



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ**

**ΜΕΛΕΤΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ  
ΑΣΥΜΜΕΤΡΟΥ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ  
ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΑΡΙΣΤΕΙΔΗΣ ΚΟΝΤΟΣ**

**Επιβλέπουσα :** Ειρήνη Κορωνάκη  
Επίκουρος Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2016

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.



**NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS**

**SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING**

**SECTION OF THERMAL ENGINEERING**

**THERMAL AND ELECTRICAL PERFORMANCE  
EVALUATION OF AN ASYMMETRIC HYBRID SOLAR  
COLLECTOR IN GREECE**

**THESIS**

**ARISTEIDIS KONTOS**

**ADVISOR:** Irene Koronaki  
Assistant Professor N.T.U.A.

Athens, February 2016

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

## Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της απόδοσης ενός ασύμμετρου υβριδικού ηλιακού συλλέκτη PVT και οι προοπτικές εγκατάστασης ενός τέτοιου συστήματος στον ελλαδικό χώρο. Ο συλλέκτης PVT (PhotoVoltaic-Thermal – Φωτοβολταϊκός Θερμικός) συνδυάζει ουσιαστικά τα πλεονεκτήματα ενός απλού ηλιακού συλλέκτη και ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, βελτιώνοντας δε ταυτόχρονα, όπως καταδεικνύει η εργασία αυτή, την απόδοση του τελευταίου.

Συγκεκριμένα, στα πλαίσια της διπλωματικής αυτής εργασίας, επιλέχθηκε και μοντελοποιήθηκε μέσω αναλυτικών σχέσεων ο συλλέκτης PVT Solarus V11 της εταιρίας Solarus AB, ο οποίος είναι διαθέσιμος και στο εργαστήριο Εφαρμοσμένης Θερμοδυναμικής. Επίσης, με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία, επιλέχθησαν κατάλληλα μοντέλα για τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας στην Ελλάδα και συνδυάστηκαν με τα δεδομένα που παρέχονται από την Τεχνική Οδηγία του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδος 20701-3, προκειμένου να γίνει μελέτη της απόδοσης μιας εγκατάστασης που αποτελείται από τους συλλέκτες αυτούς στην Ελλάδα. Για την μελέτη αυτή, θέσαμε ως στόχο την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών μιας μέσης οικογένειας με μια οικία 100 m<sup>2</sup>, για κάθε μία από τις 4 κλιματικές ζώνες της Ελλάδας και με τη χρήση 5 συλλεκτών.

Μέσω του λογισμικού που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον Matlab, υπολογίσθηκαν και παρουσιάζονται δεδομένα για την κάλυψη των απαιτήσεων σε Ζεστό Νερό Χρήσης (ZNX) καθώς και για την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από το σύστημα, ανά μήνα για την ελληνική επικράτεια. Επίσης, γίνεται παραμετρική ανάλυση της επίδρασης της παροχής του ψυκτικού υγρού των συλλεκτών όσον αφορά την παραγωγή ZNX, την ηλεκτρική ενέργεια και τον βαθμό απόδοσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Τέλος, παρουσιάζονται τρόποι αξιοποίησης του πλεονάζοντος θερμικού φορτίου που προκύπτει αλλά και πιθανά πεδία περεταίρω διερεύνησης και μελέτης στο μέλλον.

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

## **Abstract**

The scope of this thesis is the performance analysis of an asymmetric hybrid solar collector PVT and the prospect of the installation of a system consisting of these collectors in Greece. A PVT (PhotoVoltaic-Thermal) collector essentially combines the advantages of a traditional solar collector and a photovoltaic panel array while improving, as this thesis proves, the efficiency of the later.

For the purpose of this thesis, the Solarus V11 PVT collector of Solarus AB was chosen and numerically modeled. This collector is readily available in the lab of the Applied Thermodynamics at the department of Mechanical Engineering. Additionally, based on the available international bibliography, the appropriate solar irradiance models for Greece were chosen and, in tandem with data retrieved from the Technical Advice 20701-3 of the Technical Chamber of Greece, the performance of the installation for Greece was evaluated. For this evaluation, we set as a goal to successfully meet the energy requirements of an average family with a 100 m<sup>2</sup> house, for each and every of the 4 climatic zones of Greece, with the utilization of 5 collectors.

Using the software developed in Matlab, the calculated energy data are presented for both the thermal and electrical energy produced and how these compare with the family's hot water requirements for each month throughout the year for the territory of Greece. Furthermore, a parametric study is conducted to investigate the effect of the mass flow rate on the thermal and electrical production, as well as the efficiency of the solar cells of the system. Finally, ways of leveraging the installation's excess of thermal energy production and potential areas for future research are presented.

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.



## **Ευχαριστίες**

Ευχαριστώ την οικογένεια μου για την αμέριστη συμπαράστασή της όλα αυτά τα χρόνια και σε όλες τις δύσκολες στιγμές.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερος θερμά τον Υποψήφιο Διδάκτορα κ. Μιχάλη Νίτσα για την καθοδήγηση, τις χρήσιμες υποδείξεις του και την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συμφοιτητές, σύντομα συναδέλφους μα πάνω από όλα φίλους για όσα περάσαμε μαζί αυτά τα πέντε χρόνια.

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

# Πίνακας περιεχομένων

<b>1</b>	<b>Εισαγωγή .....</b>	<b>1</b>
1.1	Το ενεργειακό ζήτημα.....	1
1.2	Παρουσίαση κεφαλαίων .....	5
<b>2</b>	<b>Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....</b>	<b>7</b>
2.1	Προκαταρκτική έρευνα και εφαρμογές.....	7
2.2	Συστήματα PVT επίπεδου συλλέκτη .....	9
2.2.1	Συστήματα για θέρμανση αέρα.....	9
2.2.2	Συστήματα για θέρμανση νερού .....	12
2.3	Συστήματα PVT συγκεντρωτικού συλλέκτη .....	16
2.3.1	Ο συγκεντρωτικός συλλέκτης Solarus V11 .....	19
<b>3</b>	<b>Μαθηματική διατύπωση .....</b>	<b>21</b>
3.1	Εξισώσεις ηλιακής ακτινοβολίας.....	21
3.2	Εξισώσεις μοντέλου συλλέκτη .....	23
<b>4</b>	<b>Περιγραφή του προτύπου ανάλυσης .....</b>	<b>27</b>
4.1	Χωροθέτηση και παραμετροποίηση κατοικίας.....	27
4.2	Διαμόρφωση συλλεκτών.....	29
<b>5</b>	<b>Αποτελέσματα .....</b>	<b>31</b>
5.1	Παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας .....	31
5.1.1	Κλιματική Ζώνη Α .....	31
5.1.2	Κλιματική Ζώνη Β .....	34
5.1.3	Κλιματική Ζώνη Γ.....	37
5.1.4	Κλιματική Ζώνη Δ .....	40
5.2	Παραμετρική ανάλυση παροχής ψυκτικού .....	43
5.3	Παραμετρική ανάλυση διάταξης συλλεκτών.....	46

5.4	Συμπεράσματα - Αξιοποίηση θερμικού πλεονάσματος.....	47
5.5	Σημεία περαιτέρω μελέτης.....	48
<b>Βιβλιογραφία.....</b>		<b>49</b>
<b>Παραρτήματα.....</b>		<b>57</b>
	Παράρτημα Α – Κώδικας Matlab.....	57
	Παράρτημα Β – Κώδικας Java .....	69
	Παράρτημα Γ – Τεχνικά χαρακτηριστικά και renders .....	81

## **Κατάλογος Σχημάτων**

Σχήμα 1 – Το ηλιακό δυναμικό της Ευρώπης[7] .....	4
Σχήμα 2 – Το ηλιακό δυναμικό της Ελλάδας [8].....	4
Σχήμα 3 – Συλλέκτης PVT αέρα με διπλού περάσματος [39] .....	9
Σχήμα 4 – Σκαρίφημα του συλλέκτη Solarus V11 .....	19
Σχήμα 5 – Κάτοψη συλλέκτη.....	25
Σχήμα 6 – Διάγραμμα ροής .....	26
Σχήμα 7 – Επιλεχθείσες πόλεις ανά κλιματική ζώνη [100] .....	28
Σχήμα 8 – Διάταξη συλλεκτών της μελέτης .....	29
Σχήμα 9 – Παραγωγή και κατανάλωση θερμικής ενέργειας ανά μήνα .....	31
Σχήμα 10 – Παραγωγή και κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ανά μήνα.....	32
Σχήμα 11 – Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και βαθμός απόδοσης PV ανά μήνα.....	33
Σχήμα 12 – Ηλιακή, θερμική και ηλεκτρική ενέργεια.....	33
Σχήμα 13 – Παραγωγή και κατανάλωση θερμικής ενέργειας ανά μήνα .....	34
Σχήμα 14 – Παραγωγή και κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ανά μήνα.....	35
Σχήμα 15 – Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και βαθμός απόδοσης PV ανά μήνα.....	35
Σχήμα 16 - Ηλιακή, θερμική και ηλεκτρική ενέργεια .....	36
Σχήμα 17 – Παραγωγή και κατανάλωση θερμικής ενέργειας ανά μήνα .....	37
Σχήμα 18 – Παραγωγή και κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ανά μήνα.....	38
Σχήμα 19 – Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και βαθμός απόδοσης PV ανά μήνα.....	38
Σχήμα 20 - Ηλιακή, θερμική και ηλεκτρική ενέργεια .....	39
Σχήμα 21 – Παραγωγή και κατανάλωση θερμικής ενέργειας ανά μήνα .....	40
Σχήμα 22 – Παραγωγή και κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ανά μήνα.....	41
Σχήμα 23 – Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και βαθμός απόδοσης PV ανά μήνα.....	41
Σχήμα 24 - Ηλιακή, θερμική και ηλεκτρική ενέργεια .....	42
Σχήμα 25 – Επίδραση της μεταβολής της παροχής του ψυκτικού στην παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια	43
Σχήμα 26 – Επίδραση της μεταβολής της παροχής του ψυκτικού στην παραγόμενη θερμική ενέργεια....	44
Σχήμα 27 – Επίδραση της μεταβολής της παροχής του ψυκτικού στον βαθμό απόδοσης των PV .....	45
Σχήμα 28 – Επίδραση διάταξης στην παραγόμενη θερμική ενέργεια .....	46
Σχήμα 29 – Επίδραση της διάταξης στην παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια .....	46
Σχήμα 30 – Τεχνικά χαρακτηριστικά (1).....	81
Σχήμα 31 – Τεχνικά χαρακτηριστικά (2).....	82

Σχήμα 32 – Render του μοντέλου στο Solidworks (1) .....	83
Σχήμα 33 – Render του μοντέλου στο Solidworks (2) .....	83

## ***Κατάλογος Πινάκων***

Πίνακας 1 – Παράμετροι προσομοίωσης.....	30
Πίνακας 2 – Πλεόνασμα & έλλειμμα θερμικής ενέργειας ανά μήνα και ζώνη σε kWh.....	47

## ***Ονοματολογία***

$H_0$	ηλιακή ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ )
$H$	ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ )
$I$	ωριαία ηλιακή ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ )
$G_{SC}$	ηλιακή σταθερά ( $\text{W}/\text{m}^2$ )
$\bar{K}_T$	μέσος μηνιαίος δείκτης αιθριότητας
$r_t$	λόγος ωριαίας προς ημερήσιας ακτινοβολίας
$r_d$	λόγος ωριαίας διάχυτης προς ημερήσιας διάχυτης ακτινοβολίας
$R_b$	λόγος της ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου προς οριζοντίου επιπέδου
$T$	θερμοκρασία (Kelvin)
$Q$	θερμική ενέργεια (kJ)
$E$	ηλεκτρική ενέργεια
$V$	όγκος ( $\text{m}^3$ )
$C_p$	ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση ( $\text{J}/\text{kgK}$ )
$\dot{m}$	παροχή μάζας ( $\text{kg}/\text{s}$ )
$U_L$	συντελεστής θερμικών απωλειών ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ )
$F'$	παράγων απόδοσης συλλέκτη

### *Ελληνικά γράμματα*

$\rho$	πυκνότητα ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
$\delta$	ηλιακή απόκλιση ( $^\circ$ )

$\omega$	ωριαία γωνία (°)
$\beta$	γωνία κλίσης συλλέκτη (°)
$\theta$	γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας (°)
$\beta_p$	συντελεστής μεταβολής του βαθμού απόδοσης βάση της θερμοκρασίας (%/K)
$\eta$	βαθμός απόδοσης (%)

#### *Δείκτες*

d	διάχυτος
b	άμεσος
z	ζενίθ
T	κεκλιμένου επιπέδου
PV	φωτοβολταϊκό
C	συλλέκτης
f	ρευστό
in	είσοδος
out	έξοδος
amb	περιβάλλον
HW	ζεστό νερό χρήσης
w	νερό δικτύου
ref	αναφορά
th	θερμικός
el	ηλεκτρικός

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.



# 1

## *Εισαγωγή*

### *1.1 Το ενεργειακό ζήτημα*

Η χρήση του ήλιου ως πηγή θέρμανσης είναι γνωστή και σημαντική από αρχαιοτάτων χρόνων. Από τον 4 αιώνα π.Χ. οι αρχαίοι Έλληνες χρησιμοποιούσαν την ηλιακή ενέργεια για να ζεστάνουν τα σπίτια τους[1]. Από τότε, και κατά την διάρκεια των αιώνων έχει υπάρξει σημαντική πρόοδος, ιδιαίτερα δε τα τελευταία χρόνια που η αξία του ήλιου ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας έχει αναγνωριστεί και μνημονευθεί.

Εφαπτήριο για την άνθιση της χρήσης της ηλιακής ενέργειας υπήρξε η πετρελαιϊκή κρίση της δεκαετίας του '80. Η αναζήτηση εναλλακτικών πηγών ενέργειας, εξαιτίας της αβεβαιότητας που υπήρξε την εποχή εκείνη, ανέδειξε το ανεκμετάλλευτο δυναμικό της ηλιακής ενέργειας. Η έρευνα στράφηκε τόσο στην εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας για θέρμανση και παραγωγή θερμότητας, όσο και στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή συνδυασμό και των δύο. Οι ηλιακοί συλλέκτες για παραγωγή ζεστού νερού χρήσης ήταν μια από τις πρώτες εφαρμογές που η χρήση της διαδόθηκε ευρέως και που παραμένει ακόμα και σήμερα μια δημοφιλής και αξιόπιστη εναλλακτική για την παραγωγή ζεστού νερού. Αξίζει να σημειωθεί ότι παρόμοια συσκευή με αυτές που χρησιμοποιούμε σήμερα είχε κατασκευάσει το 1909 ο William Bailey [2].

Ως απάντηση στις ανησυχίες για την υπερθέρμανση του πλανήτη από το φαινόμενο του θερμοκηπίου που προκαλεί η αλόγιστη χρήση υδρογονανθράκων και ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή ενέργειας, η αναζήτηση εναλλακτικών, ανανεώσιμων και μη ρυπογόνων μορφών ενέργειας οδήγησε στην ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών συστημάτων και στην ενσωμάτωσή τους στην ηλεκτροπαραγωγή. Τα φωτοβολταϊκά πάνελ πρωτοεμφανίστηκαν σε εφαρμογή την δεκαετία του 1960 ως πηγή ηλεκτρικής ενέργειας για τους δορυφόρους [3]. Το υψηλό τους κόστος αποτελούσε τροχοπέδη για την όποια προσπάθεια υιοθέτησής τους για άλλες εφαρμογές, όμως η έρευνα στον τομέα αυτό οδήγησε στις αρχές του 21<sup>ου</sup> αιώνα σε δραματική μείωση του κόστους τους, καθιστώντας τα προσιτά στο ευρύ κοινό. Σήμερα τα φωτοβολταϊκά συστήματα συναντώνται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, από οροφές και προσόψεις κτηρίων μέχρι αεροπλάνα και μεγάλα πάρκα παραγωγής ενέργειας.

Σήμερα, με το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής να είναι πλέον στην επικαιρότητα, η ανάπτυξη των πράσινων μορφών ενέργειας έχει βρεθεί σε πρώτο πλάνο. Η μείωση του κόστους των συστημάτων που εκμεταλλεύονται την ηλιακή ενέργεια, όπως τα φωτοβολταϊκά πάνελ, οι ηλιακοί συλλέκτες και τα παραβολικά κάτοπτρα, απόρροια της αυξανόμενης παραγωγής τους και των αποτελεσμάτων της εντατικής έρευνας, σε συνδυασμό με την φορολόγηση των ρυπογόνων μορφών ενέργειας, καθιστά τα συστήματα αυτά ελκυστικά τόσο για τους οικιακούς καταναλωτές, όσο και για τον βιομηχανικό τομέα.

Το φαινόμενο του θερμοκηπίου που προκαλείται από την καύση των ορυκτών καυσίμων και οδηγεί στην κλιματική αλλαγή δεν είναι το μόνο οικολογικό πρόβλημα. Η ιπτάμενη τέφρα, τα αιωρούμενα σωματίδια πολύ μικρής διαμέτρου που εκλύονται κατά την καύση επιδρούν επίσης αρνητικά στην ποιότητα ζωής του ανθρώπου και στο οικοσύστημα. Το φαινόμενο της αιθαλομίχλης είναι συχνό τα τελευταία χρόνια στην Ελλάδα, όπως και οι υπερβάσεις των ορίων στο κέντρο της Αθήνας από της μη συντηρημένες μηχανές εσωτερικής καύσης diesel των οχημάτων.

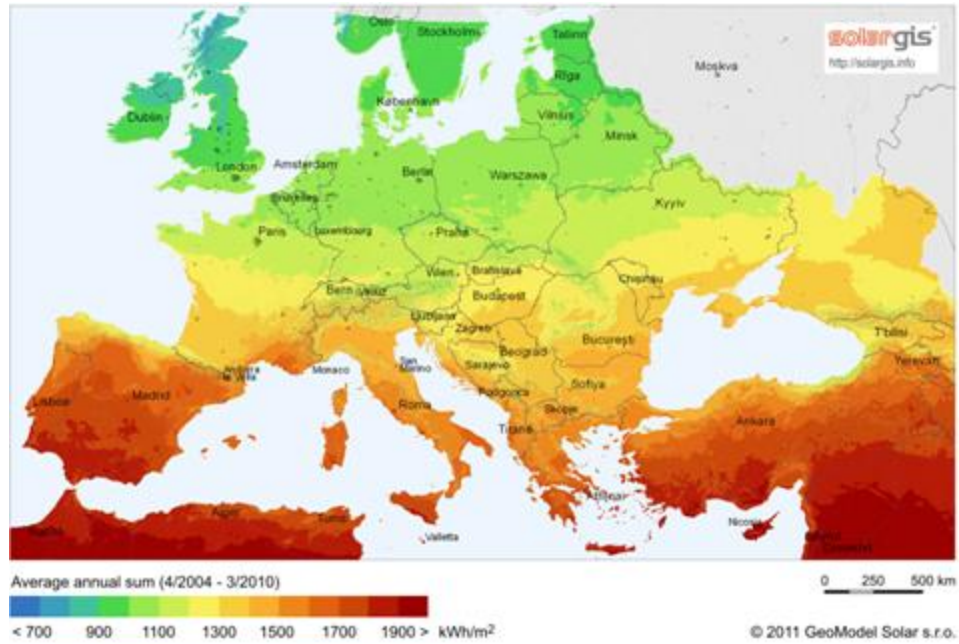
Από την άλλη, ένα άλλο μεγάλο πρόβλημα είναι αυτό της συνεχώς αυξανόμενης κατανάλωσης ενέργειας. Ο πληθυσμός της γης έχει πλέον τα τελευταία χρόνια ξεπεράσει τα 6 δισεκατομμύρια και αυξάνεται περεταίρω. Η δε άνοδος του επιπέδου ζωής σε χώρες με τεράστιους πληθυσμούς όπως η Ινδία και η Κίνα τα τελευταία χρόνια και άρρηκτη σύνδεσή του με την κατανάλωση ενέργειας, οδηγεί σε τεράστιες απαιτήσεις ενέργειας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα πολλοί να θεωρούν ότι η κάλυψη των απαιτήσεων αυτών καθίσταται αδύνατη με τη χρήση συμβατικών μορφών ενέργειας και απαιτείται η αξιοποίηση μεγάλων ανεκμετάλλευτων δυναμικών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Οι λόγοι για τους οποίους τα συμβατικά καύσιμα δεν μπορούν να καλύψουν την αναμενόμενη ζήτηση που θα υπάρξει και έχει αρχίσει να προδιαγράφεται είναι κυρίως δύο, αν παραλείψουμε τον προφανές αντίκτυπο που θα είχαν ως προς το περιβάλλον. Πρώτον, οι πόροι αυτοί, όπως το πετρέλαιο και ο άνθρακας τείνουν να εξαντληθούν. Ακόμα και με βάση τις σύγχρονες προσπάθειες αξιοποίησης όλων

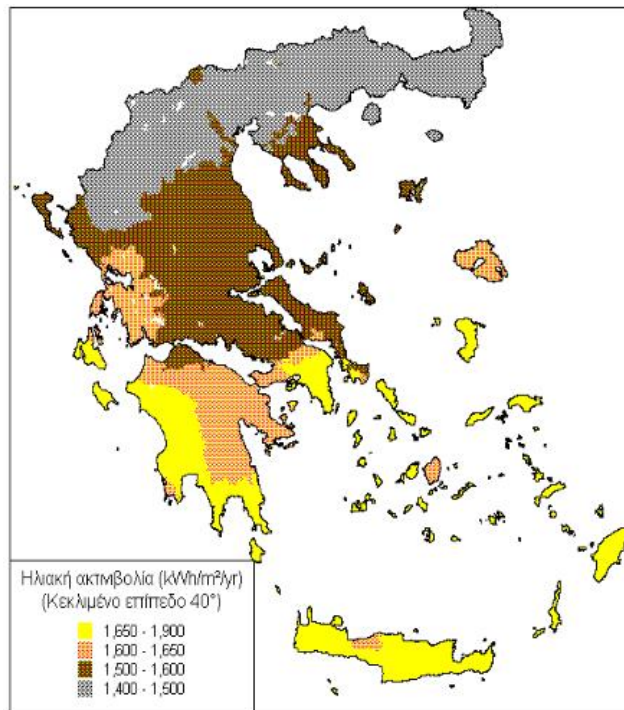
των διαθέσιμων κοιτασμάτων, όπως πχ. τα σχιστολιθικά, οι περισσότερες εκτιμήσεις συγκλίνουν ότι εντός των επόμενων 100 ετών δεν θα υπάρχει άλλο διαθέσιμο πετρέλαιο[4]. Το δεύτερο πρόβλημα είναι ότι πλέον η ζήτηση αρχίζει να μεταφέρεται σε μέρη όπου δεν υπάρχουν άμεσα διαθέσιμοι αυτοί οι φυσικοί πόροι, καθιστώντας την μεταφορά τους για κατανάλωση αν όχι αδύνατη σε πολλές περιπτώσεις, τουλάχιστον ασύμφορη. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα της Αυστραλίας, η οποία δεν διαθέτει κοιτάσματα άνθρακα και τα μεταφέρει με πλοία. Η ηλιακή ενέργεια λύνει και τα δύο αυτά προβλήματα, καθώς είναι πρακτικά άπειρη και βρίσκεται παντού.

Προκειμένου να επιτευχθούν οι φιλόδοξοι στόχοι που τέθηκαν κατά την πρόσφατη Σύνοδο για την Κλιματική Αλλαγή στο Παρίσι (COP 21) [5] αλλά και για να αντιμετωπιστεί το ενεργειακό πρόβλημα, η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας κρίνεται καθοριστικός παράγοντας, ιδιαίτερα δε από τους οικιακούς καταναλωτές. Το κομμάτι των συγκεντρωτικών συλλεκτών με φωτοβολταϊκά (PVT) συνεπώς κρίνεται ότι θα γνωρίσει ιδιαίτερη ανάπτυξη τα επόμενα χρόνια, καθώς παρουσιάζει ορισμένα βασικά πλεονεκτήματα που το καθιστούν εξαιρετικά ανταγωνιστικό. Πρωτίστως, συνδυάζει δύο ευρέως χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες, με τις οποίες οι καταναλωτές είναι εξοικειωμένοι, αυτή της παραγωγής ζεστού νερού χρήσης και ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση του όγκου της εγκατάστασης εν συγκρίσει με την τοποθέτηση των δύο αυτών συστημάτων μεμονωμένα, ή ισοδύναμα την αύξηση της διαθέσιμης επιφάνειας, ενώ παράλληλα επιτυγχάνεται εξοικονόμηση χρημάτων από το κόστος εγκατάστασης τους. Δευτερεύοντος, ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να οδηγήσει στη βελτιστοποίηση της ηλεκτρικής παραγωγής από τα φωτοβολταϊκά πάνελ, λόγω της χαμηλότερης θερμοκρασίας λειτουργίας τους, μειώνοντας το χρόνο αποπληρωμής της εγκατάστασης [6]. Συνεπώς τα συστήματα αυτά παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον μελέτης.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ένα ακόμα στοιχείο το οποίο είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρον και αφορά το ηλιακό δυναμικό. Ως ηλιακό δυναμικό ορίζεται το σύνολο της ηλιακής ενέργειας το οποίο είναι διαθέσιμο σε μια περιοχή. Η Ελλάδα είναι μια από τις χώρες με το πλουσιότερο ηλιακό δυναμικό στην Ευρώπη, έχοντας έως και δύο φορές περισσότερη διαθέσιμη ενέργεια ανά τετραγωνικό επιφάνειας από χώρες της βόρειας Ευρώπης. Αυτό καθιστά την ηλιακή ενέργεια οικονομικά εκμεταλλεύσιμη και εν συνεχεία μια ελκυστική επένδυση για την χώρα μας.



Σχήμα 1 – Το ηλιακό δυναμικό της Ευρώπης[7]



Σχήμα 2 – Το ηλιακό δυναμικό της Ελλάδας [8]

## 1.2 Παρουσίαση κεφαλαίων

Η παρούσα διπλωματική εργασία είναι δομημένη σε πέντε κεφάλαια. Ακολουθεί μια συνοπτική παρουσίαση των επιμέρους αυτών κεφαλαίων.

- **Κεφάλαιο 1:** Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια εισαγωγή πάνω στην ηλιακή ενέργεια, στους τρόπους αξιοποίησης της, στο ενεργειακό ζήτημα που έχει προκύψει τα τελευταία χρόνια και στο γιατί τα συστήματα PVT συγκεντρωτικού συλλέκτη καθίστανται ελκυστικά.
- **Κεφάλαιο 2:** Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση της διεθνούς βιβλιογραφίας που αφορά την μελέτη συστημάτων PVT τα τελευταία χρόνια και των συμπερασμάτων που έχουν προκύψει από αυτή.
- **Κεφάλαιο 3:** Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι εξισώσεις που διέπουν τα φαινόμενα που θα μελετήσουμε για τον υπολογισμό της απόδοσης μιας εγκατάστασης PVT και ο αλγοριθμικός τρόπος επίλυσής τους.
- **Κεφάλαιο 4:** Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται παρουσίαση του τρόπου που θα εργαστούμε για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων και τον διαγραμματών της παρούσης εργασίας. Καθορίζονται οι παράμετροι λειτουργίας, οι στόχοι και τα σενάρια στα οποία θα εργαστούμε.
- **Κεφάλαιο 5:** Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από την παρούσα εργασία.

