kWh)	Θερμική Ενέργεια για Παραγωγή Ζεστού Νερού (kWh)	Απώλειες λόγω σωληνώσεων (εξωτερικές) (kWh)	Απώλειες λόγω σωληνώσεων (εσωτερικές) (kWh)	\underline{H}_T (kWh/m ²)	f (%)
Ιανουάριος	62	0	0,084	0,00008	115	0
Φεβρουάριος	54	0	0,074	0,0000079	100	0
Μάρτιος	70	0	0,094	0,14	129	0
Απρίλιος	89	0,98	0,12	0,63	166	0,77
Μάιος	85	11	0,11	5,5	188	9,2
Ιούνιος	62	27	0,084	15	195	24
Ιούλιος	58	32	0,078	23	216	31
Αύγουστος	56	35	0,076	23	217	31
Σεπτέμβριος	81	12	0,11	9,4	189	11
Οκτώβριος	75	1,8	0,1	3,4	148	1,5
Νοέμβριος	60	0	0,081	0,32	111	0
Δεκέμβριος	50	0	0,068	0,027	92	0

Πίνακας 21: Αποτελέσματα δεδομένων για τον PVT συλλέκτη Νο5 (ελληνικής εταιρείας-κανονική επιφάνεια).

FEGEN PVT CSK6-16PS (1,63 m ²)						
Μήνας	Θερμικές Απώλειες (kWh)	Θερμική Ενέργεια για Παραγωγή Ζεστού Νερού (kWh)	Απώλειες λόγω σωληνώσεων (εξωτερικές) (kWh)	Απώλειες λόγω σωληνώσεων (εσωτερικές) (kWh)	\underline{H}_T (kWh/m ²)	f (%)
Ιανουάριος	56	17	1,5	4,3	115	12
Φεβρουάριος	50	14	1,3	3,6	100	11
Μάρτιος	59	22	1,5	6,4	129	16
Απρίλιος	70	32	1,8	10	166	24
Μάιος	68	40	1,8	16	188	34
Ιούνιος	59	46	1,5	23	195	41
Ιούλιος	59	51	1,5	30	216	50
Αύγουστος	60	53	1,6	30	217	47
Σεπτέμβριος	66	40	1,7	20	189	37
Οκτώβριος	57	30	1,5	12	148	24
Νοέμβριος	49	20	1,3	6,5	111	15
Δεκέμβριος	44	14	1,2	3,9	92	9,8

Πίνακας 22: Αποτελέσματα δεδομένων για τον PVT συλλέκτη Νο5 (ελληνικής εταιρείας-διπλάσια επιφάνεια).

FEGEN PVT CSK6-16PS (3,26 m ²)						
Μήνας	Θερμικές Απώλειες (kWh)	Θερμική Ενέργεια για Παραγωγή Ζεστού Νερού (kWh)	Απώλειες λόγω σωληνώσεων (εξωτερικές) (kWh)	Απώλειες λόγω σωληνώσεων (εσωτερικές) (kWh)	\underline{H}_T (kWh/m ²)	f (%)
Ιανουάριος	119	32	1,5	4,9	115	22
Φεβρουάριος	106	26	1,4	4,1	100	20
Μάρτιος	128	40	1,7	7,3	129	29
Απρίλιος	156	57	2	12	166	43
Μάιος	163	68	2,1	19	188	56
Ιούνιος	153	77	2	26	195	67
Ιούλιος	163	88	2,1	34	216	82
Αύγουστος	163	92	2,1	34	217	79
Σεπτέμβριος	159	72	2,1	22	189	65
Οκτώβριος	130	56	1,7	14	148	44
Νοέμβριος	106	38	1,4	7,2	111	28
Δεκέμβριος	94	27	1,2	4,3	92	19