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

# 2

## *Βιβλιογραφική Ανασκόπηση*

### *2.1 Προκαταρκτική έρευνα και εφαρμογές*

Η βάση για την τεχνολογία των PVT συστημάτων τέθηκε από τα μέσα του 1970, όταν οι Wolf [9], Florschuetz [10][11], Kern και Russell [12] και Hendrie [13] παρουσίασαν την ιδέα αλλά και τα αποτελέσματα της χρήσης των PV συστημάτων με ψύξη, είτε με αέρα είτε με νερό. Ακολούθησαν το 1980 ερευνητικές δουλειές των Raghuraman και Cox [14], Braunstein και Kornfield [15] και Lalovic [16] σε συλλέκτες επίπεδης επιφανείας, καθώς και οι δουλειές των O'leary και Clements [17], Mbewe et al. [18], Al-Baali [19] και Hamdy et al. [20] για παραβολικούς συλλέκτες.

Ο Garg και οι συνεργάτες του πραγματοποίησαν αναλυτικές ερευνητικές και πειραματικές εργασίες πάνω στα PVT τόσο με τη χρήση νερού όσο και αέρα για περίπου 10 χρόνια [21][22][23], ενώ ανέπτυξαν και ένα μοντέλο για την μόνιμη κατάσταση ενός συστήματος PVT που θερμαίνει αέρα με ενσωματωμένο παραβολικό συλλέκτη. Ο Prakash [24] σύγκρινε ένα σύστημα PVT που χρησιμοποιούσε και αέρα και νερό και κατέληξε στο συμπέρασμα ότι ο χαμηλότερος βαθμός απόδοσης του συστήματος με αέρα οφείλεται στην πολύ χαμηλή μετάδοση θερμότητας ανάμεσα στον απορροφητή και στο ρεύμα αέρα. Οι Bergene και Lonvik [25] ασχολήθηκαν με ένα σύστημα PVT με νερό, βελτιστοποιώντας την διάμετρο των σωλήνων και τα πτερύγια και βρήκαν ότι η απόδοσή του κυμαίνεται στο 60-80%. Οι

Agarwal και Garg μελέτησαν επίσης και ένα σύστημα το οποίο είχε και δεξαμενή αποθήκευσης του παραγόμενου νερού [26].

Με τη χρήση του μοντέλου Hottel-Whillier, ο de Vries [27] μελέτησε την απόδοση σε μόνιμη κατάσταση διαφόρων συστημάτων PVT. Κατέληξε στο συμπέρασμα ότι το σύστημα με ένα κάλυμμα είναι καλύτερο τόσο από το σύστημα χωρίς κάλυμμα (το οποίο υστερεί στην θερμική απόδοση) αλλά και από αυτό με διπλό κάλυμμα (το οποίο υστερεί σε ηλεκτρική απόδοση). Από την άλλη, η εξεργειακή ανάλυση των Fujisawa και Tani [28] έδειξε ότι η πυκνότητα παραγωγής εξεργειας είναι ελαφρώς μεγαλύτερη για το σύστημα χωρίς κάλυμμα, αν λάβουμε υπόψη ότι η θερμική ενέργεια περιλαμβάνει αρκετή μη διαθέσιμη ενέργεια. Το συμπέρασμα ήταν ότι για εφαρμογές χαμηλής θερμοκρασίας, όπως για παράδειγμα η θέρμανση μιας πισίνας, προτείνεται το χαμηλού κόστους σύστημα χωρίς κάλυμμα, όμως σε περίπτωση που χρειάζεται προστασία από τον πάγο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί αντιψυκτικό το οποίο μειώνει το βαθμό απόδοσης το καλοκαίρι [29].

Ο Rockendorf et al. [30] προσομοίωσε μοντέλα θερμοηλεκτρικού συλλέκτη (παραγωγή ζεστού νερού και έπειτα ηλεκτρικής ενέργειας) και PVT στο TRNSYS και έδειξε ότι τα συστήματα PVT υπερτερούν πολύ στο βαθμό απόδοσης.

Η ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών την δεκαετία του 1990, τόσο για την παραγωγή καθαρής ενέργειας όσο και για την ενσωμάτωση συστημάτων σε κτήρια, οδήγησε πολλές ερευνητικές ομάδες να εξετάσουν διάφορα νέα συστήματα, όπως οι Clarke et al. [31], Moshfegh και Sandberg [32] και Brinkworth et al. [33].

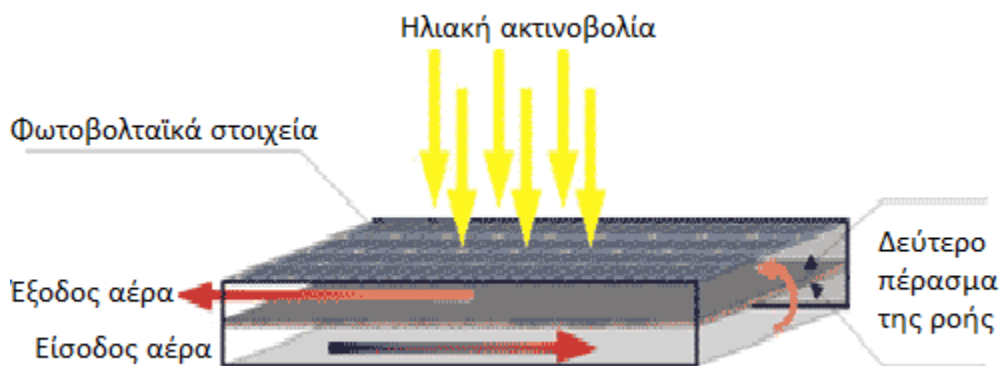
Οι Akbarzadeh και Wadowski [34] εξέτασαν συστήματα PVT με συλλέκτες, και πρότειναν ένα σύστημα με σωλήνες απαγωγής θερμότητας, το οποίο είχε λόγο συγκέντρωσης 20 και η θερμοκρασία του έφτανε τους 46°C με ψύξη, έναντι 84°C χωρίς. Επίσης, ο Luque et al. [35] ανέπτυξε το πρωτότυπο EUCLIDES το οποίο είχε συλλέκτες και ακολουθούσε την πορεία του ήλιου σε έναν άξονα.

Μια άλλη εναλλακτική για καλύτερη ψύξη και μεγαλύτερη παραγωγή ζεστού νερού που διερευνήθηκε ήταν αυτή των συστημάτων PVT με αντλία θερμότητας. Έτσι, ένα σύστημα PVT χρησιμοποιούνταν ως αντικαταστάτης του εξατμιστή. Έτσι, με χρήση του κύκλου Rankine, η ηλιακή ενέργεια που απορροφάτε στον συλλέκτη του PVT, αποδίδεται σε έναν υδρόψυκτο συμπυκνωτή σε μεγαλύτερη θερμοκρασία, ψύχοντας παράλληλα τα πάνελ. Επίσης, ο βαθμός απόδοσης της αντλίας αυξάνεται, αφού η θερμοκρασία εξάτμισης είναι μεγαλύτερη από αυτήν μιας αερόψυκτης μονάδας. Ο Ito et al. [36] κατασκεύασε ένα πρωτότυπο και τα πειραματικά αποτελέσματα ανέδειξαν έναν COP που άγγιζε το 6.0 για την αντλία θερμότητας και θερμοκρασία εξόδου νερού στους 40°C ενώ τα PV πάνελ δεν επηρέαζαν σημαντικά την θερμική απόδοση της εγκατάστασης, όμως η πολυπλοκότητα του ελέγχου του συστήματος μπορεί να αποδειχθεί πρόβλημα.



Γενικότερα, τα τελευταία 25 χρόνια η έρευνα επικεντρώθηκε στην βελτιστοποίηση του λόγου κόστους-απόδοσης και όχι στην βελτίωση της συνεργασίας του θερμικού και ηλεκτρικού τμήματος. Οι δε συλλέκτες με ψύξη με αέρα υιοθετήθηκαν σε μεγαλύτερο βαθμό από τον κατασκευαστικό κλάδο, παρά τον μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης των υδρόψυκτων λύσεων. Έτσι, τα συστήματα PVT με υγρό παραγκωνίσθηκαν, καθώς δεν μπορούσαν να καταστούν βιώσιμα λόγω του μικρού αριθμού πωλήσεων εν συγκρίσει με τα αερόψυκτα. Τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της τεχνολογίας PVT καθώς και η κατάσταση που διαμορφώνεται στην αγορά συνοψίζονται στις αναφορές της International Energy Agency [37] και Swiss Federal Office [38].

## 2.2 Συστήματα PVT επίπεδου συλλέκτη



Σχήμα 3 – Συλλέκτης PVT αέρα με διπλού περάσματος [39]

### 2.2.1 Συστήματα για θέρμανση αέρα

Τα συστήματα PVT επίπεδου συλλέκτη που ψύχονται με αέρα παρέχουν μια απλή, αξιόπιστη και οικονομική λύση. Επίσης, ο αέρας μπορεί να θερμανθεί σε διαφορετικές θερμοκρασίες ανάλογα με το αν επιλέξουμε φυσική ή εξαναγκασμένη κυκλοφορία. Η εξαναγκασμένη κυκλοφορία έχει μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης, απαιτεί όμως τη χρήση φουσητήρα που μειώνει την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ. Ο Hegazy [40] μελέτησε την θερμική και ηλεκτρική συμπεριφορά τεσσάρων διαφορετικών σχεδίων. Συγκεκριμένα, το Mode 1 ήταν με το κανάλι αέρα πάνω από το PV πάνελ, το Mode 2 από κάτω, το Mode 3 πάνω και κάτω και το Mode 4 δύο περασμάτων. Η αριθμητική ανάλυση τον οδήγησε στο συμπέρασμα ότι το Mode 1 έχει το χαμηλότερο βαθμό απόδοσης ενώ τα άλλα 3 δίνουν παραπλήσιους βαθμούς απόδοσης, με το Mode 3 να έχει την χαμηλότερη ιδιοκατανάλωση.

Ο Tripanagnostopoulos et al. [41] πραγματοποίησε δοκιμές σε συστήματα PVT τόσο με ψύξη αέρα όσο και νερού. Το κόστος των συστημάτων, εν συγκρίσει με απλά PV πάνελ, ανερχόταν σε 5% παραπάνω για τα αερόψυκτα PVT και 10% για τα υδρόψυκτα. Κατόπιν δοκιμών, πρότεινε όταν οι συλλέκτες τοποθετούνται σε παράλληλες σειρές, να τοποθετούνται ενδιάμεσα χαμηλού κόστους ανακλαστές που αυξάνουν τον βαθμό απόδοσης του συστήματος. Τα πειράματα τους ανέδειξαν έναν βαθμό απόδοσης από 38% έως 75% για τους αερόψυκτους PVT και από 55% έως 80% για τους υδρόψυκτους αντίστοιχα, με τις μέγιστες τιμές να επιτυγχάνονται με την χρήση των ανακλαστών.

Οι Tonui και Tripanagnostopoulos [42] μελέτησαν με θεωρητικά μοντέλα την επίδραση που έχει η τοποθέτηση ενός μεταλλικού φύλλου στο μέσον του καναλιού αέρα καθώς και πτερυγία. Το αποτέλεσμα στο οποίο κατέληξαν ήταν ότι οι οικονομικές αυτές μετατροπές είναι πιο αποτελεσματικές για μικρά συστήματα έως 6m και μπορούν να εφαρμοστούν άμεσα σε υπάρχουσες εγκαταστάσεις. Την σημασία των πτερυγίων επιβεβαίωσε με την εργασία του και ο Othman et al. [43] τόσο αριθμητικά όσο και πειραματικά.

Ο Tiwari et al. [44] μελέτησε τον βαθμό απόδοσης για συλλέκτη δίχως κάλυμμα στην Ινδία και κατέληξε στη βέλτιστη παροχή αέρα, μήκος και βάθος αγωγού. Σε συνέχεια της εργασίας, οι Raman και Tiwari [45] κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το η κατασκευή διπλού περάσματος είναι πιο αποδοτική από αυτή του ενός, προς επιβεβαίωση των Sorian et al. [46] και Hegazy [47]. Επίσης, η ανάλυση κύκλου ζωής που κάνανε ανέδειξε μια χρονική περίοδο ενεργειακής αποπληρωμής 2 ετών.

Ο Dubey et al. [48] μελέτησε διαφορετικούς συνδυασμούς PV πάνελ, από γυαλί σε γυαλί και από γυαλί σε PVF (Polyvinyl Fluoride) και κατέληξε σε σχέσεις για τον ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης με και χωρίς ροή αέρα, με βάση τις συνθήκες περιβάλλοντος. Πειράματα του πανεπιστημίου του Delhi κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι τα πάνελ από γυαλί σε γυαλί μπορούν να επιτύχουν μεγαλύτερες θερμοκρασίες στο ρεύμα αέρα καθώς και βαθμούς απόδοσης, διότι η προσπίπτουσα στην επιφάνεια που δεν καλύπτεται από PV στοιχεία ακτινοβολία διαπερνά το γυαλί και καταλήγει απευθείας στο πίσω κάλυμμα. Η εργασία αυτή κατέληξε σε σχέσεις για πολλούς PVT συλλέκτες αέρα στη σειρά καθώς και μεθοδολογία για την δοκιμή τους [49].

Ο Tripanagnostopoulos et al. [50] παρουσίασε ένα σύστημα που λειτουργούσε με δύο ρευστά (αέρα και νερό), σε συνέχεια προηγούμενων ερευνών του. Μελέτησε τρεις θέσεις τοποθέτησης του εναλλάκτη μέσα στο κανάλι του αέρα με την βέλτιστη να είναι αυτή κοντά στην πίσω πλευρά του PV πάνελ. Η υλοποίηση αυτή είχε ως αποτέλεσμα την μείωση του χρόνου αποπληρωμής από 25 χρόνια για ένα απλό πάνελ σε 10-15 χρόνια.

Παρόμοια υλοποίηση ανέπτυξε ο Assoa et al. [51], με το σύστημα να συνδυάζει την προθέρμανση αέρα και την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης. Επίσης, ανέδειξε ένα σύστημα που επιτρέπει

την τοποθέτηση των PV και του ηλιακού συλλέκτη σε διαφορετική θέση, με αποτέλεσμα ακόμα μεγαλύτερη παραγωγή ζεστού νερού χρήσης, για αποφυγή χρήσης άλλων μεθόδων παραγωγής ζεστού νερού. Η παραμετρική ανάλυση του συστήματος αυτού ανέδειξε βαθμούς απόδοσης που μπορούσαν να φτάσουν ακόμα και το 80% υπό ιδανικές συνθήκες.

Όπως προαναφέρθηκε, τα συστήματα επίπεδου συλλέκτη με θέρμανση αέρα είναι τα πιο διαδεδομένα στον κατασκευαστικό τομέα. Τοποθετούνται στην πρόσοψη ή την οροφή του κτηρίου και παράγουν τόσο ηλεκτρική ενέργεια όσο και ζεστό αέρα για θέρμανση χώρων. Ο Ji et al. [52] μελέτησε αριθμητικά την ηλεκτρική απόδοση της τοποθέτησης PV πάνελ στην πρόσοψη κτηρίου με διάκενο από τον τοίχο στο Hong Kong. Το αποτέλεσμα ήταν ότι αν και η επίδραση στον ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης ήταν μικρή, η μετάδοση θερμότητας από την πρόσοψη στο εσωτερικό του κτηρίου μειώθηκε σημαντικά. Σε μια παρόμοια έρευνα, ο Yang et al. [53] μελέτησε την ίδια εγκατάσταση για 3 διαφορετικές πόλεις στην Κίνα και βρήκε ότι το ψυκτικό φορτίο του κτηρίου για μια τυπική ημέρα μειώθηκε από 33% έως 52%.

Ο Chow et al. [54] μελέτησε την τοποθέτηση αερόψυκτης πρόσοψης σε ξενοδοχείο στο Macau το οποίο κλιματίζεται 24 ώρες το εικοσιτετράωρο, για δύο περιπτώσεις, μία με θέρμανση αέρα του εσωτερικού χώρου (για τους χειμερινούς μήνες) και μία με θέρμανση αέρα από το εξωτερικό περιβάλλον και απόρριψή του (για τους καλοκαιρινούς μήνες). Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης αυτής ήταν ότι ο βαθμός απόδοσης δεν βελτιώνεται καθώς υπάρχει αντιστροφή της ροής κατά της νυκτερινές ώρες, εξαιτίας του κλιματισμού, με αποτέλεσμα την αύξηση του ψυκτικού φορτίου. Συνεπώς, σημαντικό ρόλο στην εφαρμογή διαδραματίζει το κλίμα και οι ανάγκες του κτηρίου.

Εξαιτίας της πολυπλοκότητας του υπολογισμού των θερμικών φορτίων σε ένα σύστημα PVT (τυρβώδης και στρωτή ροή, αν είναι διαφανές κτλ.), σημαντικό τμήμα της έρευνας έχει κατευθυνθεί στην δημιουργία υπολογιστικών μοντέλων. Οι Sandberg και Moshfegh [55] παρουσίασαν αναλυτικές σχέσεις για την ροή ψυκτικού, την ταχύτητα και την θερμοκρασία κατά μήκος του αγωγού. Πειράματα που διεξήχθησαν έδειξαν ικανοποιητική προσέγγιση για ροή σε κλειστό αγωγό, αλλά μικρότερη ακρίβεια για αγωγό με ανοικτά άκρα. Ο Mittelman et al. [56] εισήγαγε μια γενικευμένη συσχέτιση του αριθμού Nusselt του αγωγού για την μετάδοση θερμότητας με συναγωγή και ακτινοβολία μέσω μιας ανάλυσης CFD που προσέγγιζε καλύτερα τον αγωγό με ανοικτά άκρα.

Ο Mei et al. [57] διεξήγαγε μια δυναμική θερμική προσομοίωση ενός συστήματος PVT σε πρόσοψη κτηρίου στο TRNSYS, με επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων από πειραματικά δεδομένα κτηρίου στην Ισπανία. Στη συνέχεια υπολόγισε τα θερμικά και ψυκτικά φορτία κτηρίων σε διάφορες πόλεις της Ευρώπης. Το αποτέλεσμα που προέκυψε ήταν ότι ενώ για ένα κτήριο στην Βαρκελώνη η εξοικονόμηση ενέργεια φτάνει το 12% το χειμώνα, στην Στουτγάρδη της Γερμανίας και το Λόουμπορου

του Ηνωμένου Βασιλείου φτάνει μόλις το 2%. Συνεπώς, οι βορειότερες πόλεις απαιτούν συστήματα με μεγαλύτερο πλήθος συλλεκτών για βιώσιμη εξοικονόμηση ενέργειας.

Ο Crawford et al. [58] συνέκρινε το χρόνο ενεργειακής αποπληρωμής ενός συστήματος PVT που χρησιμοποιούνταν για προθέρμανση αέρα με δύο άλλα συστήματα που είχαν και σύστημα αποθήκευσης της δεσμευόμενης ενέργειας, στο Σύδνεϋ της Αυστραλίας. Το αποτέλεσμα ήταν ότι ο χρόνος για τα συστήματα που είχαν σύστημα αποθήκευσης ανερχόταν σε 4-9 και 6-14 έτη, ενώ για το συμβατικό σύστημα 12-16.5 έτη, πράγμα που σημαίνει υποδιπλασιασμό της χρονικής περιόδου.

## 2.2.2 Συστήματα για θέρμανση νερού

Όσον αφορά τα συστήματα που ψύχονται με νερό, ο Zondag et al. [59] ανέπτυξε μια γκάμα από μοντέλα προσομοίωσης για την μόνιμη κατάσταση. Τα μοντέλα αυτά αφορούν την μονοδιάστατη, δισδιάστατη αλλά και τρισδιάστατη μοντελοποίηση ενός επίπεδου PVT συλλέκτη και η ακρίβεια τους επιβεβαιώθηκε από πειραματικά δεδομένα, με την απόκλιση να βρίσκεται εντός του 5% σε όλες τις περιπτώσεις. Στη συνέχεια, συνέκριναν την καμπύλη απόδοσης από εννέα διαφορετικά μοντέλα PVT. Προέκυψε λοιπόν ότι ο θερμικός βαθμός απόδοσης για συλλέκτη δίχως κάλυμμα ήταν 52% ενώ με ένα κάλυμμα ήταν 58%, ενώ για τον συλλέκτη με το κανάλι του νερού πάνω από το PV πάνελ ήταν 65% αντίστοιχα. Όσον αφορά την ετήσια παραγωγή νερού, ο συλλέκτης μονού καλύμματος με το νερό να ρέει κάτω από το PV πάνελ φαίνεται να είναι η καλύτερη επιλογή, ενώ το οικονομικό σχέδιο με μονό κάλυμμα και το νερό να ρέει σε σωλήνες κάτω από το πάνελ είναι μια καλή εναλλακτική με μόνο 2% χαμηλότερη απόδοση. Για δε παραγωγή νερού σε χαμηλή θερμοκρασία, προτείνεται ο συλλέκτης δίχως κάλυμμα, καθώς έτσι δεν υπάρχουν απώλειες ανάκλασης στο κάλυμμα ενώ λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας οι απώλειες κορυφής είναι ελάχιστες.

Οι Sandnes και Rekstad [60] μελέτησαν την ενεργειακή απόδοση ενός PVT συλλέκτη με c-Si φωτοβολταϊκά πάνελ, με ή χωρίς κάλυμμα, επικολημένο σε έναν θερμικό απορροφητή από πολυμερές. Η άλλη επιφάνεια ήταν βαμμένη με μαύρο χρώμα, με συντελεστή απορρόφησης 0.94, το οποίο του επέτρεπε να λειτουργεί και ως απλός ηλιακός συλλέκτης αν το γυρίσουν ανάποδα. Τα κανάλια του απορροφητή ήταν επικαλυμμένα με κεραμικούς κόκκους ώστε να βελτιωθεί η μετάδοση θερμότητας στο ρευστό. Η ανάλυση έδειξε ότι η παρουσία PV πάνελ μείωσε τον θερμικό βαθμό απόδοσης κατά 10% ενώ η παρουσία καλύμματος μειώνει τον οπτικό βαθμό απόδοσης κατά 5%.

Ο Chow [61] εισήγαγε ένα μοντέλο για την ανάλυση απλού συλλέκτη με σωλήνες και μονό κάλυμμα. Στη συνέχεια μελέτησε την συμπεριφορά του συστήματος για μεταβλητή προσπίπτουσα ακτινοβολία και διεξήγαγε δοκιμές ευαισθησίας. Η ανάλυση της μόνιμης κατάστασης ανέδειξε την

μεγάλη επίδραση που έχει η καλή θερμική επαφή ανάμεσα στα PV πάνελ και στον απορροφητή, καθώς και ανάμεσα στον απορροφητή και τις σωλήνες του νερού.

Ομοίως, η δουλειά του Zakherchenko et al. [62] ανάδειξε επίσης την σημασία της καλής θερμικής επαφής ανάμεσα στον απορροφητή και τα φωτοβολταϊκά πάνελ και, συνεπώς, το ότι συμβατικά εμπορικά πάνελ δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται σε διατάξεις PVT. Επίσης, παρατήρησαν ότι η επιφάνεια του φωτοβολταϊκού θα πρέπει να είναι μικρότερη από την επιφάνεια του απορροφητή και θα πρέπει να τοποθετείται κατά προτίμηση κοντά στο σημείο εισόδου του νερού. Επ' αυτού, οι Dybey και Tiwari [63] εξέτασαν την απόδοση ενός αυτόνομου συλλέκτη PVT με ένα κάλυμμα που το 25% αυτού καλύπτονταν από φωτοβολταϊκά πάνελ και κατέληξαν στο ότι μπορεί να επιτευχθεί καλύτερη θερμική και ηλεκτρική απόδοση αν τα πάνελ τοποθετηθούν στην είσοδο του νερού.

Ο Kalogirou [64] μοντελοποίησε ένα σύστημα PVT με κυκλοφορητή, δεξαμενή αποθήκευσης, μπαταρίες και σύστημα ελέγχου με το πρόγραμμα TRNSYS. Στη συνέχεια, οι Kalogirou και Tripanagnostopoulos [65] μελέτησαν οικιακά συστήματα PVT με νερό τόσο φυσικής όσο και εξαναγκασμένης κυκλοφορίας. Η προσομοίωσή τους κάλυπτε 12 περιπτώσεις με δύο ειδών PV πάνελ (pc-Si και a-Si) σε τρεις πόλεις, τη Λευκωσία (35°N), την Αθήνα (38°N) και το Madison (43°N) των Ηνωμένων Πολιτειών. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ενώ η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για τα πάνελ από pc-Si είναι μεγαλύτερη, τα πάνελ a-Si προσφέρουν μεγαλύτερη παραγωγή θερμικής ενέργειας, με καλύτερο λόγο απόδοσης/κόστους λόγω της χαμηλότερης τιμής τους. Σε παρόμοια συμπεράσματα κατέληξαν και για βιομηχανικές χρήσεις [66].

Βασίζόμενος στη δουλειά του de Vries, ο Vokas et al. [67] ανέλυσε θεωρητικά τη χρήση PVT με νερό για οικιακές εγκαταστάσεις θέρμανσης και ψύξης σε τρεις πόλεις με διαφορετικά κλίματα (Αθήνα, Θεσσαλονίκη και Ηράκλειο). Η θερμική απόδοση του συστήματος PVT ήταν περίπου 9% χαμηλότερη από αυτή ενός συμβατικού ηλιακού συλλέκτη, συνεπώς η τοποθέτηση των PV πάνελ επηρεάζει πολύ λίγο την θερμική απόδοση. Η διαφορά κάλυψης των θερμικών αναγκών ανάμεσα σε ένα σύστημα PVT και έναν συμβατικό συλλέκτη είναι μόλις 7%, ποσοστό όμως που επηρεάζεται αναλόγως του γεωγραφικού πλάτους.

Ο Saitoh et al. [68] στην Ιαπωνία μελέτησε πειραματικά την απόδοση ενός συστήματος PVT με ένα κάλυμμα και σωλήνες για το ρευστό (propylene glycol). Για σταθερή θερμοκρασία και παροχή, η ηλεκτρική απόδοση ήταν περίπου 10-13% και η θερμική απόδοση του συλλέκτη 40-50%. Ο συνολικός βαθμός απόδοσης είναι περίπου ίσος με τον θερμικό. Για ένα σπίτι στο Hokkaido της Ιαπωνίας, όπου η προσπίπτουσα ακτινοβολία είναι μειωμένη, κατέληξε σε ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης 8-9% και θερμικό 25-28%, ενώ ο χρόνος αποπληρωμής ήταν 2.1 χρόνια για την ενέργεια, 0.9 χρόνια για τα αέρια του θερμοκηπίου και 35.2 χρόνια για την οικονομική περίοδο αποπληρωμής της εγκατάστασης.

Βασιζόμενοι σε θεωρητικά μοντέλα, οι Dubey και Tiwari [69] στην Ινδία, ανέλυσαν την θερμική και ηλεκτρική απόδοση μιας εγκατάστασης PVT νερού μεταβάλλοντας τον αριθμό των συλλεκτών, τον τρόπο σύνδεσής τους και τις καιρικές συνθήκες. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι, για δεδομένη παροχή, για μεγιστοποίηση της παραγωγής ζεστού νερού χρήση, είναι προτιμότερη η μερική κάλυψη του συλλέκτη με PV πάνελ. Επίσης έγινε βελτιστοποίηση με βάση τα οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη [70].

Σημαντικό ρόλο στα συστήματα PVT νερού διαδραματίζει και η επιλογή των υλικών του απορροφητή. Η συνήθης επιλογή είναι η χρήση σωλήνων κάτω από μια μεταλλική πλάκα, όμως η εναλλακτική της χρήσης σύνθετων πολυμερών προσφέρει πλεονεκτήματα. Συγκεκριμένα, μείωση του βάρους που οδηγεί σε μείωση των απαιτήσεων σε υλικά βάσης κτλ. και σε ευκολότερη εγκατάσταση, ευκολότερη κατασκευή και τέλος μείωση του κόστους λόγω των παραπάνω. Όμως υπάρχουν αντίστοιχα και μειονεκτήματα, όπως η μικρότερη θερμική αγωγιμότητα, η θερμική διαστολή αλλά και η χημική σταθερότητα του υλικού και το περιορισμένο θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας.

Ο Huang et al. [71] μελέτησε ένα σύστημα PVT νερού με αντλία και δοχείο αποθήκευσης, το οποίο ήταν κατασκευασμένο από εμπορικά φωτοβολταϊκά πάνελ συγκολλημένα με αυλακωτό πολυανθρακικό πολυμερές το οποίο είχε κανάλια ορθογωνικής διατομής για το νερό. Το αποτέλεσμα ήταν ένας θερμικός βαθμός απόδοσης της τάξης του 38% και ηλεκτρικός 9%, με τον συνολικό βαθμό απόδοσης να φτάνει το 60%.

Αναγνωρίζοντας τους περιορισμούς της απλής πλάκας απορρόφησης με σωλήνες σε ένα σύστημα PVT, το πανεπιστήμιο του Hong Kong και το πανεπιστήμιο επιστήμης και τεχνολογίας της Κίνας ανέπτυξαν από κοινού μια πλάκα απορροφητή από κράμα αλουμινίου με κανάλια για το νερό, και το σύστημα που κατασκεύασαν στη συνέχεια το δοκίμασαν σε διάφορες κλιματικές συνθήκες για το Hong Kong και την Hefei [72]. Οι πειραματικές μετρήσεις έδειξαν ότι το σύστημα δουλεύει αποτελεσματικά, με την διαφορά ανάμεσα στην μπροστινή και την πίσω επιφάνεια του απορροφητή να είναι μόλις 1°C. Ακόμα, προσομοιώσεις που έκαναν έδειξαν ότι το σχέδιο μπορεί να βελτιστοποιηθεί ακόμα περισσότερο αν μειώσουν το ύψος των καναλιών και αυξήσουν την πυκνότητά τους [73]. Με τη χρήση των κλιματικών δεδομένων του Hong Kong, υπολόγισαν ένα χρόνο αποπληρωμής 12 ετών, ο οποίος ήταν συγκρίσιμος με την εγκατάσταση των μεμονωμένων συστημάτων φωτοβολταϊκών και ηλιακού απορροφητή, αλλά και καλύτερος από αυτόν μόνο των πάνελ που ήταν 52 χρόνια [74].

Ο Christofari et al. [75] ανέπτυξε ένα μοντέλο πεπερασμένων διαφορών για την μελέτη ενός PVT συλλέκτη με νερό από πολυανθρακικό απορροφητή και πάνελ pc-Si. Νερό εξαναγκασμένης κυκλοφορίας έρρεε με πολύ μικρή παροχή (και συνεπώς αμελητέα ισχύ αντλίας) σε τετραγωνικά κανάλια στον απορροφητή. Το σύστημα σχεδιάστηκε για την κάλυψη των αναγκών για μια κατοικία στην πόλη

Ajaccio της Γαλλίας. Ο μέσος ετήσιος θερμικός βαθμός απόδοσης ήταν 55.5%, ο ηλεκτρικός 12.7% και ο συνολικός 68.2%.

Όσον αφορά τα συστήματα PVT με νερό για χρήση σε κατασκευές κτηρίων, η ερευνα δεν είναι τόσο δημοφιλής όσο στο κομμάτι των αερόψυκτων PVT. Ο Ji et al. [76] μελέτησε αριθμητικά την ετήσια απόδοση ενός συστήματος PVT με νερό για πρόσοψη κτηρίων στο Hong Kong. Η κατανάλωση της αντλίας θεωρήθηκε αμελητέα. Θεωρώντας ισοτροπικές συνθήκες για τον ουρανό βρήκε ότι ο θερμικός βαθμός απόδοσης για ένα σύστημα τοποθετημένο στην δυτική πρόσοψη κτηρίου ήταν 47.6% για πάνελ τύπου φιλμ και 43.2% για πάνελ c-Si, ενώ οι ηλεκτρικοί βαθμοί απόδοσης ήταν 4.3% και 10.3% αντίστοιχα. Η μείωση του θερμικού κέρδους για το κτήριο υπολογίστηκε σε 53.0% και 59.2% αντίστοιχα.

Με βάση το μοντέλο των Hottel-Whillier, ο Chow et al. [77] μελέτησε στο TRNSYS την εγκατάσταση ενός συστήματος στην πρόσοψη πολυκατοικίας στο Hong Kong για την δυτική και την βόρεια πλευρά. Μέρος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας απορροφούταν από τις δύο αντλίες του συστήματος. Ο καθαρός θερμικός βαθμός απόδοσης ήταν 30% και ο αντίστοιχος ηλεκτρικός 5.4%. Στη συνέχεια, ο Chow et al. [78] κατασκεύασε ένα πειραματικό σύστημα στην βορειοδυτική πρόσοψη ενός κτηρίου. Το αποτέλεσμα ήταν ένας θερμικός βαθμός απόδοσης 39% και 8.6% ηλεκτρικός. Ο τοίχος στον οποίο τοποθετήθηκε το σύστημα είχε πολύ μικρότερες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας του ενώ το ψυκτικό φορτίο του χώρου ελαττώθηκε κατά 50% το καλοκαίρι.

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα, ο Chow et al. [79] ανέπτυξε ένα μοντέλο για το παραπάνω σύστημα, το οποίο και επιβεβαίωσε για την ορθότητα των αποτελεσμάτων του. Στη συνέχεια, υπολόγισε την απόδοση του συστήματος αυτού για το Hong Kong, αφού πρώτα το τροποποίησε ώστε να αφαιρεθεί η αντλία, μειώνοντας περαιτέρω το κόστος του συστήματος και την ιδιοκατανάλωσή του [80]. Ο χρόνος αποπληρωμής του ήταν 14 χρόνια, περίπου το ένα τρίτο από αυτό μιας απλής αερόψυκτης πρόσοψης.

Χρήση συστημάτων PVT με νερό γίνεται και για την ενσωμάτωσή τους με μια αντλία θερμότητας. Η αρχή λειτουργίας είναι όμοια με αυτή των αερόψυκτων συστημάτων PVT. Ο Ji et al. [81] μελέτησε την χρήση αντλίας θερμότητας μεταβλητών στροφών στην Κίνα. Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποίησε δεν είχε κάλυμμα ενώ χρησιμοποιούσε ως ψυκτικό μέσο το R-22. Για την πόλη Hefei της Κίνας που έγιναν τα πειράματα, ο μέγιστος COP για μια χειμερινή μέρα ήταν 10.4 ενώ ο μέσος 5.4, για νερό θερμοκρασίας 20°C στο συμπυκνωτή. Στη συνέχεια ανέπτυξε μαθηματικά μοντέλα με βάση τα αποτελέσματα αυτά [82]. Με βάση τα μοντέλα αυτά, η προσομοίωση έδειξε ότι για νερό 30°C και σταθερή παροχή και ταχύτητα συμπίεστη, ο βαθμός απόδοσης της διάταξης εξάτμισης ήταν 0.64-0.87, ο θερμικός βαθμός απόδοσης 0.53-0.64 και ο ηλεκτρικός 0.124-0.135. Ο μέγιστος COP της εγκατάστασης ήταν 8.4 ενώ ο μέσος 6.5, αποτελέσματα εμφανώς βελτιωμένα σε σχέση με ένα συμβατικό σύστημα αντλίας θερμότητας.

Ο Pei et al. [83] μελέτησε την επίδραση του καλύμματος στην απόδοση του συστήματος. Ενώ το καλοκαίρι το κάλυμμα για τον εξατμιστή δεν είναι απαραίτητο, το χειμώνα με την θερμοκρασία περιβάλλοντος να είναι αρκετά χαμηλότερη της θερμοκρασίας εξατμίσσης, οι θερμικές απώλειες κορυφής δεν είναι πλέον αμελητέες. Το συμπέρασμα ήταν ότι ενώ υπάρχει μια μείωση στην απόδοση του PV, τόσο ο θερμικός βαθμός απόδοσης όσο και ο COP της εγκατάστασης αυξήθηκαν σημαντικά με τη χρήση καλύμματος, καθιστώντας ευεργετική την ύπαρξη καλύμματος για τους χειμερινούς μήνες, ειδικά δε λόγω των αυξημένων αναγκών σε θέρμανση που υπάρχουν.

### ***2.3 Συστήματα PVT συγκεντρωτικού συλλέκτη***

Η χρήση των συγκεντρωτικών συλλεκτών αντί των συλλεκτών επιπέδου επιφανείας καθιστά δυνατή την αύξηση της συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας. Η μέθοδος αυτή είναι υποσχόμενη λόγω του σημαντικά μειωμένου κόστους των ανακλαστών έναντι των φωτοβολταϊκών πάνελ. Έτσι μπορούν να χρησιμοποιηθούν πάνελ μεγαλύτερου βαθμού απόδοσης που μπορούν να ανταπεξέλθουν σε μεγαλύτερη ένταση ρεύματος, τα οποία όμως είναι ακριβότερα από τα απλά πάνελ. Επιπλέον, το κόστος μπορεί να αυξηθεί από την χρήση σύνθετων μηχανισμών για την παρακολούθηση του ήλιου από την εγκατάσταση κατά τη διάρκεια της ημέρας [84]. Ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται στην διασύνδεση των πάνελ του συστήματος για την ελαχιστοποίηση των ηλεκτρικών απωλειών [85]. Επίσης, το κύκλωμα του ψυκτικού υγρού πρέπει να σχεδιασθεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε να διατηρεί την θερμοκρασία ομοιόμορφη, να μειώνει τις απώλειες που μεταφράζονται σε απώλειες ιδιοκαταναλώσεων της αντλίας και να είναι αξιόπιστο.

Οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες με τη χρήση ανακλαστών ή φακών μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες: μονών κελιών, γραμμικής γεωμετρίας και υψηλής πυκνότητας. Για υψηλός συγκεντρωτικά συστήματα, μεγαλύτερη επιφάνεια συγκεντρωτικού υλικού απαιτείται ανά μονάδα επιφανείας απορροφητή. Η χρήση φακών είναι πιο συμφέρουσα αφού έχουν χαμηλότερο κόστος και μικρότερο βάρος, όμως τα συστήματα που χρησιμοποιούν φακούς δεν μπορούν να αξιοποιήσουν την διάχυτη ακτινοβολία, περιορίζοντας την χρήση τους σε μέρη όπου επικρατούν συνθήκες υψηλής αιθριότητας. Από την άλλη, η χρήση υγρού ως ψυκτικό μέσο είναι πιο αποτελεσματική από την χρήση αέρα για την επίτευξη μεγαλύτερης ηλεκτρικής παραγωγής. Για τους λόγους αυτούς, η χρήση συγκεντρωτικών συστημάτων PVT με ανακλαστές είναι συχνή για εφαρμογές μέσης και υψηλής θερμοκρασίας, όπως για ψύξη, αφαλάτωση και άλλες βιομηχανικές διεργασίες. Για χαμηλότερες θερμοκρασίες, ένας συλλέκτης επιπέδου επιφανείας αποδίδει καλύτερα από έναν συγκεντρωτικό συλλέκτη, με την απόδοση να συγκλίνει υπέρ του συγκεντρωτικού για όσο μεγαλύτερη θερμοκρασία επιθυμούμε. Αυτό συμβαίνει διότι για



μεγαλύτερες διαφορές θερμοκρασίες, η μεγάλη επιφάνεια του επίπεδου συλλέκτη έχει μεγαλύτερες θερμικές απώλειες.

Ο Rosell et al. [86] στην Lleida της Ισπανίας (41.7°N) κατασκεύασε ένα πρωτότυπο σύστημα PVT χαμηλής συγκέντρωσης με τον συνδυασμό ενός αδιαφανούς επιπέδου συλλέκτη με το κανάλι ψύξης κάτω από το PV πάνελ και γραμμικών συγκεντρωτών τύπου Fresnel που είχαν ένα σύστημα ελέγχου δύο αξόνων για παρακολούθηση της πορείας του ήλιου. Ο ολικός βαθμός απόδοσης βρέθηκε ότι ήταν πάνω από 60% για λόγους συγκέντρωσης άνω του 6.

Στην Αυστραλία, ο Coventry [87] σχεδίασε ένα σύστημα PVT με έλεγχο ενός άξονα, στο οποίο το νερό με αντιψυκτικό και αντιδιαβρωτικές προσμίξεις έρρεε γραμμικά δια μέσω σωλήνων αλουμινίου με πτερύγια. Με τη χρήση παραβολικών ανακλαστών με ανακλαστικότητα 92% και λόγο συγκέντρωσης 37, η ηλιακή ακτινοβολία συγκεντρωνόταν πάνω σε πάνελ c-Si (τα οποία είχαν περίπου 20% βαθμό απόδοσης υπό κανονικές συνθήκες) και τα οποία ήταν συγκολλημένα με τον απορροφητή αλουμινίου. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων έδειξαν ότι για τυπικές συνθήκες ο θερμικός βαθμός απόδοσης ήταν 58%, ο ηλεκτρικός 11% και ο συνολικός 69%.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι η θερμότητα δε μπορεί να μεταφέρεται αποτελεσματικά σε μεγάλες αποστάσεις, οι Kribus et al. [88] ανέπτυξαν ένα ιδιαίτερα μικρών διαστάσεων σύστημα PVT το οποίο μπορεί να εγκατασταθεί σε οποιαδήποτε οροφή. Με λόγο συγκέντρωσης 500, η αναγκαία επιφάνεια απορρόφησης μειώνεται κατά πολύ. Το σχέδιο αυτό βασίζεται σε ένα παραβολικό πιάτο, παρόμοιο με αυτό ενός δορυφορικού δέκτη, το οποίο είναι εύκολο να μεταφερθεί αλλά και να εγκατασταθεί χωρίς τη χρήση ειδικού εξοπλισμού.

Περαιτέρω μείωση του κόστους των συστημάτων αυτών μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση φύλλου αλουμινίου πάνω από ένα υπόστρωμα χάλυβα για τον ανακλαστή. Έτσι, συνδυάζονται οι καλές μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα με την υψηλή ανακλαστικότητα του αλουμινίου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την καλύτερη κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας πάνω στην συλλεκτική επιφάνεια, εν συγκρίσει με τη χρήση απλού χάλυβα, ιδιαίτερα σημαντικό στοιχείο για τοποθεσίες με μεγάλο γεωγραφικό πλάτος. Οι Nilsson et al. [89] στο πανεπιστήμιο του Lund, διεξήγαγαν μετρήσεις ενός ασύμμετρου παραβολικού ανακλαστή από ανοδιωμένο αλουμίνιο και από χάλυβα με επικάλυψη φύλλου αλουμινίου. Οι μετρήσεις τους έδειξαν ότι η χρήση του χάλυβα με φύλλο αλουμινίου για τον πίσω ανακλαστή δεν αλλάζει την παραγωγή ενέργειας. Επίσης, προτείνουν για εγκαταστάσεις με περιορισμένο χώρο την χρήση φωτοβολταϊκών πάνελ και στις δύο επιφάνειες του απορροφητή.

Οι Vorobiev et al. [90] [91] παρουσίασαν μια θεωρητική μελέτη για μια διβάθμια υβριδική συσκευή με συγκεντρωτικό συλλέκτη που χρησιμοποιεί PV πάνελ και έναν μετατροπέα θερμικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Στη συνέχεια μελέτησαν δύο επιλογές. Η πρώτη ήταν να υπάρχει διαχωρισμός

της ακτινοβολίας του ήλιου που μετατρέπεται σε θερμική, καθώς τα πάνελ δεν είναι σε θέση να απορροφούν όλα τα μήκη της ακτινοβολίας. Αυτό θα οδηγούσε σε μεγάλη μείωση της θερμοκρασίας λειτουργίας των πάνελ, πλην όμως απαιτεί την κατασκευή ειδικών πάνελ που επιτρέπουν στην υπέρυθη ακτινοβολία να τα διαπερνά και να μην την απορροφούν ως θερμότητα. Ο βαθμός απόδοσης όλης της συσκευής σε μια τέτοια περίπτωση θα ήταν περίπου 35-40% για συγκεντρώσεις έως 1500. Η δεύτερη επιλογή, δίχως τον διαχωρισμό αυτό, έδειξε ότι για συγκέντρωση περίπου 50, ο συνολικός βαθμός απόδοσης είναι περίπου 25-30%.

Μια άλλη πολύ σημαντική εφαρμογή των συγκεντρωτικών συλλεκτών είναι για χρήση σε διεργασίες που απαιτούν μεγάλη θερμοκρασία. Οι ψύκτες απορρόφησης νερού-βρωμιούχου λιθίου είναι μια από τις πιο υποσχόμενες τέτοιες εφαρμογές στον τομέα του κλιματισμού. Οι Mottelman et al. [92] μελέτησαν την εφαρμογή ενός συστήματος συγκεντρωτικού PVT σε έναν κύκλο ψύκτη απορρόφησης με θερμοκρασία αναγεννητή 65-120°C, με και χωρίς αποθήκευση ενέργειας. Τα PV πάνελ βασίζονταν στην τεχνολογία triple junction με βαθμό απόδοσης 37%. Θεωρώντας έναν τυπικό οπτικό βαθμό απόδοσης για το παραβολικό πιάτο της τάξης του 85%, οι υπολογισμοί τους έδειξαν ότι η μείωση του βαθμού απόδοσης των πάνελ δεν είναι σημαντική, παρά την υψηλή θερμοκρασία που απαιτείται. Με βάση λογικές οικονομικές παραδοχές, ένα σύστημα PVT μπορεί να είναι συγκρίσιμο ή ακόμα και οικονομικότερο από ένα συμβατικό σύστημα ψύξης/θέρμανσης.

Οι Mittelman et al. [93] επίσης πρότειναν ένα σύστημα αφαλάτωσης με τη χρήση παραβολικών συλλεκτών PVT, στο οποίο οι συλλέκτες συνδυάζονται σε ένα μεγάλης κλίμακας-πολλαπλής εξάτμισης σύστημα θερμικής αφαλάτωσης. Και σε αυτήν την περίπτωση, ένα μικρό παραβολικό πιάτο χρησιμοποιήθηκε ως συλλέκτης για τους υπολογισμούς. Ο ατμός που παραγόταν σε κάθε εξάτμιση συμπυκνωνόταν στον επόμενο, ο οποίος ήταν χαμηλότερης θερμοκρασίας, προσδίδοντας έτσι θερμότητα για περαιτέρω εξάτμιση. Επιπλέον ενέργεια προσδίδεται όπου χρειάζεται με τη χρήση απομαστεύσεων από εξάτμιστες μεγαλύτερης θερμοκρασίας. Η μέγιστη θερμοκρασία κυμαινόταν από 60 έως 80°C. Η προσομοίωση έδειξε ότι η εφαρμογή αυτή μπορεί να είναι ανταγωνιστική εν συγκρίσει με άλλες εφαρμογές αφαλάτωσης που χρησιμοποιούν επίσης τον ήλιο ως πηγή ενέργειας, ακόμα δε και με συστήματα αντίστροφης όσμωσης. Η χρήση κατόπτρων υψηλής συγκέντρωσης με πάνελ τεχνολογίας triple junction κάνει ακόμα πιο ανταγωνιστική την εν λόγω εφαρμογή, λόγω της μεγαλύτερης παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

### 2.3.1 Ο συγκεντρωτικός συλλέκτης Solarus V11



Σχήμα 4 – Σκαρίφημα του συλλέκτη Solarus V11

Στην παρούσα εργασία θα μελετηθεί ο ασύμμετρος συγκεντρωτικός συλλέκτης PVT της εταιρίας Solarus, το σκαρίφημα του οποίου φαίνεται στο παραπάνω σχήμα. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του είναι η χρήση ασύμμετρου ανακλαστή, που αποτελείται από ένα παραβολικό τμήμα και ένα τμήμα κύκλου, γεγονός που σημαίνει ότι η ηλιακή ακτινοβολία συγκεντρώνεται στο άκρο και όχι στο κέντρο και που επιτρέπει την μέγιστη παραγωγή θερμικής ενέργειας κατά τους χειμερινούς μήνες. Ο απορροφητής διαμέσου του οποίου ρέει το ψυκτικό υγρό είναι από αλουμίνιο και είναι και στις δύο του πλευρές επικαλυμμένος με φωτοβολταϊκά στοιχεία. Το κάτοπτρο του ανακλαστή είναι από ανοδιωμένο αλουμίνιο ενώ το μονό κάλυμμά του είναι από γυαλί χαμηλής περιεκτικότητας σε σίδηρο.

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

# 3

## *Μαθηματική διατύπωση*

### *3.1 Εξισώσεις ηλιακής ακτινοβολίας*

Για τον υπολογισμό της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στο επίπεδο της συσκευής μας θα εργαστούμε ως εξής:

Αρχικά θα υπολογίσουμε τα ηλιακά μεγέθη για την ημέρα και την ώρα που μας ενδιαφέρει [94] [95].

$$\text{Ηλιακή απόκλιση: } \delta = 23.45 * \sin\left(2\pi * \frac{284+n}{365}\right) \quad \text{εξ. 1}$$

$$\text{Ωριαία γωνία: } \omega = 15^\circ * (t - 12)$$

$$\text{Ωριαία γωνία δύσης και ανατολής: } \omega_{ss} = \cos^{-1}(-\tan\varphi * \tan\delta) \quad \text{εξ. 2}$$

Στη συνέχεια υπολογίζουμε την ηλιακή ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας [94]:

$$H_0 = \frac{86400 * G_{SC}}{\pi} * \left[1 + 0.033 * \cos\left(2\pi * \frac{n}{365}\right)\right] * (\cos\varphi * \cos\delta * \cos\omega_{ss} + \omega_{ss} * \sin\varphi * \sin\delta) \quad \text{εξ. 3}$$

Όπου  $G_{SC} = 1367 \text{ W/m}^2$  η ηλιακή σταθερά.

Στη συνέχεια, με βάση τον δείκτη αιθριότητας, που ορίζεται ως  $\bar{K}_T = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_0}$  (λόγος προσπίπτουσας ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου προς εκτός ατμόσφαιρας), θα υπολογίσουμε τον λόγο της διάχυτης προς ολικής ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου με βάση την σχέση των Collares-Perreira και Rabl [96]:

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = \begin{cases} 0.99 & \text{για } \bar{K}_T \leq 0.17 \\ 1.188 - 2.272 * \bar{K}_T + 9.473 * \bar{K}_T^2 - 21.865 * \bar{K}_T^3 + 14.648 * \bar{K}_T^4 & \text{για } 0.17 < \bar{K}_T \leq 0.75 \\ 0.54 * \bar{K}_T + 0.632 & \text{για } 0.75 < \bar{K}_T < 0.80 \\ 0.20 & \text{για } \bar{K}_T \geq 0.80 \end{cases} \quad \text{εξ. 3}$$

Εύκολα προκύπτει και η άμεση ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου ως:  $\bar{H}_b = \bar{H} - \bar{H}_d$  εξ. 4

Όμως απαιτείται ο ωριαίος προσδιορισμός της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Για τον λόγο αυτόν, θα εργαστούμε με βάση τις σχέσεις των Collares-Perreira και Rabl [96] για την ωριαία ακτινοβολία.

Λόγος ωριαίας προς ημερήσια ακτινοβολίας :

$$r_t = \frac{I}{H} = \frac{\pi}{24} * (a + b * \cos\omega) * \frac{\cos\omega - \cos\omega_{ss}}{\sin\omega_{ss} - \omega_{ss} * \cos\omega_{ss}} \quad \text{εξ. 5}$$

$$a = 0.409 + 0.5016 * \sin\left(\omega_{ss} - \frac{\pi}{3}\right) \quad \text{εξ. 6}$$

$$b = 0.6609 - 0.4767 * \sin\left(\omega_{ss} - \frac{\pi}{3}\right) \quad \text{εξ. 7}$$

Λόγος ωριαίας προς ημερήσια διάχυτης ακτινοβολίας:

$$r_d = \frac{I_d}{H_d} = \frac{\pi}{24} * \frac{\cos\omega - \cos\omega_{ss}}{\sin\omega_{ss} - \omega_{ss} * \cos\omega_{ss}} \quad \text{εξ. 8}$$

Συνεπώς, για κάθε ώρα της «μέσης ημέρας», για την ολική ακτινοβολία H και τις συνιστώσες της H<sub>d</sub> (διάχυτη) και H<sub>b</sub> (άμεση) ισχύουν:

$$H = r_t * \bar{H} \quad \text{εξ. 9}$$

$$H_d = r_d * \bar{H}_d \quad \text{εξ. 10}$$

$$H_b = H - H_d \quad \text{εξ. 11}$$

Για τον υπολογισμό της ωριαίας ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου για την μέση ημέρα του μήνα θα χρησιμοποιηθεί το απλό ιστροπικό μοντέλο των Duffie και Beckman [97]:

$$H_T = H_b * R_b + H_d * \left(\frac{1 + \cos\beta}{2}\right) + H * \rho * \left(\frac{1 - \cos\beta}{2}\right) \quad \text{εξ. 12}$$

όπου

$R_b = \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z}$  εξ. 13. ο λόγος της ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου προς οριζοντίου επιπέδου

$\cos\theta = \cos(90 - (\alpha + \beta))$  εξ. 14 η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας στο επίπεδο μας

$\alpha = \sin\delta * \sin\varphi + \cos\delta * \cos\varphi * \cos\omega$  εξ. 15 το ηλιακό ύψος και

$\cos\theta_z = \sin\alpha$  εξ. 16 η γωνία ζενίθ του ηλίου

Άρα έχουμε:

Άμεσος ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου:  $H_{bT} = H_b * R_b$  εξ. 17

Διάχυτος ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου:  $H_{dT} = H_d * \left(\frac{1 + \cos\beta}{2}\right)$  εξ. 18

### 3.2 Εξισώσεις μοντέλου συλλέκτη

Για τον υπολογισμό της οπτικής διαπερατότητας του καλύμματος θα χρησιμοποιηθεί η παρακάτω πειραματική σχέση από την διεθνή βιβλιογραφία [98] για ειδικά επεξεργασμένο γυαλί χαμηλής ανακλαστικότητας:

$$(\tau\alpha)_n = \text{Glass transmittance} = GT(\theta) = \frac{\frac{1 - R_S}{1 + R_S} + \frac{1 - R_P}{1 + R_P}}{2} \quad \text{εξ. 19}$$

$$R_S = \left(\frac{n_2 * \cos(\theta) - n_1 * \cos(t)}{n_2 * \cos(\theta) + n_1 * \cos(t)}\right)^2 \quad \text{εξ. 20}$$

$$R_P = \left(\frac{n_1 * \cos(\theta) - n_2 * \cos(t)}{n_1 * \cos(\theta) + n_2 * \cos(t)}\right)^2 \quad \text{εξ. 21}$$

$$t = \sin^{-1}\left(\frac{n_1 * \sin(\theta)}{n_2}\right) \quad \text{εξ. 22}$$

όπου  $n_1$  και  $n_2$  οι δείκτες διάθλασης του αέρα και του γυαλιού αντίστοιχα.