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] S P Sukhatme and J K Nayak, *Solar energy*. India: McGraw Hill Education, 2018.
- [2] Παναγιώτης Γεωργοστάθης, "ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ/ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ," Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, Μεταπτυχιακή Εργασία 2010.
- [3] Al-Waeli, Sorpian, Kazem, and Chaichan, "Photovoltaic Thermal PV/T systems: A review," *International Journal of Computation and Applied Sciences IJOCAAS*, vol. 2, no. 2, pp. 62-67, 2017.
- [4] Sandnes and Reckstad, "A PHOTOVOLTAIC/THERMAL (PV/T) COLLECTOR WITH A POLYMER ABSORBER PLATE. EXPERIMENTAL STUDY AND ANALYTICAL MODEL," *Solar Energy*, vol. 72, no. 1, pp. 63-73, 2002.
- [5] H.A Zondag, D.W de Vries, W.G.J van Helden, R.J.C van Zolingen, and A.A van Steenhoven, "The yield of different combined PV-thermal collector designs," *Solar Energy*, pp. 253-269, 2003.
- [6] Jia Yuting, Alva Guruprasad, and Fang Guiyin, "Development and applications of photovoltaic-thermal systems: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 249-265, 2019.
- [7] Soteris A Kalogirou, *Solar Energy Engineering Processes and Systems*, 2nd ed.: Elsevier Inc., 2014.
- [8] Nurul Rukman, Ahmad Fudholi, Saleem Zaidi, and Kamaruzzaman Sopian, "Overview of Bifluid-based Photovoltaic Thermal (PVT) Systems," *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, vol. 9, pp. 1912-1917, 2018.
- [9] Martin Wolf, "PERFORMANCE ANALYSES OF COMBINED HEATING AND PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEMS FOR RESIDENCES," *Energy Conversion*, vol. 16, pp. 79-90, 1976.
- [10] S.D. Hendrie, "Photovoltaic/Thermal Collector Development Program - Final Report," Massachusetts Institute of Technology, Lexington, Massachusetts, 1982.
- [11] Akio Suzuki and Susumu Kitamura, "Combined Photovoltaic and Thermal Hybrid Collector," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 19, pp. 79-83, 1980.
- [12] Y Nakata et al., "A 30kWp concentrating photovoltaic/thermal hybrid system application," in *16th Photovoltaics Specialists Conference*, San Diego, 1982, pp. 993-998.
- [13] H. Karl, "Photovoltaischer Hybridkollektor," in *4th International congress laser*, Munchen, 1979.
- [14] C Gibart, "Study of and tests on a hybrid photovoltaic-thermal collector using concentrated sunlight," *Solar Cells*, vol. 4, pp. 71-89, 1981.
- [15] Ph Buffet, "Hybrid Thermal And Photovoltaic Concentration Collector," *Solar Energy R&D in the European Community*, vol. 3, 1983.
- [16] H.A Zondag, "Flat-plate PV-Thermal collectors and systems: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, pp. 891-959, 2008.
- [17] de, D.W Vries, "Design of a photovoltaic/thermal combi-panel," Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, 1998.
- [18] Y. Tripanagnostopoulos, Th. Nousia, M. Souliotis, and P. Yianoulis, "HYBRID PHOTOVOLTAIC / THERMAL SOLAR SYSTEMS," *Solar Energy*, vol. 72, no. 3, pp. 217-234, 2002.
- [19] Y. Tripanagnostopoulos, S. Tselepis, M. Souliotis, and JK. Tonui, "DESIGN ASPECTS OF HYBRID PVT/WATER SOLAR SYSTEMS," in *19th EPSEC*, Paris, 2004.
- [20] A. Soteris Kalogirou, "Use of TRNSYS for modelling and simulation of a hybrid pv-thermal solar system in Cyprus," *Renewable Energy*, vol. 23, pp. 247-260, 2001.
- [21] Karl W Boer and Gunnar Tamm, "Solar conversion under consideration of energy and entropy," *Solar Energy*, vol. 74, pp. 525-528, 2003.