Συνεπώς, η προσπίπτουσα ακτινοβολία στα φωτοβολταϊκά πάνελ στο πάνω μέρος της συσκευής μας είναι:

$$H_{PV,f} = H_T * GT \quad \text{εξ. 23}$$

Ομοίως, για την ηλιακή ακτινοβολία που καταλήγει στον ανακλαστή, ο οποίος είναι σε θέση να εκμεταλλευτεί μόνο την άμεση, είναι:

$$H_{refl} = H_{bT} * GT \quad \text{εξ. 24}$$

Για τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας που καταλήγει στα φωτοβολταϊκά πάνελ στο κάτω μέρος του απορροφητή πρέπει να λάβουμε υπόψη μας της οπτικές απώλειες του συλλέκτη αλλά και το γεγονός ότι είναι σε θέση να δεσμεύσει την ηλιακή ακτινοβολία με γωνία πρόσπτωσης από  $0^\circ$  έως  $90^\circ$ . Επίσης, πρέπει προφανώς να ληφθεί υπόψη και ο λόγος συγκέντρωσης, που είναι ο λόγος της επιφάνεια του ανοίγματος του ανακλαστή προς την επιφάνεια του συλλέκτη.

$$H_{PV,b} = \begin{cases} H_{refl} * \eta_{opt,refl} * \frac{A_{ap}}{A_{col}} & \text{για } 0^\circ \leq \theta < 90^\circ \\ 0 & \text{για } \theta \geq 90^\circ \end{cases} \quad \text{εξ. 25}$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι θεωρήσαμε μόνο οπτικές απώλειες στον ανακλαστή, δηλαδή είναι μονωμένος και δεν υπάρχουν θερμικές απώλειες εξ' αυτού.

Για τον υπολογισμό της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά πάνελ, με βάση τις σχέσεις του Evans [99] είναι:

$$E_P = \eta_r * [1 - \beta_p * (T_c - T_{ref})] * A_{PV} * H_{PV} \quad \text{εξ. 26}$$

Όπου  $\eta_r$  είναι ο βαθμός απόδοσης του πάνελ,  $\beta_p$  ο συντελεστής μεταβολής του βαθμού απόδοσης με βάση τη θερμοκρασία,  $T_c$  η θερμοκρασία του πάνελ και  $T_{ref}$  η θερμοκρασία αναφοράς ( $25^\circ\text{C}$ ).

Η παραγόμενη θερμική ενέργεια προκύπτει εύκολα ως:

$$E_{Th} = A_{PV} * H_{PV} - E_P \quad \text{εξ. 27}$$

Στη συνέχεια θα υπολογίσουμε την μεταβολή της θερμοκρασίας του ρευστού μέσα στον συλλέκτη. Κάνοντας ισολογισμό ενέργειας σε στοιχείο ρευστού μέσα στο σωλήνα, έχουμε:

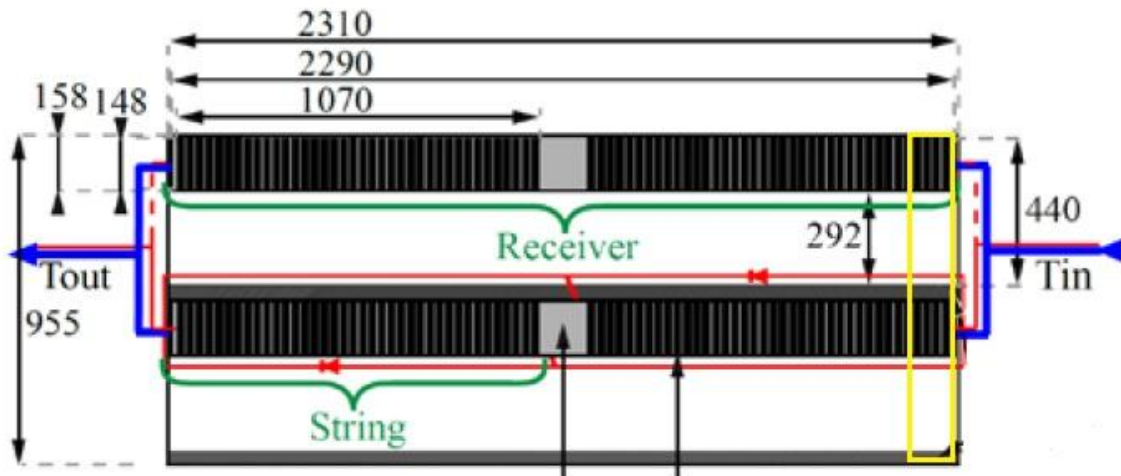


$$\left(\frac{\dot{m}}{n} * C_p * T_f\right)_y - \left(\frac{\dot{m}}{n} * C_p * T_f\right)_{y+\Delta y} + q'_u * \Delta y = 0 \quad \text{εξ.28}$$

Αν τώρα αντικαταστήσουμε στη σχέση αυτή την σχέση της ανά μονάδας επιφάνειας θερμικής ισχύος  $q'_u$  και ολοκληρώσουμε για όλο το μήκος του συλλέκτη κατά την διεύθυνση της ροής, προκύπτει η παρακάτω σχέση συσχέτισης της θερμοκρασίας εισόδου και εξόδου του ρευστού [94]:

$$T_{f,out} = \left[ T_{f,in} - T_{amb} - \left( \frac{E_{Th}}{U_L} \right) \right] * e^{-\frac{A_{col} * U_L * F'}{\dot{m} * C_p}} + T_{amb} + \left( \frac{E_{Th}}{U_L} \right) \quad \text{εξ.29}$$

όπου  $T_{f,in}$  και  $T_{f,out}$  είναι η θερμοκρασία εισόδου και εξόδου του νερού αντίστοιχα,  $T_{amb}$  είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος,  $U_L$  ο συντελεστής θερμικών απωλειών,  $F'$  ο παράγων απόδοσης του συλλέκτη,  $\dot{m}$  η παροχή μάζας του ρευστού και  $C_p$  ο συντελεστής θερμοχωρητικότητας του.

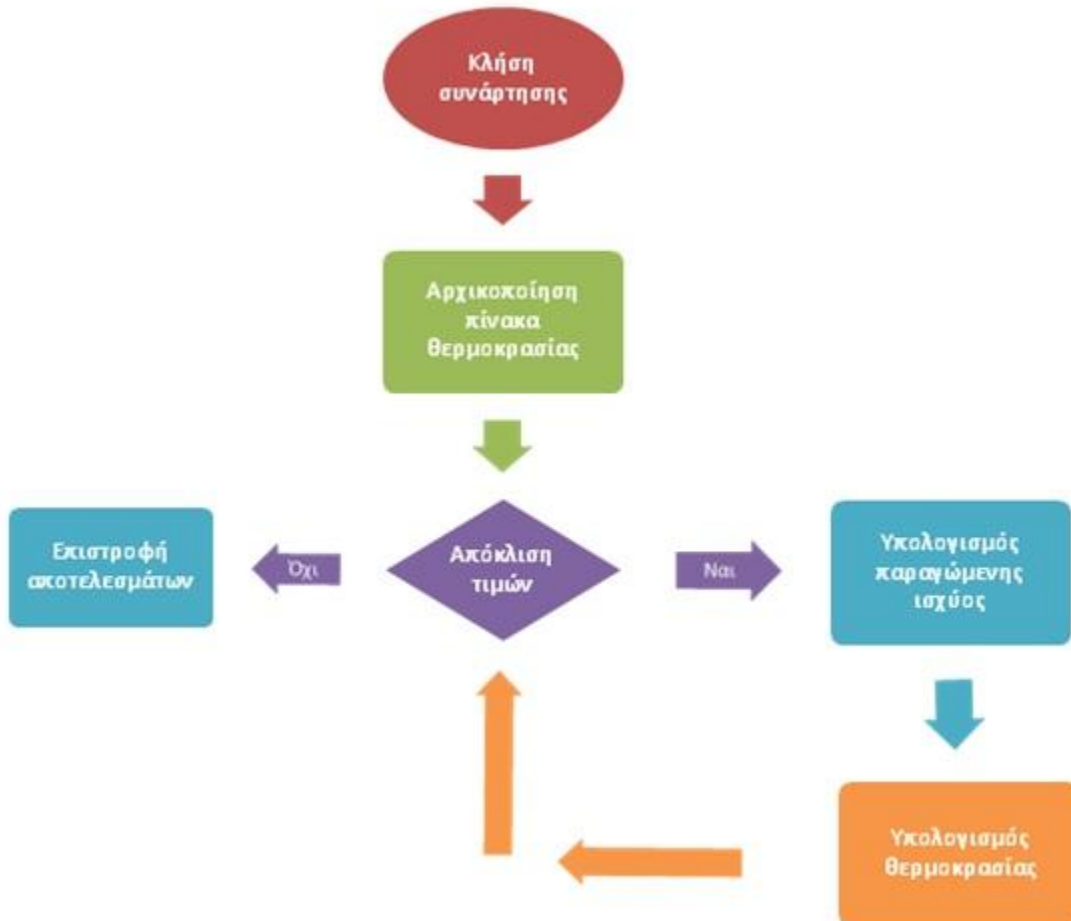


Σχήμα 5 – Κάτοψη συλλέκτη

Για τον υπολογισμό της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας και του ζεστού νερού χρήσης θα εργαστούμε ως εξής:

- Αρχικά χωρίζουμε το σύστημα σε στοιχειώδη τμήματα, κατά τέτοιο τρόπο ώστε να αντιστοιχεί ένα τέτοιο τμήμα ανά φωτοβολταϊκό στοιχείο. Υπάρχουν συνολικά 152 στοιχεία ή 38 ανά δέκτη (Receiver).
- Υποθέτουμε μια αρχική θερμοκρασία για όλα τα στοιχεία.
- Υπολογίζουμε με τις εξισώσεις που παρουσιάστηκαν την ισχύ που παράγεται και προκύπτει η θερμοκρασία κατά μήκος του συλλέκτη.
- Με βάση τις νέες θερμοκρασίες επαναλαμβάνουμε την ως άνω διαδικασία μέχρι σύγκλισης (η προηγούμενη με την τελευταία επανάληψη να διαφέρουν λιγότερο από 0.01%

Ο κώδικας αυτός φαίνεται στο παρακάτω σχήμα υπό τη μορφή διαγράμματος ροής για καλύτερη κατανόηση.



Σχήμα 6 – Διάγραμμα ροής

Τέλος, για τον υπολογισμό των αναγκών σε ζεστό νερό χρήσης (ZNX) χρησιμοποιείται η σχέση:

$$Q_{HW} = V_{HW} * \rho_w * C_p * N * (T_w - T_{in}) \quad \text{εξ. 30}$$

όπου  $V_{DHW}$  είναι οι ανάγκες σε ZNX σε lt/ημέρα,  $\rho_w$  η πυκνότητα του νερού,  $N$  ο αριθμός των ημερών,  $T_w$  η θερμοκρασία του ZNX και  $T_{in}$  η θερμοκρασία νερού του δικτύου.

# 4

## *Περιγραφή του προτύπου ανάλυσης*

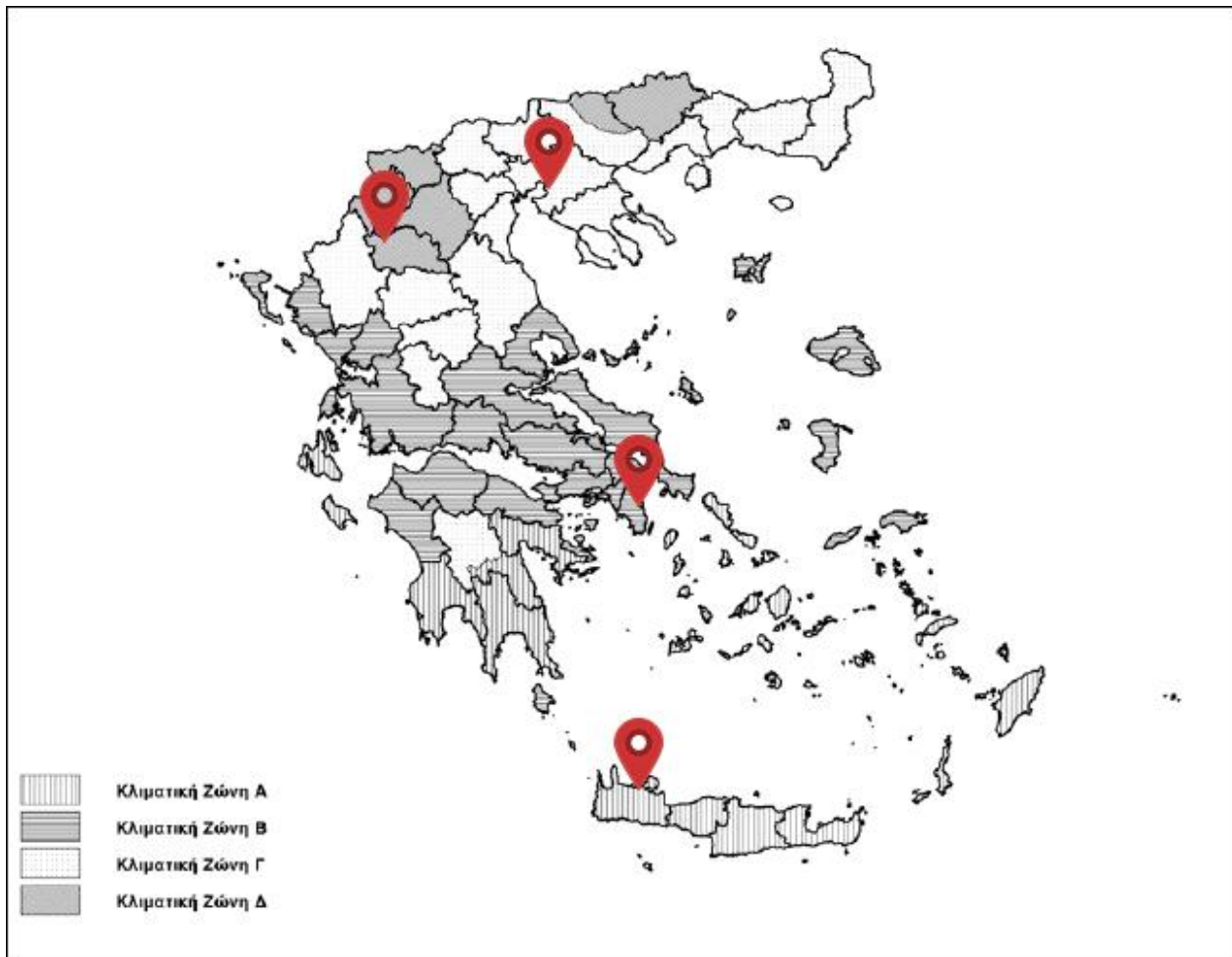
### *4.1 Χωροθέτηση και παραμετροποίηση κατοικίας*

Στην παρούσα εργασία θα μελετήσουμε την ηλεκτρική και θερμική απόδοση της εγκατάστασης πέντε όμοιων συγκεντρωτικών συστημάτων PVT της εταιρίας Solarus (μοντέλο Solarus V11). Η μελέτη θα γίνει για την εγκατάσταση του συστήματος αυτού σε 4 τοποθεσίες στην Ελλάδα και για την κάλυψη των αναγκών μιας μέσης μονοκατοικίας.

Η επιλογή των τεσσάρων τοποθεσιών έγινε με βάση την Τεχνική Οδηγία 20701-3/2010 [100] του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας και κατά τέτοιον τρόπο ώστε να καλύπτονται οι τέσσερις διαφορετικές κλιματικές ζώνες που έχουν οριστεί. Κατόπιν τούτου, επιλέχθηκαν οι εξής χαρακτηριστικές πόλεις για κάθε ζώνη:

- Για την κλιματική ζώνη **A** επιλέχθηκε η πόλη των Χανίων με  $\phi = 35.29^{\circ}\text{N}$
- Για την κλιματική ζώνη **B** επιλέχθηκε η πόλη της Αθήνας με  $\phi = 38.03^{\circ}\text{N}$
- Για την κλιματική ζώνη **Γ** επιλέχθηκε η πόλη της Θεσσαλονίκης με  $\phi = 40.31^{\circ}\text{N}$
- Για την κλιματική ζώνη **Δ** επιλέχθηκε η πόλη των Γρεβενών με  $\phi = 40.13^{\circ}\text{N}$

Η επιλογή των πόλεων φαίνεται και στον χάρτη του σχήματος 7.



Σχήμα 7 – Επιλεγθείσες πόλεις ανά κλιματική ζώνη [100]

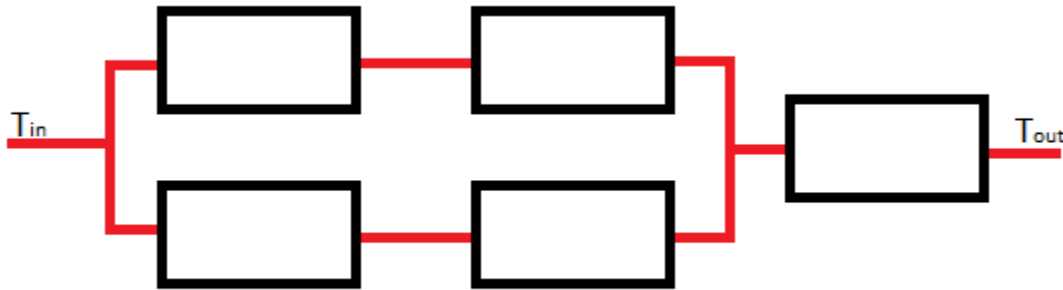
Για τον υπολογισμό των θερμικών αναγκών χρησιμοποιήθηκε ως θερμοκρασία νερού δικτύου η θερμοκρασία από τα δεδομένα της TOTEE ανά μήνα, παρότι προτείνεται η χρήση μιας μέσης θερμοκρασίας ανά ζώνη, καθώς έτσι προκύπτει η δυσμενέστερη – και πιο ρεαλιστική – περίπτωση. Επίσης θεωρήσαμε θερμοκρασία ZNX ίση με 40°C και, για τις ανάγκες μιας τυπικής κατοικίας 100 m<sup>2</sup>, 2.5 lt/m<sup>2</sup> ως απαιτούμενη ποσότητα ZNX.

Για τον υπολογισμό των αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια, θεωρήσαμε μια τετραμελή οικογένεια και κατανάλωση ανά κάτοικο και έτος στη χώρα μας ίση με 4592 kWh/έτος [101].

Τέλος θα μελετηθεί η επίδραση της μεταβολής της παροχής του ψυκτικού μέσου στην θερμική και ηλεκτρική παραγωγή αλλά και στον βαθμό απόδοσης, καθώς και η επίδραση της διάταξης των συλλεκτών.

## 4.2 Διαμόρφωση συλλεκτών

Όπως προαναφέρθηκε, θα χρησιμοποιηθούν πέντε μονάδες της συσκευής. Η διάταξη που επιλέχθηκε κατόπιν μελέτης με σκοπό τη βελτιστοποίηση της θερμοκρασίας εξόδου του ZNX και της ηλεκτρικής παραγωγής είναι η σύνδεση τους ανά δύο σε σειρά, και τα δύο παράλληλα ζεύγη που προκύπτουν σε σειρά με την πέμπτη μονάδα. Η διάταξη φαίνεται στο σχήμα 8 παρακάτω:



Σχήμα 8 – Διάταξη συλλεκτών της μελέτης

Για την παραμετρική ανάλυση της επίδρασης της διάταξης των συλλεκτών, θα μελετηθούν δύο σενάρια. Το πρώτο σενάριο είναι η διάταξη όλων των συλλεκτών εν σειρά και το δεύτερο η διάταξή τους εν παραλλήλω.

Τα κλιματολογικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν προκύπτουν από την TOTEE 20701-3/2010 όπως προαναφέρθηκε. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν οι θερμοκρασίες νερού δικτύου ως θερμοκρασίες του ψυκτικού μέσου, οι μέσες θερμοκρασίες ημέρας ανά μήνα ως θερμοκρασίες περιβάλλοντος και ο μέσος μηνιαίος δείκτης αιθριότητας.

Για τον συλλέκτη PVT θεωρήσαμε γωνία κλίσης  $\beta$  ίση με το γεωγραφικό πλάτος  $\phi$ , όπως αυτό επιλέχθηκε παραπάνω, με σκοπό τη μεγιστοποίηση της ετησίως παραγόμενης ενέργειας. Για τον απορροφητή, σύμφωνα με τον κατασκευαστή ο συντελεστής απωλειών θερμότητας  $U_L$  είναι  $4.8 \text{ W/m}^2\text{K}$  και θεωρήσαμε μια τυπική τιμή του παράγοντα θερμικής απόδοσης του συλλέκτη  $F'$  ίση με 0.96. Για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία, χρησιμοποιήθηκαν ο βαθμός απόδοσης  $\eta$  ίσος με 18.60% και ο συντελεστής μεταβολής του βαθμού απόδοσης βάση της θερμοκρασίας  $\beta_p$  ίσος με  $-0.39 \text{ \%}/\text{K}$ , όπως αναφέρονται από τον κατασκευαστή. Τέλος, η παροχή του ρευστού θεωρήθηκε ίση με  $70 \text{ lt/h}$ , η ειδική θερμοχωρητικότητα

του ψυκτικού μέσου (μίγμα γλυκόλης με νερό) σταθερή και ίση με 3625 J/kg K. Συνοπτικά, τα παραπάνω παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα.

Παράμετρος	Τιμή
<b>Κλίση συλλέκτη <math>\beta</math></b>	Γεωγραφικό πλάτος $\varphi$
<b>Συντελεστής απωλειών θερμότητας <math>U_L</math></b>	4.8 W/m <sup>2</sup> K
<b>Παράγων θερμικής απόδοσης συλλέκτη <math>F'</math></b>	0.96
<b>Συντελεστής θερμοκρασίας PV <math>\beta_p</math></b>	-0.39 %/K
<b>Παροχή <math>m</math></b>	70 lt/h
<b>Ειδική θερμοχωρητικότητα <math>C_p</math></b>	3625 J/kg K
<b>Βαθμός απόδοσης PV <math>\eta</math></b>	18.60 %

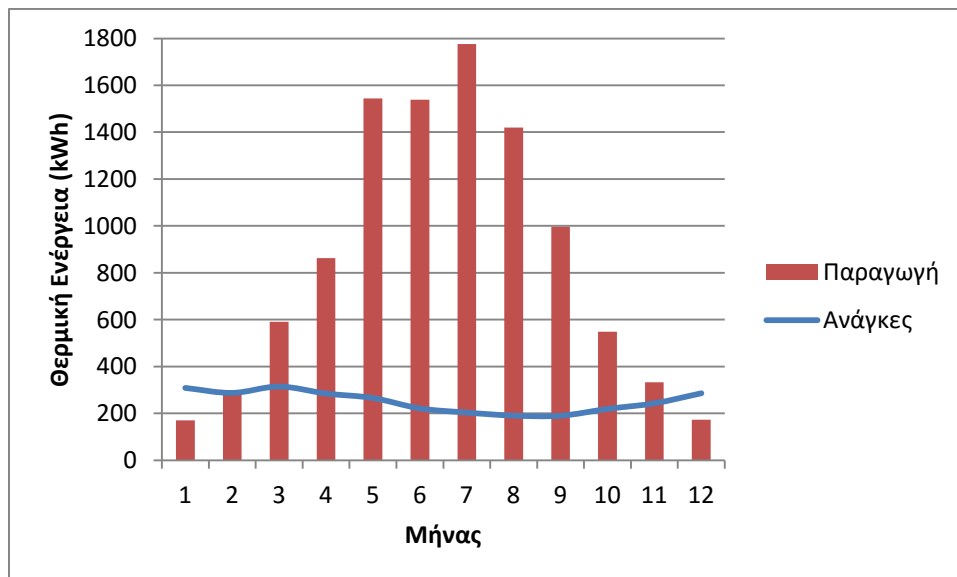
Πίνακας 1 – Παράμετροι προσομοίωσης του συλλέκτη

# 5

## Αποτελέσματα

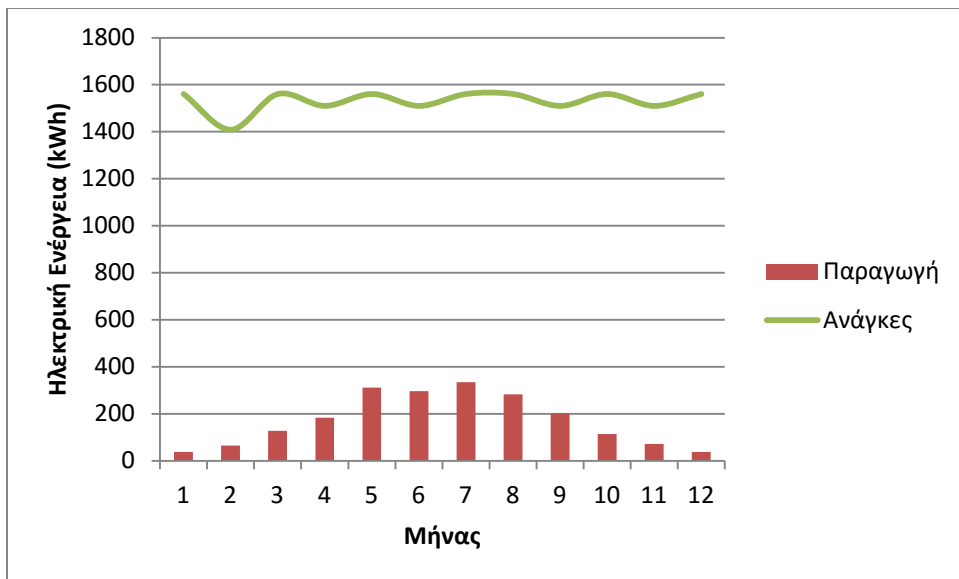
### 5.1 Παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας

#### 5.1.1 Κλιματική Ζώνη Α



Σχήμα 9 – Παραγωγή και κατανάλωση θερμικής ενέργειας ανά μήνα

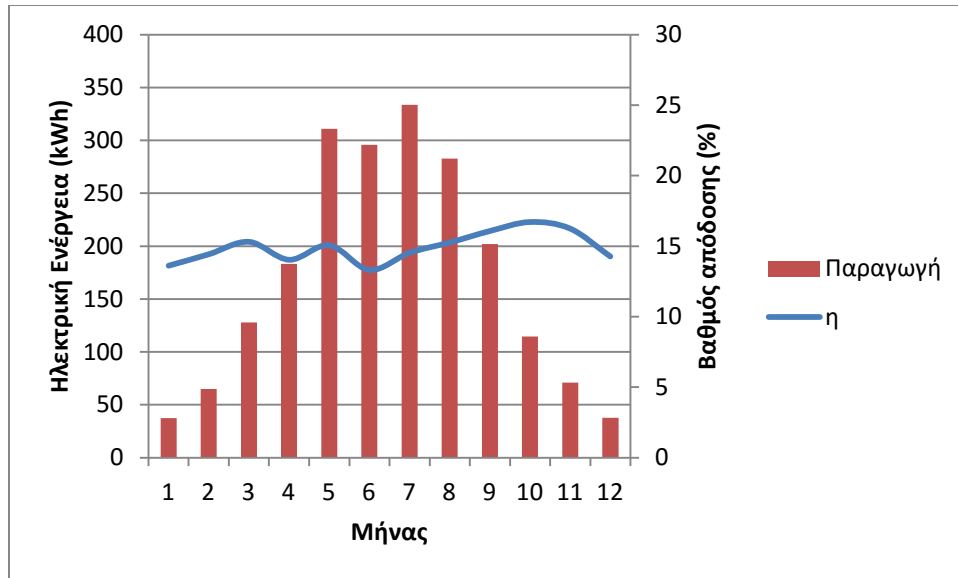
Στο σχήμα 9 παρατηρούμε ότι για την κλιματική ζώνη Α, καλύπτονται πλήρως οι θερμικές ανάγκες για όλους τους μήνες εκτός από τον Ιανουάριο, όπου έχουμε κάλυψη περίπου 55%, και τον Δεκέμβριο, όπου η κάλυψη ξεπερνά το 60%, συνεπώς τα αποτελέσματα είναι πολύ ικανοποιητικά. Κατά τους θερινούς μήνες εμφανίζεται ένα μεγάλο πλεόνασμα θερμικής ενέργειας που παραμένει ανεκμετάλλευτη.



Σχήμα 10 – Παραγωγή και κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ανά μήνα

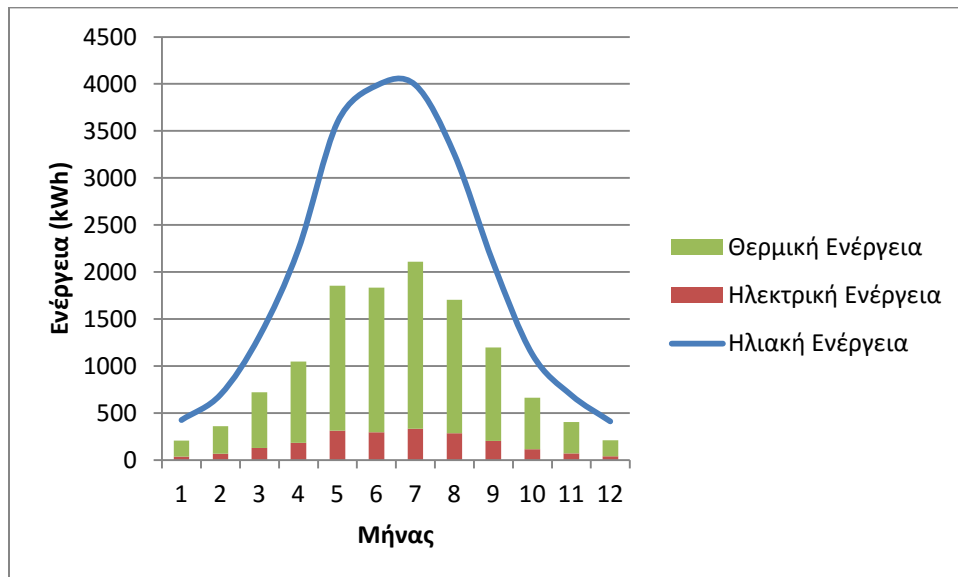
Στο σχήμα 10 φαίνεται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας εν συγκρίσει με την απαιτούμενη. Σίγουρα δεν περιμένουμε ένα τόσο μικρό σύστημα (περίπου 1.15 kW<sub>p,el</sub>) να καλύψει την ζήτηση ικανοποιητικά. Αξίζει να αναφερθεί η εντυπωσιακή παραγωγή τους θερινούς μήνες, λόγω του υψηλού βαθμού απόδοσης.





Σχήμα 11 – Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και βαθμός απόδοσης PV ανά μήνα

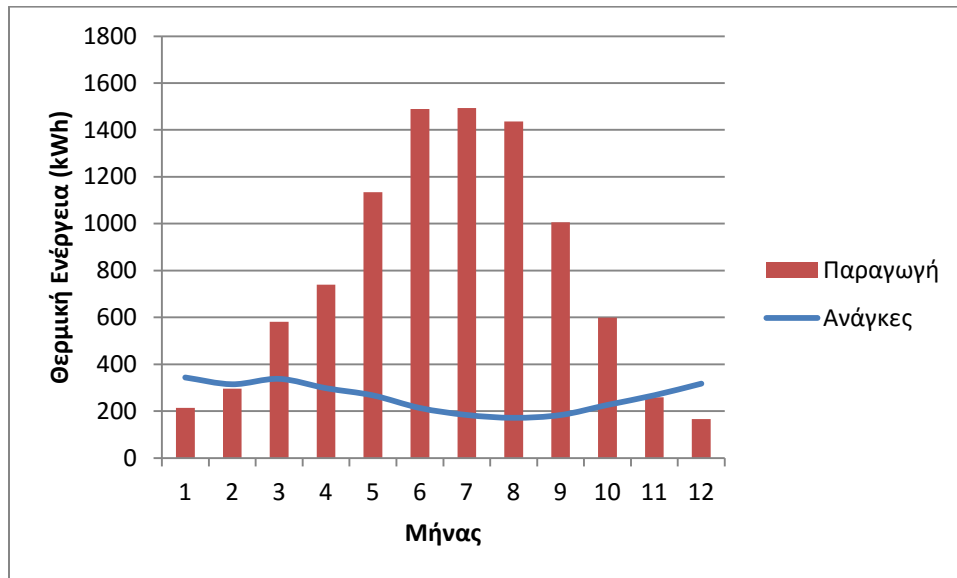
Ομοίως, στο σχήμα 11 φαίνεται η ηλεκτρική παραγωγή και ο βαθμός απόδοσης. Ο μέσος βαθμός απόδοσης αγγίζει το 15%. Οι βυθίσεις που παρατηρούνται τον Απρίλιο και τον Ιούνιο έχουν να κάνουν με το γεγονός ότι η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας ξεπερνά την γωνία που μπορεί να εκμεταλλευτεί ο συλλέκτης.



Σχήμα 12 – Ηλιακή, θερμική και ηλεκτρική ενέργεια

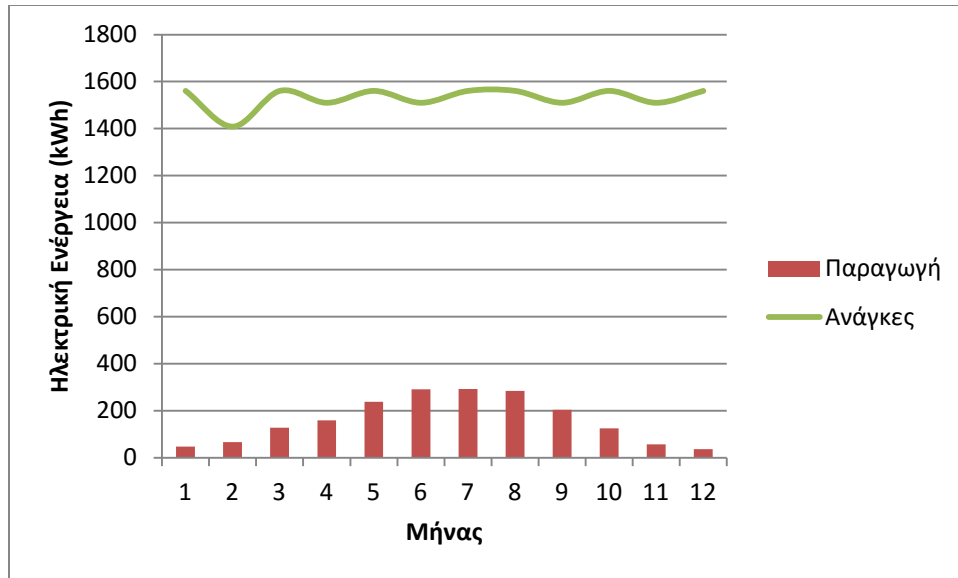
Τέλος, στο σχήμα 12 φαίνονται η προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια στο επίπεδο των συλλεκτών και η παραγόμενη ενέργεια ανά μήνα. Βλέπουμε ότι το ποσοστό εκμετάλλευσης ανέρχεται στο 50%.

### 5.1.2 Κλιματική Ζώνη Β



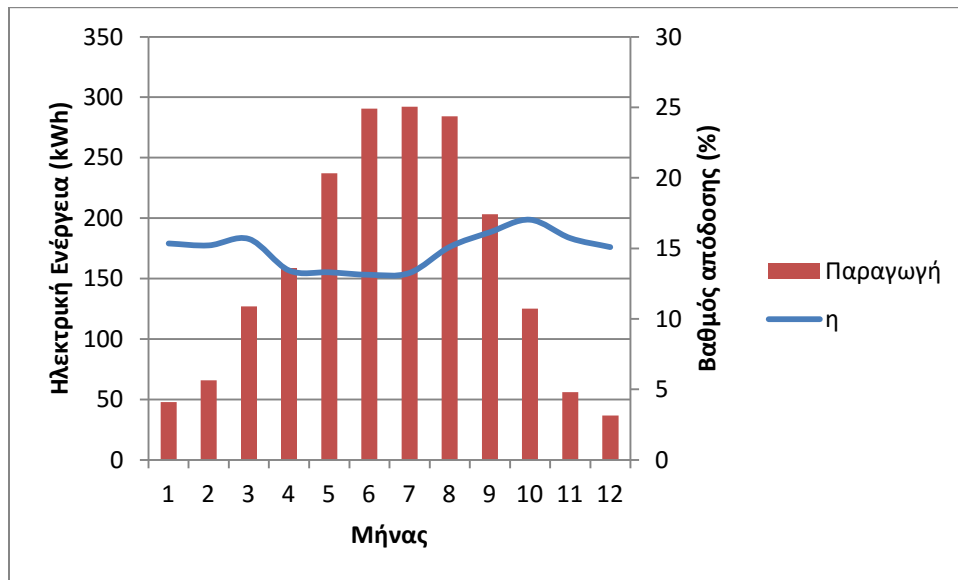
Σχήμα 13 – Παραγωγή και κατανάλωση θερμικής ενέργειας ανά μήνα

Για την κλιματική ζώνη Β, στο σχήμα 13 παρατηρούμε ότι η θερμική κάλυψη παρουσιάζει περίπου την ίδια συμπεριφορά με την ζώνη Α, με την εμφάνιση ενός μικρού ελλείμματος τον Φεβρουάριο.



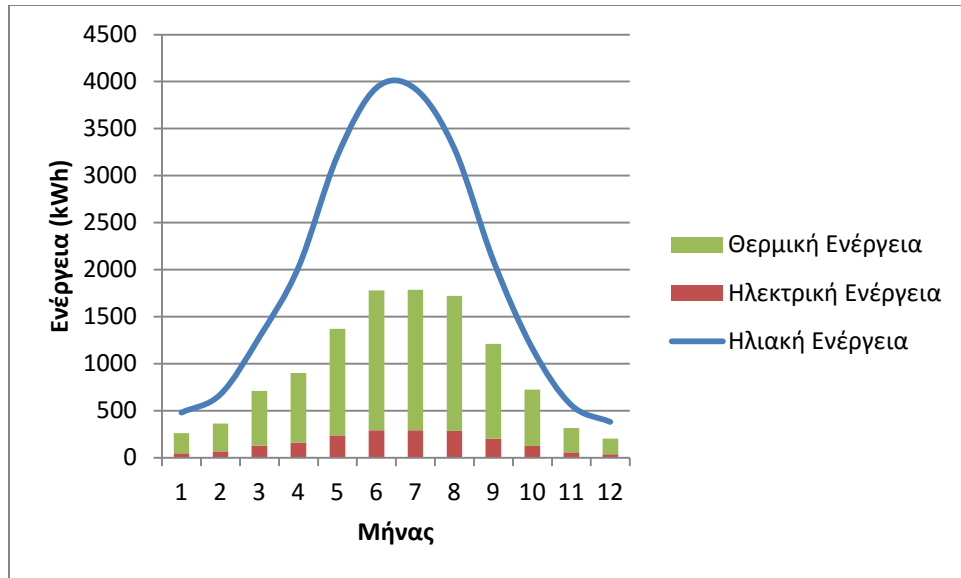
Σχήμα 14 – Παραγωγή και κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ανά μήνα

Για την ηλεκτρική παραγωγή, στο σχήμα 14 παρατηρούμε μείωση της παραγωγής εν συγκρίσει με την ζώνη Α, γεγονός αναμενόμενο, παρόλα αυτά όμως παραμένει εξίσου εντυπωσιακή.



Σχήμα 15 – Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και βαθμός απόδοσης PV ανά μήνα

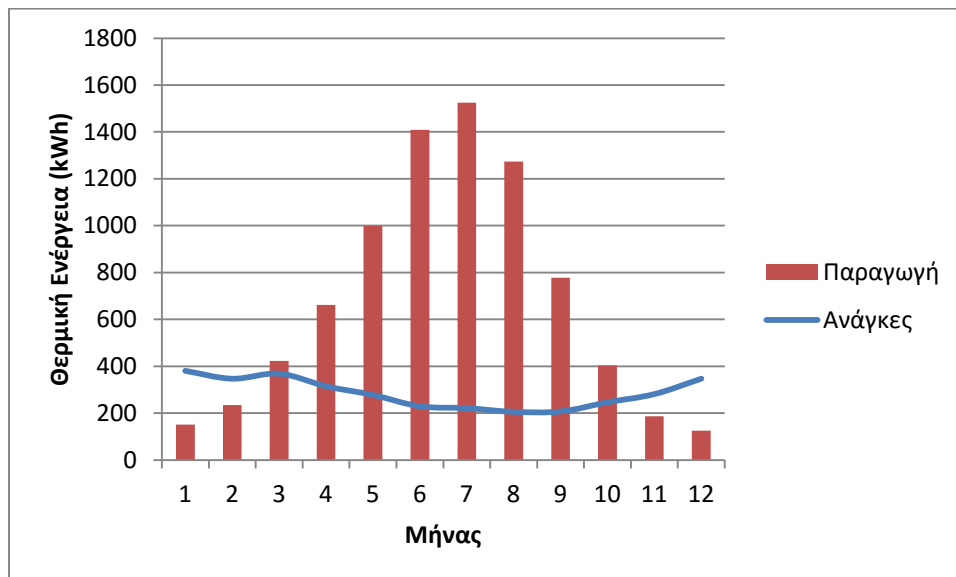
Στο σχήμα 15, παρατηρούμε ότι ο μέσος βαθμός απόδοσης παραμένει σχεδόν αμετάβλητος, παρά τις βυθίσεις που παρουσιάζονται πλέον και για τον Μάιο και τον Ιούλιο.



Σχήμα 16 - Ηλιακή, θερμική και ηλεκτρική ενέργεια

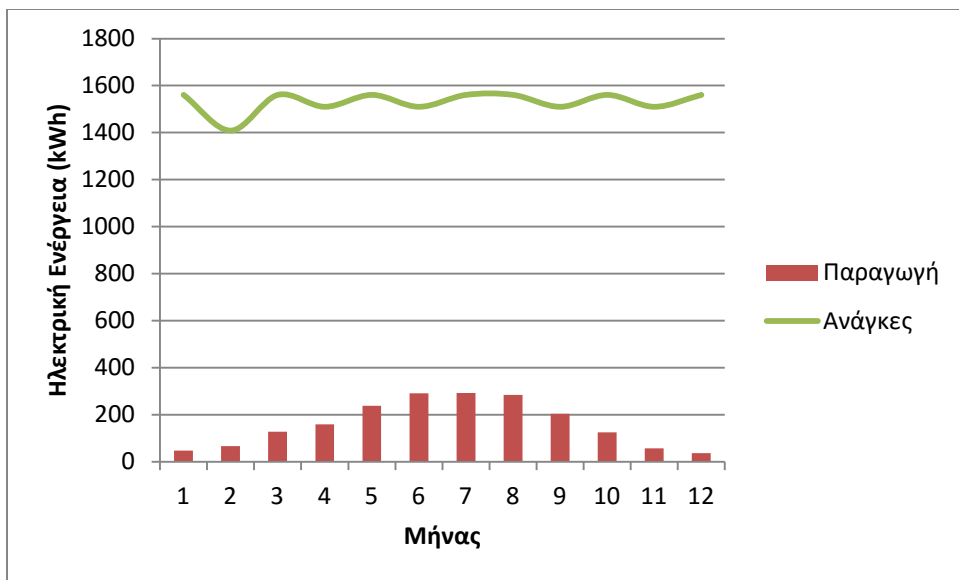
Στο σχήμα 16 βλέπουμε την προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια εν συγκρίσει με την παραγόμενη θερμική και ηλεκτρική για την ζώνη Β.

### 5.1.3 Κλιματική Ζώνη Γ



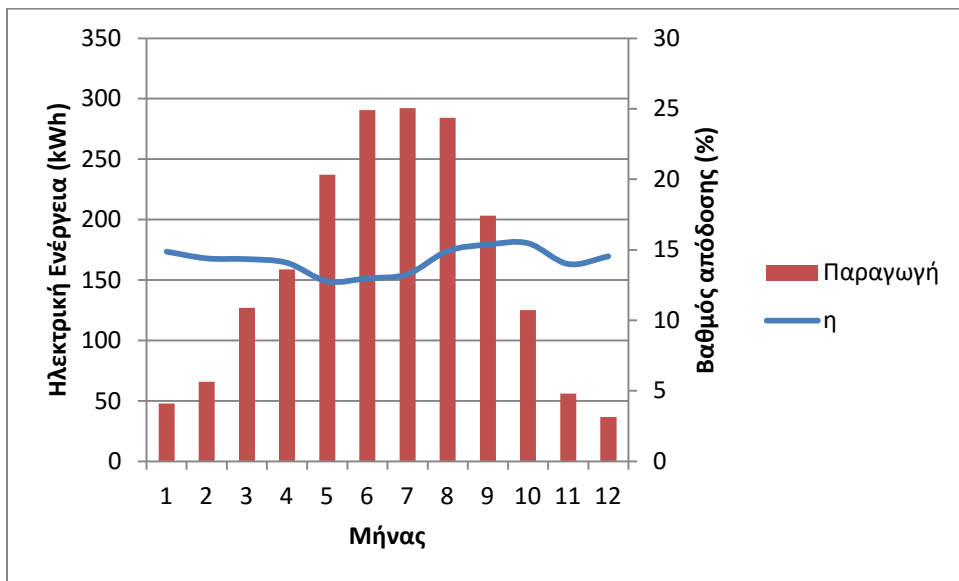
Σχήμα 17 – Παραγωγή και κατανάλωση θερμικής ενέργειας ανά μήνα

Για την κλιματική ζώνη Γ, στο σχήμα 17 παρατηρούμε ότι πλέον το σύστημα αδυνατεί να καλύψει τις ανάγκες, πέραν των μηνών Ιανουαρίου και Δεκεμβρίου, για τον Φεβρουάριο και τον Νοέμβριο. Η αδυναμία αυτή ανέρχεται σε περίπου 30% της ζήτησης. Το πραγματικό πρόβλημα όμως είναι η κάλυψη κάτω από 50% για τον Ιανουάριο και τον Δεκέμβριο. Κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, συνεχίζει να εμφανίζεται ένα μεγάλο θερμικό πλεόνασμα που ξεπερνά αγγίζει το εξαπλάσιο της ζήτησης.



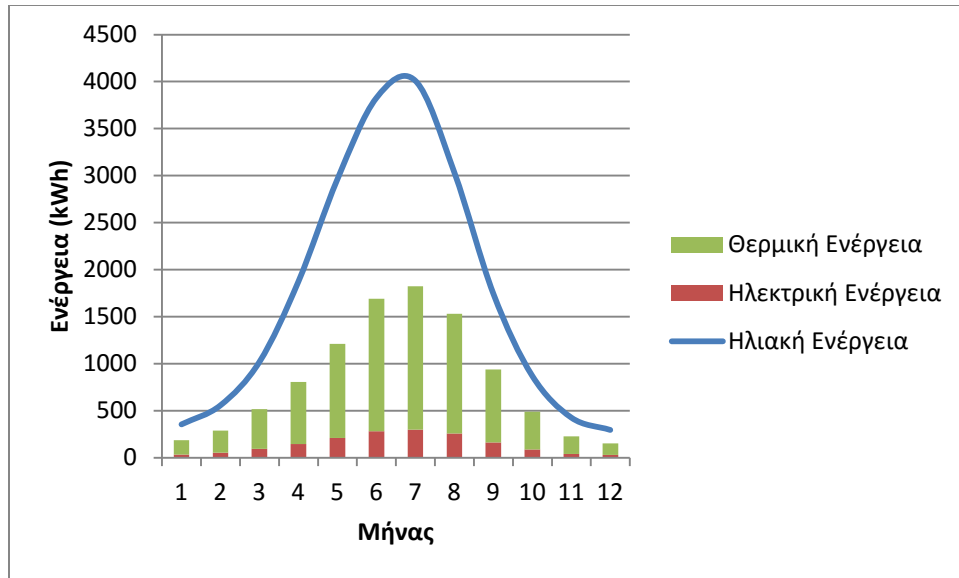
Σχήμα 18 – Παραγωγή και κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ανά μήνα

Στο σχήμα 18, η ηλεκτρική παραγωγή παραμένει ικανοποιητική, αν και ελαφρώς μειωμένη λόγω της τοποθεσίας, όπως αναμέναμε.



Σχήμα 19 – Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και βαθμός απόδοσης PV ανά μήνα

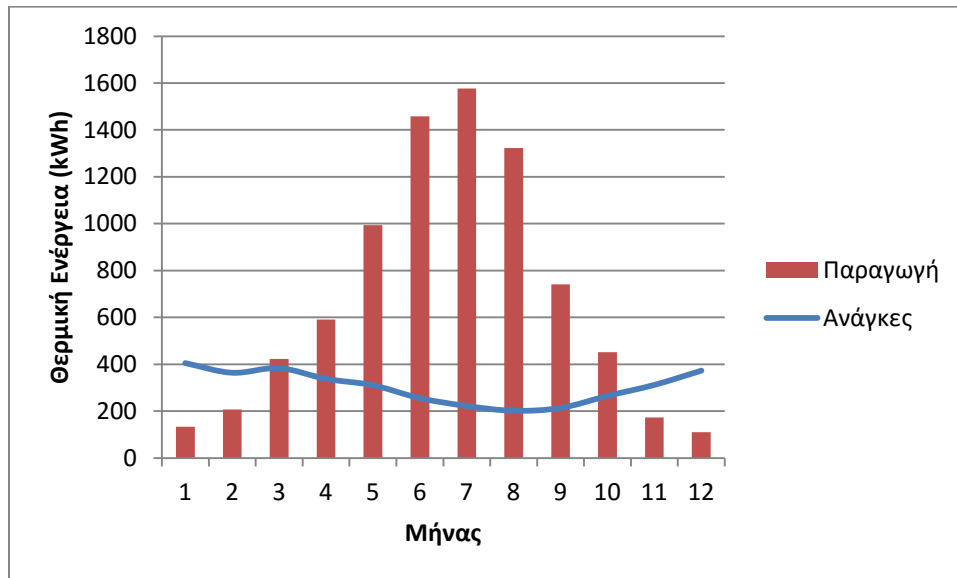
Στο σχήμα 19, ο βαθμός απόδοσης παραμένει σε υψηλά επίπεδα, άνω του 14 %.



Σχήμα 20 - Ηλιακή, θερμική και ηλεκτρική ενέργεια

Ομοίως στο σχήμα 20 με πριν, βλέπουμε ότι για τη ζώνη Γ ο βαθμός εκμετάλλευσης παραμένει ικανοποιητικός, αν και ελαφρά μειωμένος.

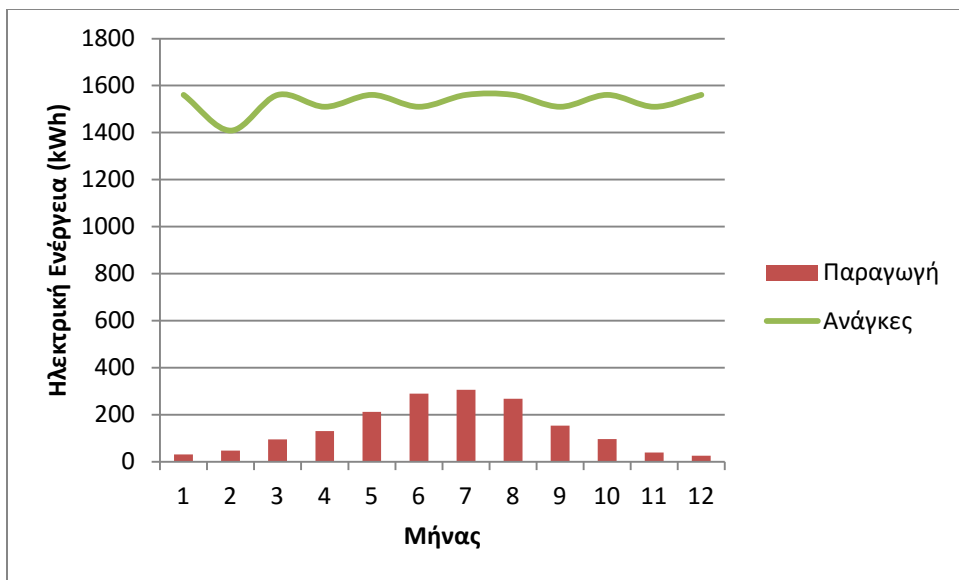
#### 5.1.4 Κλιματική Ζώνη Δ



Σχήμα 21 – Παραγωγή και κατανάλωση θερμικής ενέργειας ανά μήνα

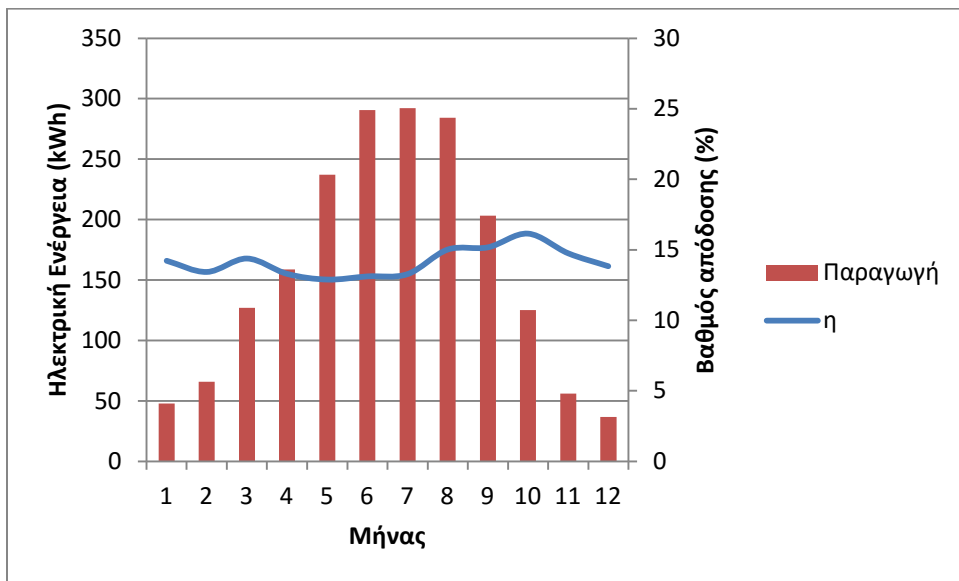
Για την κλιματική ζώνη Δ, που είναι και η πιο δυσχερής περίπτωση, στο σχήμα 21 παρατηρούμε μια μείωση της κάλυψης για τους μήνες Νοέμβριο, Δεκέμβριο, Ιανουάριο και Φεβρουάριο, κυρίως λόγω της αύξησης των αναγκών και όχι λόγω μείωσης της παραγωγής. Το θερμικό πλεόνασμα τους θερινούς μήνες παραμένει υψηλό.