- [22] R Komp and T Reeser, "Design, construction & operation of a PV/Hot air hybrid energy system," in *ISES Solar World Congress*, Hamburg, 1987.
- [23] S Ito and N Miura, "Solar air collectors using photovoltaic modules as cover," in *ISES Solar World Congress*, Budapest, 1993.
- [24] A Ricaud and P Roubeau, "'Caphel', a 66% efficient hybrid solar module and the 'Ecothel' co-generation solar system," in *Proceedings of 1994 IEEE 1st World Conference on Photovoltaic Energy Conversion - WCPEC (A Joint Conference of PVSC, PVSEC and PSEC)*, Hawaii, 1994, pp. 1012-1015.
- [25] M Bosanac et al., "Photovoltaic/thermal solar collectors and their potential in Denmark," EFP Project 1713/00-0014 2003.
- [26] Y Tripanagnostopoulos, D Tzavellas, I Zoulia, and M Chortatou, "Hybrid PV/T systems with dual heat extraction operation," in *17th EPSEC*, Munich, 2001.
- [27] M. Sathe Tushar and A.S Dhoble, "A review on recent advancements in photovoltaic thermal techniques," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 76, pp. 645-672, 2017.
- [28] Zelin Xu and Clement Kleinstreuer, "Concentration photovoltaic–thermal energy co-generation system using nanofluids for cooling and heating," *Energy Conversion and Management*, vol. 87, pp. 504-512, 2014.
- [29] Mohammad Sardarabadi, Mohammad Passandideh-Fard, and Herra Saeed Zeinali, "Experimental investigation of the effects of silica/water nanofluid on PV/T (photovoltaic thermal units)," *Energy*, vol. 66, pp. 264-272, 2014.
- [30] Meysam Moradgholi, Nowee Seyed Mostafa, and Iman Abrishamchi, "Application of heat pipe in an experimental investigation on a novel photovoltaic/thermal (PV/T) system," *Solar Energy*, vol. 107, pp. 82-88, 2014.
- [31] Pei Gang, Fu Huide, Zhang Tao, and Ji Jie, "A numerical and experimental study on a heat pipe PV/T system," *Solar Energy*, vol. 85, no. 5, pp. 911-921, 2011.
- [32] Di Su, Yuting Jia, Guruprasad Alva, Lingkun Liu, and Guiyin Fang, "Comparative analyses on dynamic performances of photovoltaic–thermal solar collectors integrated with phase change materials," *Energy Conversion and Management*, vol. 131, pp. 79-89, 2017.
- [33] John A Duffie and William A Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, 4th ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2013.
- [34] Soteris A. Kalogirou, *Solar Energy Engineering Processes and Systems*, 2nd ed.: Elsevier Inc., 2014.
- [35] Ε. Βαζαίος, *Εφαρμογές της Ηλιακής Ενέργειας*, Γ ed. Αθήνα, 1987.
- [36] Δημήτριος Κατσαπρακάκης, *Σύνθεση Ενεργειακών Συστημάτων*: Kallipos, 2015.
- [37] Ιωάννης Κ Καλδέλλης and Κοσμάς Α Καββαδίας, *Εργαστηριακές Εφαρμογές Ήπιων Μορφών Ενέργειας*. Αθήνα: Εκδόσεις Σταμούλης, 2001.
- [38] S. Klein, W. Beckman, and J Duffie, "A Design Procedure for Solar Heating Systems," *Solar Energy*, vol. 18, pp. 113-127, 1976.
- [39] Jie Ji, Lu Jian-Ping, Tin-Tai Chow, Wei He, and Gang Pei, "A sensitivity study of a hybrid photovoltaic/thermal water-heating system with natural circulation," *APPLIED ENERGY*, vol. 84, pp. 222-237, 2007.
- [40] Swapnil Dubey and G.N. Tiwari, "Thermal modeling of a combined system of photovoltaic thermal (PV/T) solar water heater," *Solar Energy*, vol. 82, pp. 602-612, 2008.
- [41] Zhao Jiafei et al., "Solar radiation transfer and performance analysis of an optimum photovoltaic/thermal system," *Energy Conversion and Management*, vol. 52, pp. 1343-1353, 2010.
- [42] P Dupeyrat, C Menezo, and S Fortuin, "Study of the thermal and electrical performances of PVT solar hot water system," *Energy and Buildings*, vol. 68, pp. 751-755, 2014.

ΠΡΟΤΥΠΑ

EN 12975-1 (2001)

EN 12975-2 (2002)

EN 15316-4-3 (2017)

ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ

el.wikipedia.org

ebhe.gr

irena.org

keymark.eu