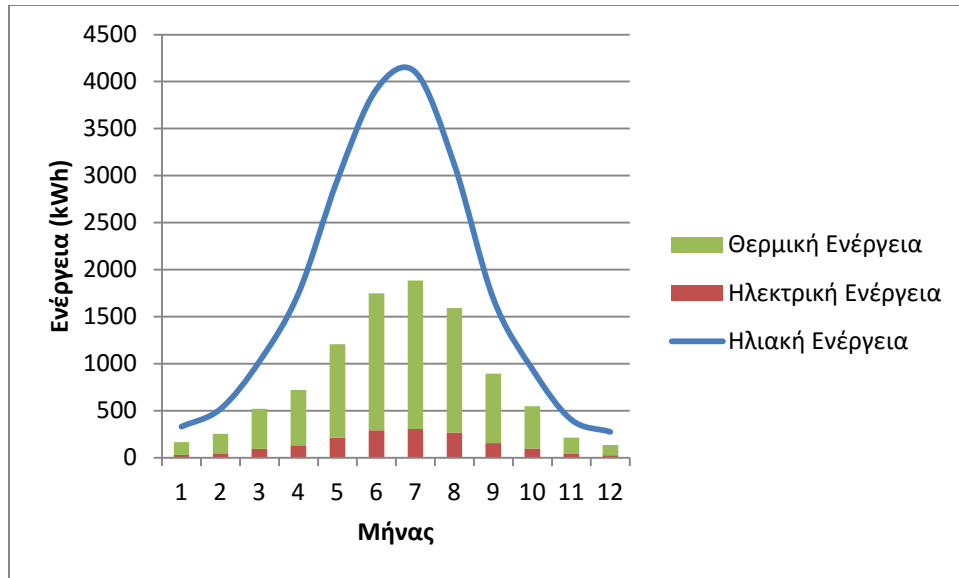
Σχήμα 22 – Παραγωγή και κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ανά μήνα

Στο σχήμα 22 έχουμε και πάλι μια περίπου σταθερή κατάσταση όσον αφορά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχήμα 23 – Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και βαθμός απόδοσης PV ανά μήνα

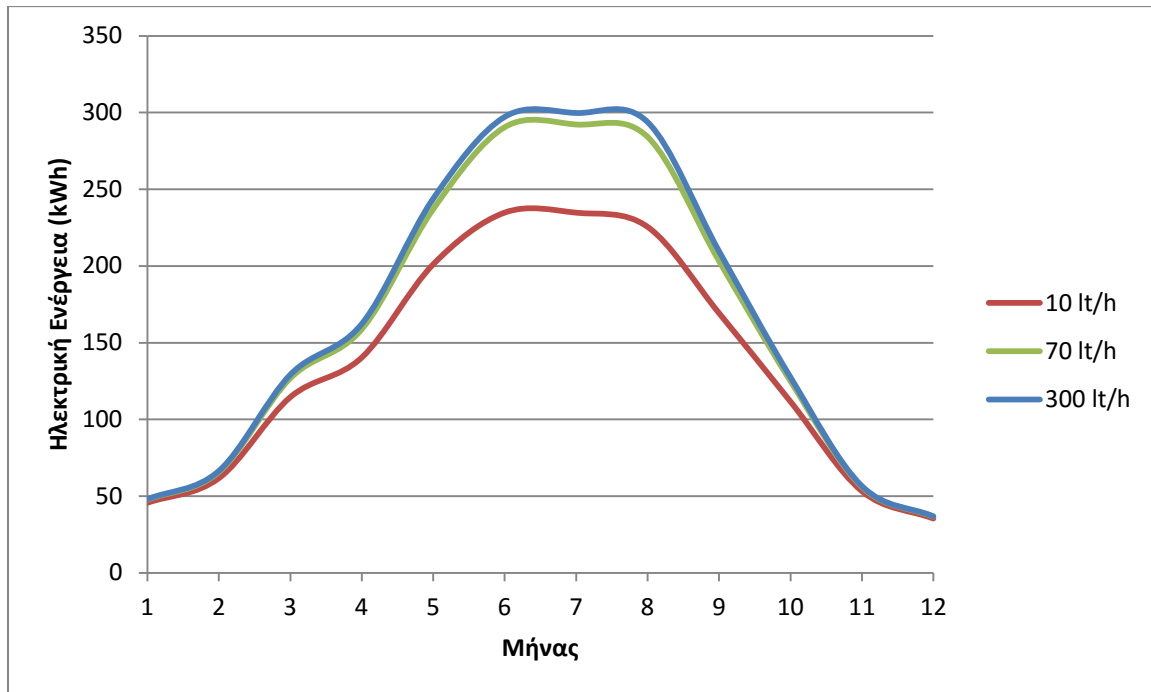
Στο σχήμα 23 ο μέσος βαθμός απόδοσης παραμένει σταθερά πάνω από 14 %.



Σχήμα 24 - Ηλιακή, θερμική και ηλεκτρική ενέργεια

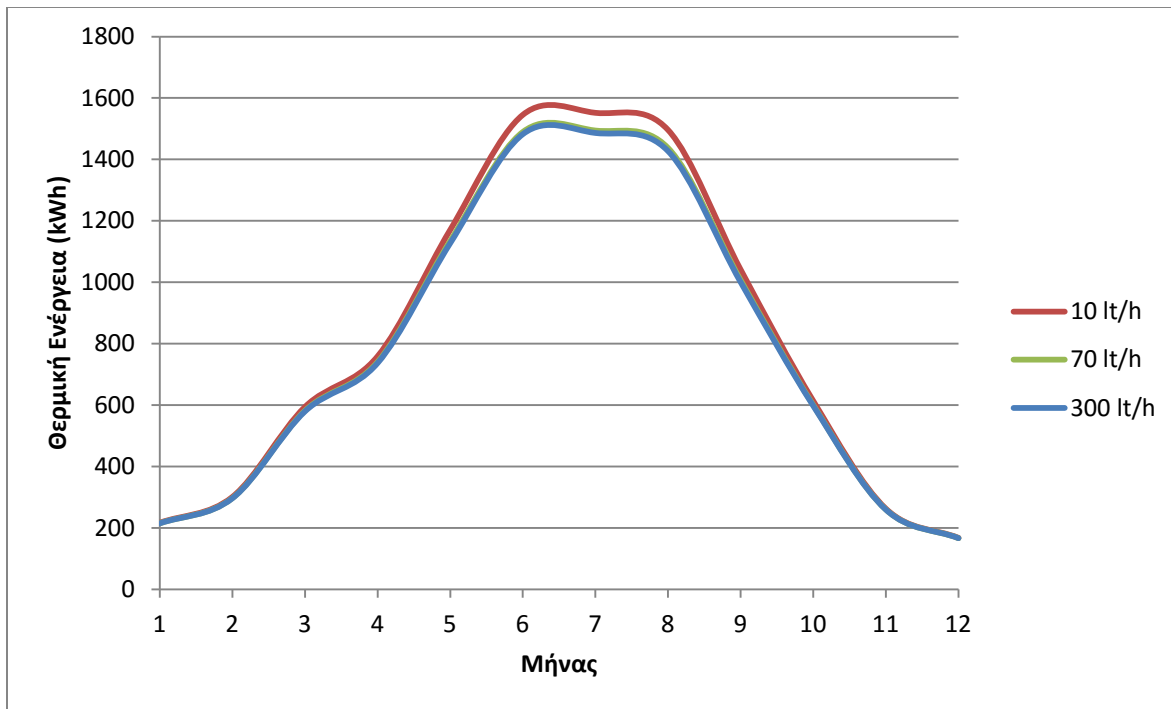
Τέλος, στο σχήμα 24, παρατηρούμε ότι έχουμε μείωση της διαθέσιμης ηλιακής ενέργειας κατά τους χειμερινούς μήνες για τη ζώνη Δ, πράγμα αναμενόμενο, λόγω της μεταβολής του γεωγραφικού πλάτους και της αιθριότητας.

## 5.2 Παραμετρική ανάλυση παροχής ψυκτικού



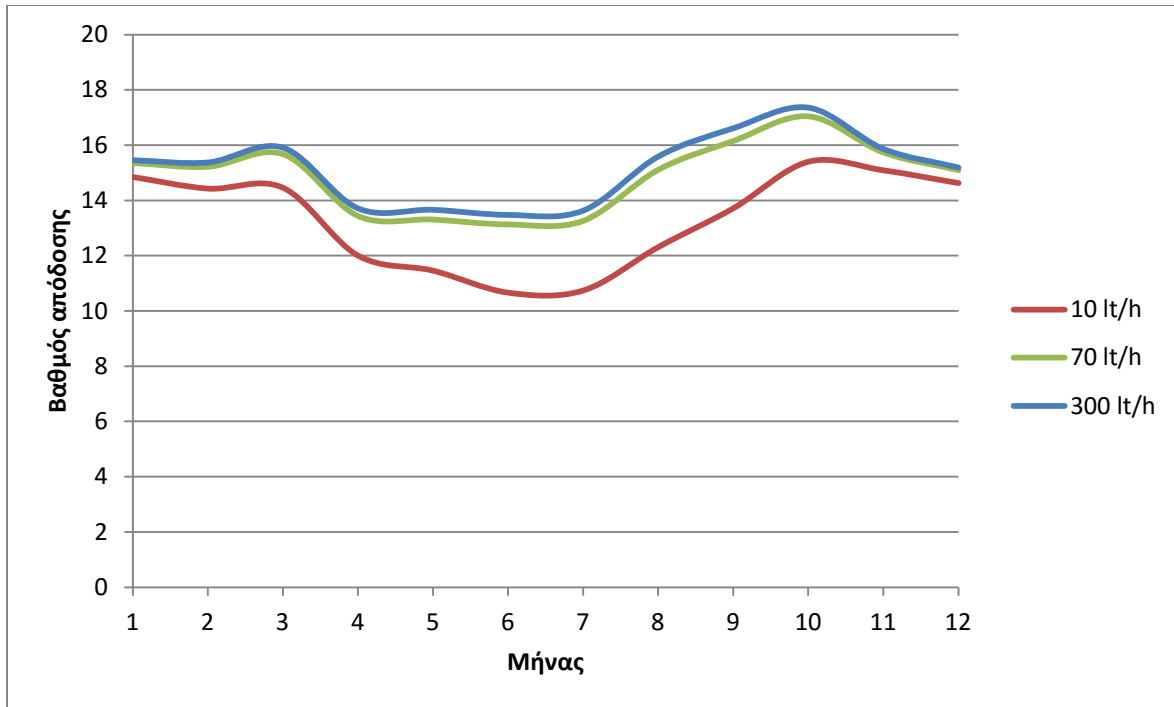
Σχήμα 25 – Επίδραση της μεταβολής της παροχής του ψυκτικού στην παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια

Στο σχήμα 25 βλέπουμε την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια για τρεις παροχές. Όσο μικρότερη είναι η παροχή του ψυκτικού, τόσο αυξάνεται η θερμοκρασία και συνεπώς μειώνεται ο βαθμός απόδοσης. Παρατηρούμε λοιπόν ότι μία μικρή παροχή μπορεί να επιφέρει έως και 25 % μείωση στην παραγόμενη ενέργεια κατά τους θερινούς μήνες. Μέσω δοκιμών για διάφορες παροχές, παρατηρούμε ότι έχουμε ένα βέλτιστο όριο τα 70 λίτρα ανά ώρα, καθώς πέρα από αυτά η αύξηση στην ενέργεια είναι πολύ μικρή, ενώ για μικρότερες παροχές έχουμε μεγάλη μείωση στην απόδοση των φωτοβολταϊκών μας.



Σχήμα 26 – Επίδραση της μεταβολής της παροχής του ψυκτικού στην παραγόμενη θερμική ενέργεια

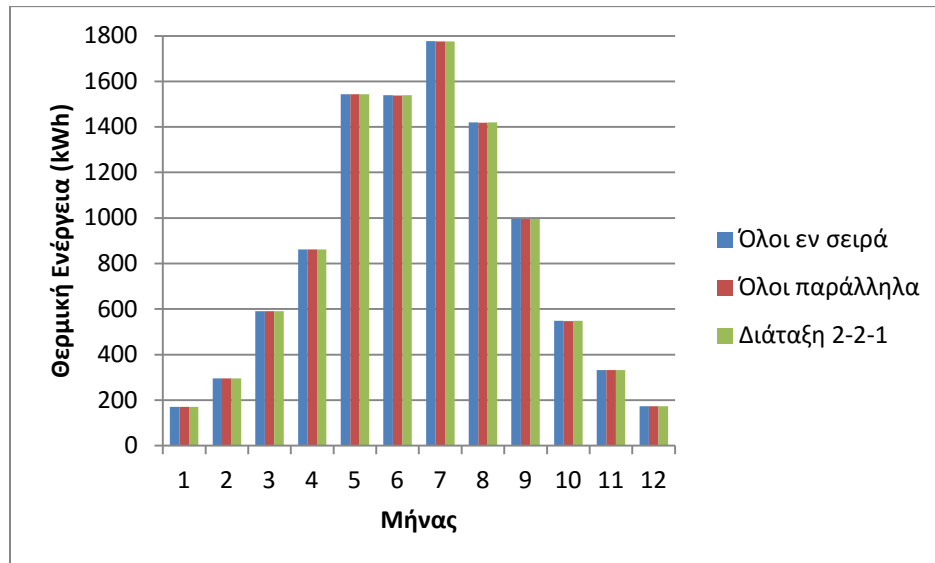
Όσον αφορά τη θερμική ενέργεια, στο σχήμα 26 παρατηρείται προφανώς η αντίστροφη συσχέτιση, σε πολύ ηπιότερη κλίμακα δε. Αυτό έχει να κάνει με το γεγονός ότι όσο μειώνουμε την παροχή, μειώνεται η δεσμευόμενη ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά, καθώς μειώνεται ο βαθμός απόδοσης τους, και συνεπώς αυξάνεται η διαθέσιμη ενέργεια για τον απορροφητή. Όμως, η μείωση της παροχής αυτής οδηγεί σε μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας του ψυκτικού με αποτέλεσμα να αυξάνονται και οι θερμικές απώλειες του συλλέκτη, ειδικά δε καθώς πρόκειται για μονού καλύμματος, και έτσι έχουμε πολύ μικρή αύξηση της θερμικής ενέργειας εν τέλει. Στο σχήμα αυτό φαίνεται επίσης πως για παροχές άνω των 70 lt/h η κατάσταση είναι σχεδόν αμετάβλητη. Με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία θα αναμέναμε αρχικά, και μέχρι την εύρεση της βέλτιστης παροχής, να έχουμε βελτίωση του θερμικού βαθμού απόδοσης, και μετά από την βέλτιστη παροχή να έχουμε ελάττωσή του [102]. Παρατηρούμε ανάλογη συμπεριφορά και εδώ, μόνο που όμως επειδή έχουμε την παραγόμενη θερμική ενέργεια υπεισέρχεται και η επίδραση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας που δεσμεύεται από την διαθέσιμη ηλιακή και της αντίστροφης συμπεριφοράς του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης των φωτοβολταϊκών.



Σχήμα 27 – Επίδραση της μεταβολής της παροχής του ψυκτικού στον βαθμό απόδοσης των PV

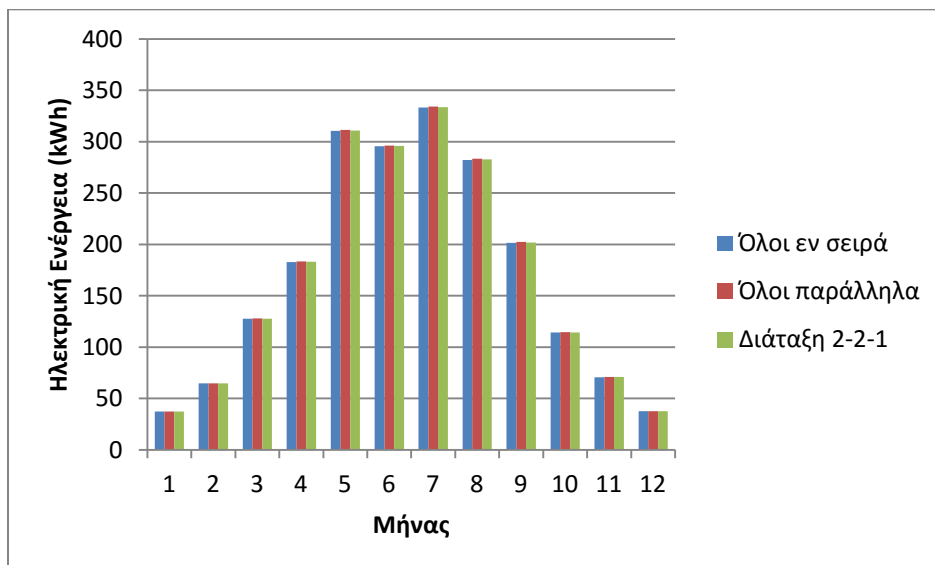
Τέλος στο σχήμα 27 έχουμε την συσχέτιση της παροχής με το βαθμό απόδοσης των φωτοβολταϊκών. Η κατάσταση είναι όμοια με αυτή του σχήματος 20 αφού τα μεγέθη σχετίζονται άμεσα. Για μικρές παροχές, ο βαθμός απόδοσης βυθίζεται σχεδόν στο 10 %, με τον μέσο βαθμό απόδοσης να κυμαίνεται στο 13 %, ενώ για παροχές άνω των 70 lt/h είναι σχεδόν 15 %.

### 5.3 Παραμετρική ανάλυση διάταξης συλλεκτών



Σχήμα 28 – Επίδραση διάταξης στην παραγόμενη θερμική ενέργεια

Στο σχήμα 28 παρατηρούμε ότι η επίδραση της διάταξης στην παραγόμενη θερμική ενέργεια είναι αρκετά μικρή, με την εν σειρά διάταξη να παράγει ελαφρώς περισσότερη θερμική ενέργεια λόγω της μείωσης της απόδοσης των φωτοβολταϊκών και της αύξησης της απόδοσης του συλλέκτη.



Σχήμα 29 – Επίδραση της διάταξης στην παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια

Αντίστοιχα, η ηλεκτρική ενέργεια βελτιστοποιείται για παράλληλη διάταξη συλλεκτών.

## 5.4 Συμπεράσματα - Αξιοποίηση θερμικού πλεονάσματος

Από τα αποτελέσματα που παρατίθενται παραπάνω με τη μορφή διαγραμμάτων, παρατηρούμε τα εξής:

Όσον αφορά την ηλεκτρική ενέργεια, η παραγωγή που προκύπτει αρκεί για να καλύψει έως και το ένα τέταρτο της ζήτησης κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Κατά τους χειμερινούς η παραγωγή είναι αρκετά χαμηλή. Βέβαια πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύς του συστήματος είναι μόλις 1150 W, συνεπώς η παραγόμενη ενέργεια είναι ικανοποιητική. Αυτό όμως που εντυπωσιάζει και ουσιαστικά είναι το πλεονέκτημα ενός συστήματος PVT είναι ο βαθμός απόδοσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων, ο οποίος σχεδόν διατηρείται σταθερός κατά τη διάρκεια του έτους με ελάχιστο σχεδόν το 14%, όταν ένα συμβατικό σύστημα PV μπορεί να έχει βαθμούς απόδοσης της τάξης του 10-11% τους θερινούς μήνες.

Όσον αφορά την παραγόμενη θερμική ενέργεια, παρατηρούμε ότι οι ανάγκες της οικίας καλύπτονται σε ικανοποιητικό βαθμό. Κατά τους μήνες Δεκέμβριο και Ιανουάριο έχουμε την ελάχιστη παραγωγή, καλύπτοντας έτσι περίπου το 50% της ζήτησης σε ΖΝΧ. Όμως κατά τους υπόλοιπους μήνες έχουμε σημαντικό πλεόνασμα θερμικής ενέργειας. Συνοπτικά, το πλεόνασμα / έλλειμμα ανά μήνα και ζώνη παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα:

	Ζώνη Α	Ζώνη Β	Ζώνη Γ	Ζώνη Δ
Ιαν	-139,266	-129,513	-230,555	-271,906
Φεβ	7,961896	-18,361	-112,899	-156,553
Μαρ	275,5038	243,5115	53,97006	39,82185
Απρ	576,9061	442,0526	346,7739	253,8764
Μαϊ	1277,403	866,941	721,1467	682,7912
Ιουν	1317,239	1275,641	1178,863	1203,099
Ιουλ	1572,159	1310,256	1302,799	1355,406
Αυγ	1228,845	1265,343	1067,259	1121,757
Σεπτ	805,82	823,1181	570,6911	527,87
Οκτ	328,6128	373,019	156,5042	186,3771
Νοε	88,90047	-8,59644	-95,6252	-139,032
Δεκ	-113,452	-151,589	-222,825	-262,842

Πίνακας 2 – Πλεόνασμα & έλλειμμα θερμικής ενέργειας ανά μήνα και ζώνη σε kWh

Τα ελλείμματα που παρουσιάζονται μπορούν να καλυφθούν πλήρως από την ηλεκτρική παραγωγή του συστήματος, μέσω ηλεκτρικών αντιστάσεων, δίνοντας έτσι αυτονομία στην εγκατάσταση. Το

σημαντικότερο όμως είναι η αξιοποίηση του πλεονάσματος, το οποίο είναι ιδιαίτερης αξίας καθώς είναι υψηλής θερμοκρασίας. Το πλεόνασμα αυτό μπορεί να αξιοποιηθεί, όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 2, για λύσεις συμπαραγωγής. Για παράδειγμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί αντλία θερμότητας, η οποία θα παρέχει θέρμανση με υψηλό βαθμό απόδοσης. Επίσης, μια άλλη ενδιαφέρουσα εφαρμογή θα ήταν η χρήση ψύκτη απορρόφησης για την ψύξη της οικίας κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Οι ψύκτες απορρόφησης χρειάζονται ρευστό υψηλής θερμοκρασίας προκειμένου να αναγεννήσουν το ψυκτικό, το οποίο οι συμβατικοί συλλέκτες αδυνατούν να παράξουν. Ομοίως, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αναγέννηση του υλικού προσρόφησης στον αφυγραντικό τροχό σε έναν ψύκτη προσρόφησης. Με αυτές τις λύσεις μπορεί να επιτευχθεί και η αυτονόμηση της ψύξης της κατοικίας. Τέλος, μια ακόμη πρόταση θα ήταν η χρήση για σύστημα αφαλάτωσης. Το πρόβλημα της μεταφοράς πόσιμου νερού στα νησιά είναι ένα υπαρκτό ζήτημα. Με τη χρήση μιας τέτοιας διάταξης, κάθε σπίτι θα μπορούσε να παράξει αυτόνομα το δικό του πόσιμο νερό.

Τέλος, όσον αφορά την παραμετρική ανάλυση της επίδρασης της παροχής μάζας του ψυκτικού στα παραγόμενα μεγέθη, είναι φανερό ότι η επίδραση για τιμές μεγαλύτερης των 70 lt/h δεν είναι σημαντική (<1%). Όμως, για τιμές παροχής μικρότερες των 70 lt/h η μεγάλη θερμοκρασία μειώνει σημαντικά το βαθμό απόδοσης των φωτοβολταϊκών και κατά συνέπεια την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια. Για αυτό συστήνεται η επιλογή παροχής μεγαλύτερης ή ίσης αυτής των 70 lt/h για ένα τέτοιο σύστημα.

## **5.5 Σημεία περαιτέρω μελέτης**

Από τα αποτελέσματα της παρούσης διπλωματικής εργασίας, προκύπτουν σημεία τα οποία χρήζουν περαιτέρω μελέτης. Πρώτον, θα ήταν ενδιαφέρον να μελετηθεί η απόδοση του συστήματος με την προσθήκη ενός δοχείου αποθήκευσης ZNX για την ηλεκτρική ενέργεια αλλά και συσσωρευτών – μπαταριών για την ηλεκτρική και η συμπεριφορά του κατά την διάρκεια της ημέρας. Ακόμα, μπορεί να μελετηθεί αν η αύξηση της παραγωγής της ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας με ένα σύστημα παρακολούθησης του ήλιου είναι οικονομικά συμφέρουσα, ειδικά δε καθώς έχουμε και τον περιορισμό της γωνίας αποδοχής για τον συλλέκτη, όπως αναφέραμε. Επίσης, όπως προτάθηκε παραπάνω, η σύνδεση του συστήματος των συλλεκτών με έναν ψύκτη απορρόφησης ή ενός συστήματος αφαλάτωσης και οι προοπτικές που δημιουργούνται από μια τέτοια εγκατάσταση είναι επίσης πολύ ενδιαφέροντα πεδία τα οποία μπορούν να μελετηθούν. Τέλος, ο ηλιακός συλλέκτης θα μπορούσε να μοντελοποιηθεί και να μελετηθεί στο πρόγραμμα Solidworks, στο εργαλείο προσομοίωσης που διαθέτει και τα αποτελέσματα να συγκριθούν. Στα πλαίσια της παρούσης, σχεδιάσθηκε πλήρως ο συλλέκτης και τα renders του παρατίθενται στο παράρτημα Γ.



## ***Βιβλιογραφία***

- [1] US Department of Energy, «The history of solar,» 5 1 2016. [Ηλεκτρονικό]. Available: [http://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/solar\\_timeline.pdf](http://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/solar_timeline.pdf).
- [2] W. J. Bryan, «Speeches in Washington in 1909,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.paulluvera.com/weblog/2013/02/william-jennings-bryants-speaking-tour-in-washington-in-1909.html>.
- [3] «The History Highlight of Solar Sells,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://org.ntnu.no/solarcells/pages/history.php>. [Πρόσβαση 5 1 2016].
- [4] H. Geller, «Energy Revolution - Policies for a Sustainable Future,» *Island Press*, 2003.
- [5] [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.cop21paris.org/about/cop21>. [Πρόσβαση 5 1 2016].
- [6] Y. Tripanagnostopoulos, M. Souliotis, R. Battisti, A. Corrado, «APPLICATION ASPECTS OF HYBRID PV/T SOLAR SYSTEMS,» [Ηλεκτρονικό]. Available: [https://www.ecn.nl/fileadmin/ecn/units/egon/pvt/pdf/ises03\\_lca.pdf](https://www.ecn.nl/fileadmin/ecn/units/egon/pvt/pdf/ises03_lca.pdf).
- [7] [Ηλεκτρονικό]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_energy\\_in\\_the\\_European\\_Union](https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_energy_in_the_European_Union). [Πρόσβαση 5 1 2016].
- [8] A. Ζερβός, *Νέες και Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας*, Αθήνα: Εκδόσεις ΕΜΠ, 2014.
- [9] W. M., «Performance analysis of combined heating and photovoltaic power systems for residences,» *Energy Covers*, pp. 79-90, 1976.
- [10] F. LW., «On heat rejection from terrestrial solar cell arrays with sunlight concentration,»

*Proceedings of the 11th IEEE PVSC conference*, p. 318, 1975.

- [11] F. L.W., «Extension of the Hottel-Whiller model to the analysis of combined photovoltaic/thermal flat plate collectors,» *Sol Energy*, pp. 361-366, 1979.
- [12] R. M. Kern JEC, «Combined photovoltaic and thermal hybrid collector systems.,» *Proceedings of the 13th IEEE photovoltaic specialists*, pp. 1153-1157, 1978.
- [13] H. SD, «Evaluation of combined photovoltaic/thermal collectors.,» *Proceedings of the ISES international congress, Atlanta, USA, vol. 3*, pp. 1865-1869, 1979.
- [14] R. P., «Analytical prediction of liquid and air photovoltaic/thermal flat plate collector performance.,» *Sol Energy Eng*, 1981.
- [15] K. A. Braunstein A, «On the development of the solar photovoltaic and thermal (PVT) collector,» *IEEE Trans Energy Convers*, 1986.
- [16] L. B., «A hybrid amorphous silicon photovoltaic and thermal solar collector.,» *Sol Cells*, 1986-1987.
- [17] C. L. O'leary MJ, «Thermal–electric performance analysis for actively cooled, concentrating photovoltaic systems.,» *Sol Energy*, 1980.
- [18] C. H. C. D. Mbewe DJ, «A model of silicon solar cells for concentrator photovoltaic and photovoltaic/thermal system design.,» *Sol Energy*, 1985.
- [19] AA., Al-Baali, «Improving the power of a solar panel by cooling and light concentrating.,» *Sol Wind Technol*, 1986.
- [20] L. F. O. D. Hamdy MA, «Model of a spectrally selective decoupled photovoltaic/thermal concentrating system,» *Appl Energy*, 1988.
- [21] G. H. A. R. Bhargava AK, «Study of a hybrid solar system–solar air heater combined with solar cell,» *Sol Energy*, 1991.
- [22] A. R. Garg HP, «Some aspects of a PV/T collector/forced circulation flat plate solar water heater with solar cells.,» *Energy Convers Manage*, 1995.
- [23] A. R. Garg HP, «Performance analysis of a hybrid photovoltaic/thermal (PV/T) collector with integrated CPC troughs,» *Int J Energy Res*, 1999.
- [24] P. J., «Transient analysis of a photovoltaicthermal solar collector for cogeneration,» *Energy Convers Manage*, 1994.

- [25] L. O. Bergene T, «Model calculations on a flat-plate solar heat collector with integrated solar cells.,» *Sol Energy*, 1995.
- [26] G. H. Agarwal RK, «Study of a photovoltaic-thermal system—thermosiphonic solar water heater combined with solar cells.,» *Energy Convers Manage*, 1994.
- [27] d. V. DW., «Design of a photovoltaic/thermal combi-panel. Ph.D. Thesis,» *Eindhoven Technical University, Netherland*, 1998.
- [28] T. T. Fujisawa T, «Annual exergy evaluation on photovoltaic-thermal hybrid collector.,» *Sol Energy Mater Sol Cells*, 1997.
- [29] E. J. Norton B, «Aqueous propylene–glycol concentrations for the freeze protection of thermosiphon solar energy water heaters.,» *Sol Energy*, 1991.
- [30] S. R. P. L. L. B. Rockendorf G, «PV-hybrid and thermoelectric collectors,» *Sol Energy*, 1999.
- [31] H. J. J. C. K. N. S. P. Clarke JA, «Photovoltaic-integrated building facades,» *Renew Energy*, 1996.
- [32] S. M. Moshfegh B, «Flow and heat transfer in the air gap behind.,» *Renew Sust Energy Rev*, 1998.
- [33] M. R. I. Z. Brinkworth BJ, «A validated model of naturally ventilated PV cladding.,» *Sol Energy*, 2000.
- [34] W. T. Akbarzadeh A, «Heat pipe-based cooling systems for photovoltaic cells under concentrated solar radiation.,» *Appl Therm Eng*, 1996.
- [35] S. G. A. J. B. T. C. D. M. N. Luque A, «Some results of the EUCLIDES photovoltaic concentrator prototype.»
- [36] M. N. W. J. Ito S, «Heat pump using a solar collector with photovoltaic modules on the surface.,» *J Sol Energy Eng*, 1997.
- [37] «Photovoltaic/thermal solar energy systems: status of the technology and roadmap for future development.,» *Task 7 report, international energy agency*.
- [38] G. J. H. B. A. H. R. D. T. P. Affolter P, «New generation of hybrid solar collectors: feasibility study (phase 1). Report for project no 56360/16868,» *Swiss Federal Office for Energy*.
- [39] «Grammer Solar,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.grammer-solar.com/cms/en/solar-air/products/pv-hybrid-collector.html>. [Πρόσβαση 6 January 2016].
- [40] H. AA., «Comparative study of the performances of four photovoltaic/thermal solar air collectors.,» *Energy Convers Manage*.

- [41] N. T. S. M. Y. P. Tripanagnostopoulos Y, «Hybrid photovoltaic/thermal solar systems».
- [42] T. Y. Tonui JK, «Air-cooled PV/T solar collectors with low cost performance improvements.,» *Sol Energy*, 2007.
- [43] Y. B. S. K. B. M. Othman MY, «Performance studies on a finned double-pass photovoltaic-thermal (PV/T) solar collector.,» *Desalination*, 2007.
- [44] S. M. C. A. J. J. Tiwari A, «Performance evaluation of photovoltaic thermal solar air collector for composite climate of India.,» *Sol Energy*.
- [45] T. G. Raman V, «A comparison study of energy and exergy performance of a hybrid photovoltaic double-pass and single-pass air collector.,» *Int J Energy Res*, 2009.
- [46] Y. K. L. H. K. S. V. T. Sopian K, «Performance analysis of photovoltaic thermal air heaters.,» *Energy Convers Manage*, 1996.
- [47] H. AA., «Comparative study of the performances of four photovoltaic/thermal solar air collectors.,» *Energy Convers Manage*, 2000.
- [48] S. G. T. G. Dubey S, «Analytical expression for electrical efficiency of PV/T hybrid air collector.,» *Appl Energy*, 2009.
- [49] S. S. T. A. Dubey S, «Energy and exergy analysis of PV/T air collectors connected in series.,» *Energy Build*, 2009.
- [50] T. Y., «Aspects and improvements of hybrid photovoltaic/thermal solar energy systems.,» *Sol Energy*, 2007.
- [51] M. C. F. G. Y. R. B. J. Assoa YB, «Study of a new concept of photovoltaic-thermal hybrid collector.,» *Sol Energy*, 2007.
- [52] H. W. L. H. Ji J, «The annual analysis of the power output and heat gain of a PV-wall with different integration mode in Hong Kong.,» *Sol Energy Mater Sol Cells*, 2001.
- [53] Yang H, Burnett J, Zhu Z., «Building-integrated photovoltaics: effect on the cooling load component of building facades.,» *Building Serv Eng Res Technol*, 2001.
- [54] H. J. S. P. Chow TT, «Building-integrated photovoltaic and thermal applications in a subtropical hotel building.,» *Appl Therm Eng*, 2003.
- [55] S. M και M. B., «Buoyancy-induced air flow in photovoltaic facades – effect of geometry of the air gap and location of solar cell modules».

- [56] Mittelman G, Alshare A, Davidson JH., «A model and heat transfer correlation for rooftop integrated photovoltaics with a passive air cooling channel.»
- [57] Mei L, Infield D, Eicker U, Fux V, «Thermal modeling of a building with an integrated ventilated PV facade,» *Energy Build*, 2003.
- [58] Crawford RH, Treloar GJ, Fuller RJ, Bazilian M., «Life-cycle energy analysis of building integrated photovoltaic systems (BiPVs) with heat recovery unit.,» *Renew Sust Energy Rev*, 2006.
- [59] Zondag HA, de Vries DW, van Helden WGJ, van Zolingen RJC., «The yield of different combined PV-thermal collector designs. Sol,» *Sol Energy*, 2003\.
- [60] Sandnes B, Rekstad J. , «A photovoltaic/thermal (PV/T) collector with a polymer absorber plate: experimental study and analytic model.,» *Sol Energy*, 2002.
- [61] Chow TT., «Performance analysis of photovoltaic-thermal collector by explicit dynamic model.,» *Sol Energy*, 2003.
- [62] Zakherchenko R, Licea-Jime'nez L, Pe'rez-Garci'a SA, Vorobeiv P, Dehesa-Carrasco U, Pe'rez-Robels JF, et al., «Photovoltaic solar panel for a hybrid PV/thermal system.,» *Sol Energy Mater Sol Cells*, 2004.
- [63] Dubey S, Tiwari GN., «Thermal modeling of a combined system of photovoltaic thermal (PV/T) solar water heater.,» *Sol Energy*, 2008.
- [64] Kalogirou SA., «Use of TRNSYS for modeling and simulation of a hybrid PV-thermal solar system for Cyprus.,» *Renew Energy*, 2001.
- [65] Kalogirou SA, Tripanagnostopoulos Y., «Hybrid PV/T solar systems for domestic hot water and electricity production,» *Energy Convers Manage*, 2006.
- [66] Kalogirou SA, Tripanagnostopoulos Y., «Industrial application of PV/T solar energy systems.,» *Appl Therm Eng*, 2007.
- [67] Vokas G, Christandonis N, Skittides., «Hybrid photovoltaic-thermal systems for domestic heating and cooling – a theoretical approach.,» *Sol Energy*, 2006.
- [68] Saitoh H, Hamada Y, Kubota H, Nakamura M, Ochifuji K, Yokoyama S, et al., «Field experiments and analysis on a hybrid solar collector,» *Appl Therm Eng*, 2003.
- [69] Dubey S, Tiwari GN., «Analysis of PV/T flat plate water collectors connected in series.,» *Sol Energy*, 2009.

- [70] Tiwari A, Dubey S, Sandhu, Sodha MS, Anwar SI., «Exergy analysis of integrated photovoltaic thermal solar water heater under constant flow rate and constant collection temperature modes.,» *Appl Energy*, 2009.
- [71] Huang BJ, Lin TH, Hung WC, Sun FS. , «Performance evaluation of solar photovoltaic/thermal systems.,» *Sol Energy*, 2001.
- [72] He Wei, Chow Tin-Tai, Ji Jie, Lu Jianping, Pei Gang, Chan Lok-shun., «Hybrid photovoltaic and thermal solar collector designed for natural circulation of water.,» *Appl Energy* , 2006.
- [73] Ji Jie, Han Jun, Chow Tin-tai, Han Chongwei, Lu Jianping, He Wei., «Effect of flow channel dimensions on the performance of a box-frame photovoltaic/thermal collector.,» *J Power Energy*, 2006.
- [74] Chow TT, He W, Ji J, Chan ALS., «Performance evaluation of photovoltaic thermosyphon system for subtropical climate application.,» *Sol Energy*, 2007.
- [75] Cristofari C, Notton G, Canaletti JL., «Thermal behaviour of a copolymer PV/Th solar system in low flow rate conditions.,» *Sol Energy* , 2009.
- [76] Ji Jie, Chow Tin-Tai, He Wei, «Dynamic performance of hybrid photovoltaic/thermal collector wall in Hong Kong.,» *Build Environ*, 2003.
- [77] Chow TT, Chan ALS, Fong KF, Lo WC, Song CL, «Energy performance of a solar hybrid collector system in multi-story apartment building.,» *J Power Energy*, 2005.
- [78] Chow TT, He W, Ji J., «An experimental study of façade-integrated photovoltaic/water-heating system.,» *Appl Therm Eng*, 2007.
- [79] Ji Jie, Han Jun, Chow Tin-tai, Yi Hua, Lu Jianping, He Wei, et al., «Effect of fluid flow and packing factor on energy performance of a wall-mounted hybrid photovoltaic/water-heating collector system.,» *Energy Build*, 2006.
- [80] Chow TT, Chan ALS, Fong KF, Lin Z, He W, Ji J., «Annual performance of building-integrated photovoltaic/water-heating system for warm climate application.,» *Appl Energy* , 2009.
- [81] Ji Jie, Liu Keliang, Chow Tin-Tai, Pei Gang, He Wei, He Hanfeng., «Performance analysis of a photovoltaic heat pump.,» *Appl Energy* , 2008.
- [82] Ji Jie, Liu Keliang, Chow Tin-tai, Pei Gang, He Hanfeng, «Thermal analysis of PV/T evaporator of a solar assisted heat pump.,» *Int J Energy Res*, 2007.

- [83] Pei G, Ji J, Chow TT, He H, Liu K, Yi H., «Comparative analysis of winter performance of PV-SAHP system with and without glass cover.,» *J Power Energy*, 2008.
- [84] Segal A, Epstein M, Yogevev A., «Hybrid concentrated photovoltaic and thermal power conversion at different spectral bands.,» *Sol Energy*, 2004.
- [85] Royne A, Dey CJ, Mills DR., «Cooling of photovoltaic cells under concentrated illumination: a critical review.,» *Sol Energy Mater Sol Cells*, 2005.
- [86] Rosell JI, Vallverdu X, Lechon MA, Ibanez M., «Design and simulation of a low concentrating photovoltaic/thermal system.,» *Energy Convers Manage*, 2005.
- [87] Coventry JS, «Performance of a concentrating photovoltaic/thermal collector.,» *Sol Energy*, 2005.
- [88] Kribus A, Kaftori D, Mittelman G, Hirshfeld A, Flitsanov Y, Dayan A., «A miniature concentrating photovoltaic and thermal system.,» *Energy Convers Manage*, 2006.
- [89] Nilsson J, Hakansson H, Karlsson B., «Electrical and thermal characterization of a PV-CPC hybrid.,» *Sol Energy*, 2007.
- [90] Vorobiev Y, Gonzalez-Hernandez J, Vorobiev P, Bulat L., «Thermal-photo hybrid system for efficient solar energy conversion.,» *Sol energy*, 2006.
- [91] Vorobiev YV, Gonzalez-Hernandez J, Kribus A., «Analysis of potential conversion efficiency of a solar hybrid system with high-temperature stage.,» *Sol Energy Eng*, 2006.
- [92] Mittelman G, Kribus A, Dayan A, «Solar cooling with concentrating photovoltaic/thermal (CPVT) systems.,» *Energy Convers Manage*, 2007.
- [93] Mittelman G, Kribus A, Mouchtar O, Dayan A., «Water desalination with concentrating photovoltaic/thermal (CPVT) systems.,» *Sol Energy*, 2009.
- [94] Κ. Αντωνόπουλος, Ηλιακή Ενέργεια, Εκδόσεις ΕΜΠ, 2016.
- [95] ITACA, «The Sun As A Source Of Energy,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.itacanet.org/the-sun-as-a-source-of-energy/>.
- [96] Collares-Perreira M., Rabl A., «The average distribution of solar radiation - correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values.,» *Solar Energy*, τόμ. 22, pp. 155-164.
- [97] John A. Duffie, William A. Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes, Wiley, 1991.
- [98] «Coated glass, the only proper lens for any luminaire,» [Ηλεκτρονικό]. Available:

- <http://amper.ped.muni.cz/light/EuP/FS.htm>. [Πρόσβαση 6 January 2016].
- [99] CANMET Energy Technology Center, «Photovoltaic Project Analysis,» [Ηλεκτρονικό]. Available: [www.retscreen.net/download.php/ang/117/0/Textbook\\_PV.pdf](http://www.retscreen.net/download.php/ang/117/0/Textbook_PV.pdf). [Πρόσβαση 6 January 2016].
- [100] Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος, [Ηλεκτρονικό]. Available: [http://helapco.gr/pdf/TOTEE\\_20701\\_3\\_Final\\_TEE\\_2nd.pdf](http://helapco.gr/pdf/TOTEE_20701_3_Final_TEE_2nd.pdf). [Πρόσβαση 6 January 2016].
- [101] ΣΗΜΜΥ - ΕΜΠ, [Ηλεκτρονικό]. Available: [http://www.e3mlab.ntua.gr/courses/%CE%94%CE%99%CE%91%CE%A6%CE%91%CE%9D%CE%95%CE%99%CE%95%CE%A3\\_%CE%95%CE%9D%CE%95%CE%A1%CE%93%CE%95%CE%99%CE%91%CE%9A%CE%97\\_%CE%9F%CE%99%CE%9A/NTUA\\_Energy\\_Economics\\_slides.pdf](http://www.e3mlab.ntua.gr/courses/%CE%94%CE%99%CE%91%CE%A6%CE%91%CE%9D%CE%95%CE%99%CE%95%CE%A3_%CE%95%CE%9D%CE%95%CE%A1%CE%93%CE%95%CE%99%CE%91%CE%9A%CE%97_%CE%9F%CE%99%CE%9A/NTUA_Energy_Economics_slides.pdf). [Πρόσβαση 6 January 2006].
- [102] Moradi, Kamran; Ali Ebadian, M.; Lin, Cheng-Xian, «A review of PVT technologies,» *International Journal of Heat and Mass Transfer*, τόμ. 64, αρ. 2013.



# Παραρτήματα

## Παράρτημα Α – Κώδικας Matlab

```
classdef DiplomatikiFinal
    % Thesis code
    % author: Aristeidis Kontos

    properties
        % =====
        % Adjust the following variables
        % =====

        % Average daylight temperature for each zone - Data from TOTEE
        AVERAGE_TEMP_PER_MONTH = [
            %12.9, 13.2, 14.6, 17.7, 21.5, 25.8, 27.6, 27.3, 24.6, 20.7,
17.5, 14.5 % Zone A
            %11.0, 11.5, 13.3, 17.3, 22.3, 27.1, 29.8, 29.6, 25.8, 20.8, 16.2,
12.7 % Zone B
            %6.5, 8.1, 11.2, 15.8, 21.1, 25.9, 28.2, 27.7, 23.5, 17.8, 12.4,
8.1 % Zone C
            %6.3, 7.6, 10.5, 14.0, 19.2, 23.7, 26.7, 26.5, 22.1, 16.9, 11.4,
7.3 % Zone D
        ];
        % Average water system temperature - Data from TOTEE
        AVERAGE_WATER_TEMP_PER_MONTH = [
            %14.2, 13.4, 13.7, 15.4, 17.8, 20.9, 23.0, 24.1, 23.6, 21.7,
19.0, 16.1 % Zone A
            %11.3, 10.9, 11.8, 14.3, 17.7, 21.6, 24.7, 25.7, 24.2, 21.1, 16.9,
13.5 % Zone B
            %8.2, 7.9, 9.2, 12.8, 16.8, 20.2, 21.5, 22.8, 22.1, 19.4, 15.7,
11.0 % Zone C
            %6.2, 6.4, 8.0, 10.9, 14.1, 18.0, 21.5, 23.2, 21.6, 17.9, 13.1,
8.9 % Zone D
        ];
        % Kt - Data from TOTEE
        CLEARNESS_INDEX = [
```

```

        %0.40, 0.45, 0.49, 0.56, 0.62, 0.63, 0.64, 0.64, 0.61, 0.52,
0.50, 0.42 % Zone A
        0.45, 0.46, 0.49, 0.52, 0.56, 0.60, 0.61, 0.63, 0.61, 0.55, 0.47,
0.43 % Zone B
        %0.41, 0.43, 0.44, 0.49, 0.52, 0.57, 0.60, 0.59, 0.55, 0.48,
0.43, 0.40 % Zone C
        %0.39, 0.41, 0.44, 0.47, 0.52, 0.58, 0.61, 0.60, 0.54, 0.50,
0.42, 0.38 % Zone D
    ];
    % Geographic latitude of Athens
    PHI = 38.03 * (pi / 180);
    % Inclination of the parabolic collector
    BETA = 38.03 * (pi / 180);
    % PV Reference temperature
    REFERENCE_TEMP = 25;
    % Base coefficient of the PV module
    HETAr = 18.60 / 100;
    % Temperature coefficient for module efficiency
    BETAp = -0.39 / 100;
    % Max electrical output of the solar panel
    MAX_SOLAR_PANEL_POWER = 0.230;
    % Reflectivity factor
    RHO = 0.2;
    % Solar constant
    Gsc = 1353;
    % Aperture width of the collector in m
    APERTURE_WIDTH = 0.282;
    % Aperture width of the collector in m
    APERTURE_LENGTH = 2.290;
    % Reflected beam width in m
    REFL_BEAM_WIDTH = 0.148;
    % Reflected beam length in m
    REFL_BEAM_LENGTH = 2.290;
    % PV Cell width
    PV_CELL_WIDTH = 0.148;
    % PV Cell length
    PV_CELL_LENGTH = 0.026;
    % Number of PV cells per string
    PV_STRING_CELLS = 38;
    % Number of "cells" between two PV Arrays
    CELLS_BETWEEN_STRINGS = 5;
    % Coolant inlet temperature (oC) - Use -1 to use tap water
temperature
    COOLANT_INLET_TEMP = -1;
    % Coolant flow rate (in litres per hour)
    COOLANT_FLOW_RATE = 70;
    % Coolant heat capacitance (in J/kg*K)
    COOLANT_CP = 3625;
    % Heat loss coefficient of the thermal absorber (in W/m^2*K)
    ABSORBER_HLC = 4.8;
    % F' of the thermal absorber
    ABSORBER_F = 0.96;
    % Reflector reflectance efficiency
    REFL_EFFICIENCY = 0.90;

    % =====
    % DO NOT EDIT BELOW THIS LINE

```

```

% =====
DAYS_PER_MONTH = [31, 28, 31, 30, 31, 30, 31, 31, 30, 31, 30, 31];
PV_CELL_AREA
PV_TOTAL_AREA
APERTURE_AREA
REFL_BEAM_AREA
BEAM_CELL_AREA
end

methods
function self = DiplomatikiFinal()
% Initialize
self.PV_CELL_AREA = self.PV_CELL_WIDTH * self.PV_CELL_LENGTH;
self.PV_TOTAL_AREA = self.PV_CELL_AREA * self.PV_STRING_CELLS * 2
* 4;
self.APERTURE_AREA = self.APERTURE_WIDTH * self.APERTURE_LENGTH;
self.REFL_BEAM_AREA = self.REFL_BEAM_WIDTH *
self.REFL_BEAM_LENGTH;
self.BEAM_CELL_AREA = self.PV_CELL_LENGTH * self.REFL_BEAM_WIDTH;

fprintf('Month\tElectrical\tThermal\tEfficiency\n');

for i=1:12
day = self.getTypicalDayOfMonth(i);
electricalEnergy = 0;
thermalEnergy = 0;
electricalEfficiency = 0;
counter = 1;

for j=1:24
omega = (self.OMEGA(j) + self.OMEGA(j+1)) / 2.0;
result = self.getOutputForDayAndHour(day, omega);

electricalEnergy = electricalEnergy + result(1);
thermalEnergy = thermalEnergy + result(2);

if (electricalEfficiency == 0)
electricalEfficiency = result(3);
else
if (result(3) > 0)
counter = counter + 1;
electricalEfficiency = electricalEfficiency +
result(3);
end
end
end

electricalEnergy = electricalEnergy * self.DAYS_PER_MONTH(i);
thermalEnergy = thermalEnergy * self.DAYS_PER_MONTH(i);
electricalEfficiency = electricalEfficiency / counter;

fprintf('%d\t%6.2f\t%6.2f\t%6.2f\t\n',i, electricalEnergy,
thermalEnergy, electricalEfficiency);
end
end

% Declination angle  $\delta$ 

```

```

function res = DELTA(self, day)
    res = 23.45 * sin( (2 * pi) * (284 + day) / 365 ) * (pi / 180.0);
    return
end

% Solar elevation angle  $\alpha$ 
function res = ALPHA(self, day, v)
    res = asin(sin(self.DELTA(day))*sin(self.PHI) +
cos(self.DELTA(day))*cos(self.PHI)*cos(v));
    return
end

% Solar hour angle  $\omega$ 
function res = OMEGA(self, hour)
    res = 15 * (pi / 180) * (hour - 12);
    return
end

% Sunrise sunset hour angle  $\omega_{ss}$ 
function res = OMEGA_SS(self, day)
    res = acos(- tan(self.PHI) * tan(self.DELTA(day)));
    return
end

% Correlation between I and H
function res = Rt(self, day, omega)
    a = 0.409 + (0.5016 * sin(self.OMEGA_SS(day) - (60 * (pi /
180.0))));
    ab = 0.6609 - (0.4767 * sin(self.OMEGA_SS(day) - (60 * (pi /
180.0))));
    ar = pi * (a + ab*cos(omega)) * (cos(omega) -
cos(self.OMEGA_SS(day)));
    par = 24.0 * (sin(self.OMEGA_SS(day)) -
(((self.OMEGA_SS(day))*cos(self.OMEGA_SS(day))));
    res = ar / par;
    return
end

% Correlation between Id and Hd
function res = Rd(self, day, omega)
    ar = pi * (cos(omega) - cos(self.OMEGA_SS(day)));
    par = 24.0 * (sin(self.OMEGA_SS(day)) -
(((self.OMEGA_SS(day))*cos(self.OMEGA_SS(day))));
    res = ar / par;
    return
end

% Ratio of beam (direct) radiation on tilted plane to that of
% horizontal plane
function res = Rb(self, day, omega)
    a = cos((pi/2.0) - (self.ALPHA(day, omega) + self.BETA));
    p = sin(self.ALPHA(day, omega));
    res = a / p;
    return
end

% Ratio of average daily diffuse radiation to average daily global

```

```

% radiation
function res = HdH(self, day)
    kt = self.getClearnessIndex(day);

    if (kt <= 0.17)
        res = 0.99;
    elseif (kt > 0.17 && kt <= 0.75)
        res = 1.188 - (2.272 * kt) + (9.473 * power(kt, 2)) - (21.865
* power(kt, 3)) + (14.648 * power(kt, 4));
    elseif (kt > 0.75 && kt <= 0.80)
        res = (0.54 * kt) + 0.632;
    else
        res = 0.2;
    end

    return
end

% Extraterrestrial daily radiation on a horizontal surface
function res = Ho(self, day)
    val = ((24.0*3600.0)/pi) * self.Gsc * (1 + (0.033*cos( ((360 *
day)/365)* (pi / 180) ))) *
((cos(self.DELTA(day))*cos(self.PHI)*(sin(self.OMEGA_SS(day)))) +
((2*pi*(self.OMEGA_SS(day)))/360)*(180.0/pi))*sin(self.DELTA(day)) *
sin(self.PHI));

    if (val > 0)
        res = val;
    else
        res = 0;
    end

    return
end

% Get month from day of year
function res = getMonth(self, day)
    if (day == 0)
        res = 1;
    return
end

month = 0;

while (day > 0)
    month = month+1;
    day = day - self.DAYS_PER_MONTH(month);
end

res = month;
return
end

% Get clearness index from day
function res = getClearnessIndex(self, day)
    res = self.CLEARNESS_INDEX(self.getMonth(day));
return
end

```

```

end

% Get typical daily of month
function res = getTypicalDayOfMonth(self, month)
    if (month == 1)
        res = 17;
    elseif (month == 2)
        res = 47;
    elseif (month == 3)
        res = 75;
    elseif (month == 4)
        res = 105;
    elseif (month == 5)
        res = 135;
    elseif (month == 6)
        res = 162;
    elseif (month == 7)
        res = 198;
    elseif (month == 8)
        res = 228;
    elseif (month == 9)
        res = 258;
    elseif (month == 10)
        res = 288;
    elseif (month == 11)
        res = 318;
    elseif (month == 12)
        res = 344;
    end

    return
end

% Returns panel efficiency based on its temperature
function res = panelEfficiency(self, Tc)
    res = self.HETAr * (1 + self.BETAp * (Tc - self.REFERENCE_TEMP));
    return
end

% Returns glass transmittance based on radiation angle
function res = getGlassTransmittance(self, angle)
    n1 = 1;
    n2 = 1.52;

    t = asin(n1*sin(angle)/n2);
    rp = power(((n1*cos(angle)-n2*cos(t))/(n1*cos(angle)+n2*cos(t))),
2);
    rs = power(((n2*cos(angle)-n1*cos(t))/(n2*cos(angle)+n1*cos(t))),
2);

    res = ((1-rs)/(1+rs) + (1-rp)/(1+rp)) / 2;
    return
end

% Returns ambient temperature of day
function res = getAmbientTemperature(self, day)
    res = self.AVERAGE_TEMP_PER_MONTH(self.getMonth(day));

```

```

        return
    end

    % Returns water temperature of day
    function res = getWaterTemperature(self, day)
        res = self.AVERAGE_WATER_TEMP_PER_MONTH(self.getMonth(day));
        return
    end

    % Returns coolant's inlet temperature
    function res = getCoolantInletTemp(self)
        res = self.COOLANT_INLET_TEMP;
        return
    end

    % Calculate Tout, Pel, Pth, eff based on inputs
    function res = calculate(self, day, top_irr, bottom_irr, IT,
inlet_temp, coolant_flow)
        outlet_temp = inlet_temp * 2.20; % initial value for loop
        m_dot = coolant_flow / 3600; % kg/s

        % Initialize arrays and variables
        cells =
(self.PV_STRING_CELLS+self.CELLS_BETWEEN_STRINGS+self.PV_STRING_CELLS);
        bound_temp_array = zeros(cells+3);
        cell_temp_array = zeros(cells+2);
        cell_eff_array = zeros(cells+2);

        error = 9999999999;
        electricalPowerFront = 0.0;
        electricalPowerBack = 0.0;
        thermalPower = 0.0;
        thermalPower1 = 0.0;
        thermalPower2 = 0.0;
        thermalPower3 = 0.0;
        thermal_power_array = zeros(cells+3);

        % Boundary conditions
        bound_temp_array(1) = inlet_temp;
        bound_temp_array(cells+2) = outlet_temp;

        % loop to calculate Pel and Pth
        while (error > power(10, -6))
            if (thermalPower == 0.0)
                % Initialize the array - Just a dummy initialization
                for i=2:cells+1
                    bound_temp_array(i) = bound_temp_array(i-1) +
(((outlet_temp - inlet_temp) / (cells+1)));
                end
            else
                for i=2:self.PV_STRING_CELLS+1
                    S = (thermalPower1 * 1000) / (self.PV_CELL_AREA *
self.PV_STRING_CELLS * 4); % W/m^2
                    a = (S / self.ABSORBER_HLC); % (S/UL)
                    Ta = self.getAmbientTemperature(day);
                    Ac = self.PV_CELL_AREA * (i-1) * 2;

```

```

        bound_temp_array(i) = ((inlet_temp - Ta -a) * exp( -
1.0 * (self.ABSORBER_HLC*Ac*self.ABSORBER_F) / (m_dot * self.COOLANT_CP) )) +
Ta + a;
        end

        for
i=self.PV_STRING_CELLS+2:self.PV_STRING_CELLS+1+self.CELLS_BETWEEN_STRINGS+1
        S = (thermalPower2 * 1000) / (self.PV_CELL_AREA *
self.CELLS_BETWEEN_STRINGS * 4); % W/m^2
        a = (S / self.ABSORBER_HLC); % (S/UL)
        Ta = self.getAmbientTemperature(day);
        Ac = self.PV_CELL_AREA * ((i-1)-self.PV_STRING_CELLS)
* 2;
        bound_temp_array(i) =
((bound_temp_array(self.PV_STRING_CELLS+1) - Ta -a) * exp( -1.0 *
(self.ABSORBER_HLC*Ac*self.ABSORBER_F) / (m_dot * self.COOLANT_CP) )) + Ta +
a;
        end

        for
i=self.PV_STRING_CELLS+1+self.CELLS_BETWEEN_STRINGS+1+1:cells+2
        S = (thermalPower3 * 1000) / (self.PV_CELL_AREA *
self.PV_STRING_CELLS * 4); % W/m^2
        a = (S / self.ABSORBER_HLC); % (S/UL)
        Ta = self.getAmbientTemperature(day);
        Ac = self.PV_CELL_AREA * ((i-1)-
(self.PV_STRING_CELLS+1+self.CELLS_BETWEEN_STRINGS)) * 2;
        bound_temp_array(i) =
((bound_temp_array(self.PV_STRING_CELLS+1+self.CELLS_BETWEEN_STRINGS+1) - Ta
-a) * exp( -1.0 * (self.ABSORBER_HLC*Ac*self.ABSORBER_F) / (m_dot *
self.COOLANT_CP) )) + Ta + a;
        end

        error = abs((bound_temp_array(cells+2) - outlet_temp));
        outlet_temp = bound_temp_array(cells+2);
    end

    electricalPowerFront = 0.0;
    electricalPowerBack = 0.0;
    thermalPower = 0.0;
    thermalPower1 = 0.0;
    thermalPower2 = 0.0;
    thermalPower3 = 0.0;

    % Calculate cell temp
    for i=2:cells+1
        cell_temp_array(i) = (bound_temp_array(i-1) +
bound_temp_array(i)) / 2.0;
    end

    % Calculate the module efficiency
    for i=2:cells+1
        cell_eff_array(i) =
self.panelEfficiency(cell_temp_array(i));
    end

    for i=2:cells+1

```



```

        bottom_irr_cor = (bottom_irr);

        if ((i-1) >= 1 && (i-1) <= self.PV_STRING_CELLS || (i-1)
>= (self.PV_STRING_CELLS+self.CELLS_BETWEEN_STRINGS+1) && (i-1) <= cells)
            elPowFrCell = (self.PV_CELL_AREA * cell_eff_array(i)
* (top_irr*0.27777));
            elPowBaCell = (self.BEAM_CELL_AREA *
cell_eff_array(i) * (bottom_irr_cor*0.27777));

            if (elPowFrCell > (self.MAX_SOLAR_PANEL_POWER /
(self.PV_STRING_CELLS * 8)))
                electricalPowerFront = electricalPowerFront +
(self.MAX_SOLAR_PANEL_POWER / (self.PV_STRING_CELLS * 8)) * 2;
                thermal_power_array(i) = thermal_power_array(i) +
(elPowFrCell - (self.MAX_SOLAR_PANEL_POWER / (self.PV_STRING_CELLS * 8))) *
2;
                thermal_power_array(i) = thermal_power_array(i) +
(self.PV_CELL_AREA * (1-cell_eff_array(i)) * (top_irr*0.27777)) * 2;
            else
                electricalPowerFront = electricalPowerFront +
elPowFrCell*2;
                thermal_power_array(i) = thermal_power_array(i) +
(self.PV_CELL_AREA * (1-cell_eff_array(i)) * (top_irr*0.27777)) * 2;
            end

            if (elPowBaCell > (self.MAX_SOLAR_PANEL_POWER /
(self.PV_STRING_CELLS * 8)))
                electricalPowerBack = electricalPowerBack +
(self.MAX_SOLAR_PANEL_POWER / (self.PV_STRING_CELLS * 8)) * 2;
                thermal_power_array(i) = thermal_power_array(i) +
(elPowBaCell - (self.MAX_SOLAR_PANEL_POWER / (self.PV_STRING_CELLS * 8))) *
2;
                thermal_power_array(i) = thermal_power_array(i) +
((self.BEAM_CELL_AREA * (1-cell_eff_array(i)) * (bottom_irr_cor*0.27777)) +
(self.BEAM_CELL_AREA * (bottom_irr - bottom_irr_cor)*0.27777)) * 2;
            else
                electricalPowerBack = electricalPowerBack +
elPowBaCell*2;
                thermal_power_array(i) = thermal_power_array(i) +
((self.BEAM_CELL_AREA * (1-cell_eff_array(i)) * (bottom_irr_cor*0.27777)) +
(self.BEAM_CELL_AREA * (bottom_irr - bottom_irr_cor)*0.27777)) * 2;
            end
        else
            thermal_power_array(i) = thermal_power_array(i) +
(self.PV_CELL_AREA * (top_irr*0.27777)) * 2;
            thermal_power_array(i) = thermal_power_array(i) +
((self.BEAM_CELL_AREA * (bottom_irr_cor*0.27777)) + (self.BEAM_CELL_AREA
*(bottom_irr - bottom_irr_cor)*0.27777)) * 2;
        end
    end

    for i=2:self.PV_STRING_CELLS+1
        thermalPower1 = thermalPower1+thermal_power_array(i);
    end
    for
i=self.PV_STRING_CELLS+2:self.PV_STRING_CELLS+self.CELLS_BETWEEN_STRINGS+1
        thermalPower2 = thermalPower2+thermal_power_array(i);

```

```

        end
        for
i=self.PV_STRING_CELLS+self.CELLS_BETWEEN_STRINGS+2:cells+1
            thermalPower3 = thermalPower3+thermal_power_array(i);
        end

        for i=2:cells+2
            thermal_power_array(i) = 0.0;
        end

        thermalPower = thermalPower1 + thermalPower2 + thermalPower3;
    end

    electricalPower = electricalPowerFront + electricalPowerBack;
    elEfficiency =
(electricalPower)/((self.APERTURE_AREA+(self.PV_TOTAL_AREA/2)) * IT *
0.27777);

    res = [ outlet_temp, electricalPower, thermalPower, elEfficiency
];

    return;
end

% Returns Pel, Pth, eff for day and hour specified
function res = getOutputForDayAndHour(self, date, omega)
    day = self.getTypicalDayOfMonth(self.getMonth(date));

    rt = self.Rt(day, omega);
    rd = self.Rd(day, omega);
    Ho = self.Ho(day)/power(10,6);
    H = self.getClearnessIndex(day) * Ho;
    Hd = H*self.HdH(day);
    I = rt*H;
    Id = rd*Hd;
    Ib = I - Id;

    if (I <= 0 || Id <= 0 || Ib <= 0)
        res = [ 0 0 0 ];
        return;
    end

    Rb = self.Rb(day, omega);
    IbT = Ib * Rb;
    IdT = Id * ((1 + cos(self.BETA))/2.0);
    IrT = (Ib + Id) * self.RHO * ((1 - cos(self.BETA))/2.0);
    IT = IbT + IdT + IrT;

    if (IT <= 0)
        res = [ 0 0 0 ];
        return;
    end

    incAngle = (pi/2.0) - (self.ALPHA(day, omega) + self.BETA);

    top_irr = IT * self.getGlassTransmittance(incAngle);
    bottom_irr = 0;

```

```

        if ((incAngle >= 0 && incAngle < (pi/2.0)))
            bottom_irr = ((IbT * self.getGlassTransmittance(incAngle) *
self.REFL_EFFICIENCY) * (self.APERTURE_AREA / self.REFL_BEAM_AREA));
        else
            bottom_irr = 0;
        end

        %
        % Current configuration:
        % x -> x |
        % x -> x | -> x
        %

        electricalPower = 0;
        thermalPower = 0;
        elEfficiency = 0;
        inlet_temp = 0;

        if (self.getCoolantInletTemp() == -1)
            inlet_temp = self.getWaterTemperature(day);
        else
            inlet_temp = self.getCoolantInletTemp(day);
        end

        coolant_flow = self.COOLANT_FLOW_RATE;

        res1 = self.calculate(day, top_irr, bottom_irr, IT, inlet_temp,
coolant_flow/2.0);
        electricalPower = electricalPower + (2 * res1(2));
        thermalPower = thermalPower + (2 * res1(3));
        elEfficiency = elEfficiency + (2 * res1(4));

        res2 = self.calculate(day, top_irr, bottom_irr, IT, res1(1),
coolant_flow/2.0);
        electricalPower = electricalPower + (2 * res2(2));
        thermalPower = thermalPower + (2 * res2(3));
        elEfficiency = elEfficiency + (2 * res2(4));

        res3 = self.calculate(day, top_irr, bottom_irr, IT, res2(1),
coolant_flow);
        electricalPower = electricalPower + (res3(2));
        thermalPower = thermalPower + (res3(3));
        elEfficiency = elEfficiency + (res3(4));

        elEfficiency = elEfficiency / 5;

        res = [ electricalPower, thermalPower, elEfficiency ];
        return;
    end
end

end

```

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

## Παράρτημα Β – Κώδικας Java

```
/**
 * Thesis program code
 * <br>
 * @author Aristeidis Kontos
 * @version 1.0.11
 */
public class DiplomatikiFinal
{
    // =====
    // Adjust the following variables
    // =====

    // Average daylight temperature for each zone - Data from TOTEE
    private static final double[] AVERAGE_TEMP_PER_MONTH = {
14.5 // Zone A
        12.9, 13.2, 14.6, 17.7, 21.5, 25.8, 27.6, 27.3, 24.6, 20.7, 17.5,
16.2, 12.7 // Zone B
        //11.0, 11.5, 13.3, 17.3, 22.3, 27.1, 29.8, 29.6, 25.8, 20.8,
        //6.5, 8.1, 11.2, 15.8, 21.1, 25.9, 28.2, 27.7, 23.5, 17.8, 12.4,
8.1 // Zone C
        //6.3, 7.6, 10.5, 14.0, 19.2, 23.7, 26.7, 26.5, 22.1, 16.9, 11.4,
7.3 // Zone D
    };

    // Average water system temperature - Data from TOTEE
    private static final double[] AVERAGE_WATER_TEMP_PER_MONTH = {
16.1 // Zone A
        14.2, 13.4, 13.7, 15.4, 17.8, 20.9, 23.0, 24.1, 23.6, 21.7, 19.0,
16.9, 13.5 // Zone B
        //11.3, 10.9, 11.8, 14.3, 17.7, 21.6, 24.7, 25.7, 24.2, 21.1,
        //8.2, 7.9, 9.2, 12.8, 16.8, 20.2, 21.5, 22.8, 22.1, 19.4, 15.7,
11.0 // Zone C
        //6.2, 6.4, 8.0, 10.9, 14.1, 18.0, 21.5, 23.2, 21.6, 17.9, 13.1,
8.9 // Zone D
    };

    // Kt - Data from TOTEE
    private static final double[] CLEARNESS_INDEX = {
0.42 // Zone A
        0.40, 0.45, 0.49, 0.56, 0.62, 0.63, 0.64, 0.64, 0.61, 0.52, 0.50,
0.47, 0.43 // Zone B
        //0.45, 0.46, 0.49, 0.52, 0.56, 0.60, 0.61, 0.63, 0.61, 0.55,
        //0.41, 0.43, 0.44, 0.49, 0.52, 0.57, 0.60, 0.59, 0.55, 0.48,
0.43, 0.40 // Zone C
        //0.39, 0.41, 0.44, 0.47, 0.52, 0.58, 0.61, 0.60, 0.54, 0.50,
0.42, 0.38 // Zone D
    };

    // Geographic latitude of Athens
    private static final double  $\varphi$  = 35.29 * (Math.PI / 180);
    // Inclination of the parabolic collector
    //private static final double  $\beta$  = 30 * (Math.PI / 180);
    private static final double  $\beta$  =  $\varphi$ ;
    // PV Reference temperature
    private static final int REFERENCE_TEMP = 25;
    // Base coefficient of the PV module
}
```

```

private static final double  $\eta_r$  = 18.60 / 100;
// Temperature coefficient for module efficiency
private static final double  $\beta_p$  = -0.39 / 100;
// Max electrical output of the solar panel
private static final double MAX_SOLAR_PANEL_POWER = 0.230;
// Reflectivity factor
private static final double  $\rho$  = 0.2;
// Solar constant
private static final double Gsc = 1353;
// Aperture width of the collector in m
private static final double APERTURE_WIDTH = 0.282;
// Aperture width of the collector in m
private static final double APERTURE_LENGTH = 2.290;
// Reflected beam width in m
private static final double REFL_BEAM_WIDTH = 0.148;
// Reflected beam length in m
private static final double REFL_BEAM_LENGTH = 2.290;
// PV Cell width
private static final double PV_CELL_WIDTH = 0.148;
// PV Cell length
private static final double PV_CELL_LENGTH = 0.026;
// Number of PV cells per string
private static final int PV_STRING_CELLS = 38;
// Number of cells between two PV Arrays
private static final int CELLS_BETWEEN_STRINGS = 5;
// Coolant inlet temperature (oC) - Use -1 to use tap water temperature
private static final double COOLANT_INLET_TEMP = -1;
// Coolant flow rate (in litres per hour)
private static final double COOLANT_FLOW_RATE = 70;
// Coolant heat capacitance (in J/kg*K)
private static final double COOLANT_CP = 3625;
// Heat loss coefficient of the thermal absorber (in W/m^2*K)
private static final double ABSORBER_HLC = 4.8;
// F' of the thermal absorber
private static final double ABSORBER_F = 0.96;
// Reflector reflectance efficiency
private static final double REFL_EFFICIENCY = 0.90;

// =====
// DO NOT EDIT BELOW THIS LINE
// =====

// Days per month - Used for calculations..
private static final int[] DAYS_PER_MONTH = {
    31, 28, 31, 30, 31, 30, 31, 31, 30, 31, 30, 31
};
// Area calculations..
private static final double PV_CELL_AREA = PV_CELL_WIDTH *
PV_CELL_LENGTH;
private static final double PV_TOTAL_AREA = PV_CELL_AREA *
PV_STRING_CELLS * 2 * 4;
private static final double APERTURE_AREA = APERTURE_WIDTH *
APERTURE_LENGTH;
private static final double REFL_BEAM_AREA = REFL_BEAM_WIDTH *
REFL_BEAM_LENGTH;
private static final double BEAM_CELL_AREA = PV_CELL_LENGTH *
REFL_BEAM_WIDTH;

```

```

/**
 * Returns power output and efficiency for day and hour
 *
 * @param date Day of the year
 * @param ω Solar hour angle
 * @return double[] Pel, Pth, eff
 */
public final double[] getOutputForDayAndHour(final int date, final
double ω)
{
    final int day = getTypicalDayOfMonth(getMonth(date));

    final double rt = Rt(day, ω);
    final double rd = Rd(day, ω);
    final double Ho = Ho(day)/Math.pow(10,6);
    final double H = getClearnessIndex(day) * Ho;
    final double Hd = H*HdH(day);
    final double I = rt*H;
    final double Id = rd*Hd;
    final double Ib = I - Id;

    if (I <= 0 || Id <= 0 || Ib <= 0)
        return new double[] { 0, 0, 0 };

    final double Rb = Rb(day, ω);
    final double IbT = Ib * Rb;
    final double IdT = Id * ((1 + Math.cos(β))/2.0);
    final double IrT = (Ib + Id) * ρ * ((1 - Math.cos(β))/2.0);
    final double IT = IbT + IdT + IrT;

    if (IT <= 0)
        return new double[] { 0, 0, 0 };

    final double incAngle = (Math.PI/2.0) - (α(day, ω) + β);

    final double top_irr = IT * getGlassTransmittance(incAngle);
    final double bottom_irr = (incAngle >= 0 && incAngle <
(Math.PI/2.0)) ? ((IbT * getGlassTransmittance(incAngle) * REFL_EFFICIENCY) *
(APERTURE_AREA / REFL_BEAM_AREA)) : 0;

    /**
     * Current configuration:
     * x -> x |
     * x -> x | -> x
     */

    double electricalPower = 0;
    double thermalPower = 0;
    double elEfficiency = 0;
    final double inlet_temp = getCoolantInletTemp() == -1 ?
getWaterTemperature(day) : getCoolantInletTemp();
    final double coolant_flow = COOLANT_FLOW_RATE;

    final double[] res1 = calculate(day, top_irr, bottom_irr, IT,
inlet_temp, coolant_flow/2.0);
    electricalPower += 2 * res1[1];
}

```

```

        thermalPower += 2 * res1[2];
        elEfficiency += 2 * res1[3];

        final double[] res2 = calculate(day, top_irr, bottom_irr, IT,
res1[0], coolant_flow/2.0);
        electricalPower += 2 * res2[1];
        thermalPower += 2 * res2[2];
        elEfficiency += 2 * res2[3];

        final double[] res3 = calculate(day, top_irr, bottom_irr, IT,
res2[0], coolant_flow);
        electricalPower += res3[1];
        thermalPower += res3[2];
        elEfficiency += res3[3];

        elEfficiency /= 5;

        return new double[] { electricalPower, thermalPower, elEfficiency
};
    }

/**
 * Calculating code for the power output of the device
 *
 * @param day Day of the year
 * @param top_irr Top irradiance
 * @param bottom_irr Bottom irradiance
 * @param IT Tilted surface irradiance
 * @param inlet_temp Coolant inlet temp
 * @param coolant_flow Coolant flow in lt/h
 * @return double[] outlet_temp, Pel, Pth, eff
 */
    private final double[] calculate(final int day, final double top_irr,
final double bottom_irr, final double IT, final double inlet_temp, final
double coolant_flow)
    {
        double outlet_temp = inlet_temp * 2.20; // init value
        double m_dot = coolant_flow / 3600; // kg/s

        final int cells =
(PV_STRING_CELLS+CELLS_BETWEEN_STRINGS+PV_STRING_CELLS);
        double[] bound_temp_array = new double[cells+2];
        double[] cell_temp_array = new double[cells+1];
        double[] cell_eff_array = new double[cells+1];

        double error = Double.MAX_VALUE;
        double electricalPowerFront = 0.0;
        double electricalPowerBack = 0.0;
        double thermalPower = 0.0;
        double thermalPower1 = 0.0;
        double thermalPower2 = 0.0;
        double thermalPower3 = 0.0;
        double[] thermal_power_array = new double[cells+2];

        bound_temp_array[0] = inlet_temp;
        bound_temp_array[cells+1] = outlet_temp;

```



```

while (error > Math.pow(10, -9))
{
    if (thermalPower == 0.0)
    {
        // Initialize the array - Just a dummy initialization
        for (int i = 1; i <= cells; i++)
            bound_temp_array[i] = bound_temp_array[i-1] +
            (((outlet_temp - inlet_temp) / (cells+1)));
    }
    else
    {
        for (int i = 1; i <= PV_STRING_CELLS; i++)
        {
            final double S = (thermalPower1 * 1000) /
            (PV_CELL_AREA * PV_STRING_CELLS * 4); // W/m^2
            final double a = (S / ABSORBER_HLC); // (S/UL)
            final double Ta = getAmbientTemperature(day);
            final double Ac = PV_CELL_AREA * i * 2;
            bound_temp_array[i] = ((inlet_temp - Ta -a) *
            Math.exp( -1.0 * (ABSORBER_HLC*Ac*ABSORBER_F) / (m_dot * COOLANT_CP) )) + Ta
            + a;
        }

        for (int i = PV_STRING_CELLS+1; i <=
        PV_STRING_CELLS+1+CELLS_BETWEEN_STRINGS; i++)
        {
            final double S = (thermalPower2 * 1000) /
            (PV_CELL_AREA * CELLS_BETWEEN_STRINGS * 4); // W/m^2
            final double a = (S / ABSORBER_HLC); // (S/UL)
            final double Ta = getAmbientTemperature(day);
            final double Ac = PV_CELL_AREA * (i-
            PV_STRING_CELLS) * 2;
            bound_temp_array[i] =
            ((bound_temp_array[PV_STRING_CELLS] - Ta -a) * Math.exp( -1.0 *
            (ABSORBER_HLC*Ac*ABSORBER_F) / (m_dot * COOLANT_CP) )) + Ta + a;
        }

        for (int i =
        PV_STRING_CELLS+1+CELLS_BETWEEN_STRINGS+1; i <= cells+1; i++)
        {
            final double S = (thermalPower3 * 1000) /
            (PV_CELL_AREA * PV_STRING_CELLS * 4); // W/m^2
            final double a = (S / ABSORBER_HLC); // (S/UL)
            final double Ta = getAmbientTemperature(day);
            final double Ac = PV_CELL_AREA * (i-
            (PV_STRING_CELLS+1+CELLS_BETWEEN_STRINGS)) * 2;
            bound_temp_array[i] =
            ((bound_temp_array[PV_STRING_CELLS+1+CELLS_BETWEEN_STRINGS] - Ta -a) *
            Math.exp( -1.0 * (ABSORBER_HLC*Ac*ABSORBER_F) / (m_dot * COOLANT_CP) )) + Ta
            + a;
        }

        //error = (bound_temp_array[TUBE_CELLS+1] -
        outlet_temp) / outlet_temp;
        error = Math.abs((bound_temp_array[cells+1] -
        outlet_temp));
        outlet_temp = bound_temp_array[cells+1];
    }
}

```

```

    }

    electricalPowerFront = 0.0;
    electricalPowerBack = 0.0;
    thermalPower = 0.0;
    thermalPower1 = 0.0;
    thermalPower2 = 0.0;
    thermalPower3 = 0.0;

    // Calculate cell temp
    for (int i = 1; i <= cells; i++)
        cell_temp_array[i] = (bound_temp_array[i-1] +
bound_temp_array[i]) / 2.0;

    // Calculate the module efficiency
    for (int i = 1; i <= cells; i++)
        cell_eff_array[i] = panelEfficiency(day,
cell_temp_array[i]);

    for (int i = 1; i <= cells; i++)
    {
        //final double bottom_irr_cor = (bottom_irr) > 3.61 ?
(3.61) : bottom_irr;
        final double bottom_irr_cor = (bottom_irr);

        if (i >= 1 && i <= PV_STRING_CELLS || i >=
(PV_STRING_CELLS+CELLS_BETWEEN_STRINGS+1) && i <= cells)
        {
            final double elPowFrCell = (PV_CELL_AREA *
cell_eff_array[i] * (top_irr*0.27777));
            final double elPowBaCell = (BEAM_CELL_AREA *
cell_eff_array[i] * (bottom_irr_cor*0.27777));

            if (elPowFrCell > (MAX_SOLAR_PANEL_POWER /
(PV_STRING_CELLS * 8)))
            {
                electricalPowerFront +=
(MAX_SOLAR_PANEL_POWER / (PV_STRING_CELLS * 8)) * 2;
                thermal_power_array[i] += (elPowFrCell -
(MAX_SOLAR_PANEL_POWER / (PV_STRING_CELLS * 8))) * 2;
                thermal_power_array[i] += (PV_CELL_AREA *
(1-cell_eff_array[i]) * (top_irr*0.27777)) * 2;
            }
            else
            {
                electricalPowerFront += elPowFrCell*2;
                thermal_power_array[i] += (PV_CELL_AREA *
(1-cell_eff_array[i]) * (top_irr*0.27777)) * 2;
            }

            if (elPowBaCell > (MAX_SOLAR_PANEL_POWER /
(PV_STRING_CELLS * 8)))
            {
                electricalPowerBack +=
(MAX_SOLAR_PANEL_POWER / (PV_STRING_CELLS * 8)) * 2;
                thermal_power_array[i] += (elPowBaCell -
(MAX_SOLAR_PANEL_POWER / (PV_STRING_CELLS * 8))) * 2;
            }
        }
    }
}

```

```

        thermal_power_array[i] +=
((BEAM_CELL_AREA * (1-cell_eff_array[i]) * (bottom_irr_cor*0.27777)) +
(BEAM_CELL_AREA *(bottom_irr - bottom_irr_cor)*0.27777)) * 2;
    }
    else
    {
        electricalPowerBack += elPowBaCell*2;
        thermal_power_array[i] +=
((BEAM_CELL_AREA * (1-cell_eff_array[i]) * (bottom_irr_cor*0.27777)) +
(BEAM_CELL_AREA *(bottom_irr - bottom_irr_cor)*0.27777)) * 2;
    }
}
else
{
    thermal_power_array[i] += (PV_CELL_AREA *
(top_irr*0.27777)) * 2;
    thermal_power_array[i] += ((BEAM_CELL_AREA *
(bottom_irr_cor*0.27777)) + (BEAM_CELL_AREA *(bottom_irr -
bottom_irr_cor)*0.27777)) * 2;
}
}

    for (int i = 1; i <= PV_STRING_CELLS; i++)
        thermalPower1 += thermal_power_array[i];
    for (int i = PV_STRING_CELLS+1; i <=
PV_STRING_CELLS+CELLS_BETWEEN_STRINGS; i++)
        thermalPower2 += thermal_power_array[i];
    for (int i = PV_STRING_CELLS+CELLS_BETWEEN_STRINGS+1; i <=
cells; i++)
        thermalPower3 += thermal_power_array[i];

    for (int i = 1; i <= cells+1; i++)
        thermal_power_array[i] = 0.0;

    thermalPower = thermalPower1 + thermalPower2 +
thermalPower3;
}

    final double electricalPower = electricalPowerFront +
electricalPowerBack;
    final double elEfficiency =
(electricalPower)/((APERTURE_AREA+(PV_TOTAL_AREA/2)) * IT * 0.27777);

    return new double[] { outlet_temp, electricalPower, thermalPower,
elEfficiency };
}

// Constructor
public DiplomatikiFinal()
{
    // Empty
}

// Declination angle
private final double δ(final int day)
{

```

```

        return 23.45 * Math.sin( (2 * Math.PI) * (284 + day) / 365 ) *
(Math.PI / 180.0);
    }

    // Solar elevation angle
    private final double  $\alpha$ (final int day, final double  $\omega$ )
    {
        return Math.asin(Math.sin( $\delta$ (day))*Math.sin( $\phi$ ) +
Math.cos( $\delta$ (day))*Math.cos( $\phi$ )*Math.cos( $\omega$ ));
    }

    // Solar hour angle
    private final double  $\omega$ (final int hour)
    {
        return 15 * (Math.PI / 180) * (hour - 12);
    }

    // Sunrise and sunset hour angle
    private final double  $\omega_s$ (final int day)
    {
        return Math.acos(- Math.tan( $\phi$ ) * Math.tan( $\delta$ (day)));
    }

    // Ratio of beam (direct) radiation on tilted plane to that of
horizontal plane
    private final double Rb(final int day, final double  $\omega$ )
    {
        final double a = Math.cos((Math.PI/2.0) - ( $\alpha$ (day,  $\omega$ ) +  $\beta$ ));
        final double p = Math.sin( $\alpha$ (day,  $\omega$ ));

        return a / p;
    }

    // Corelation between I and H
    private final double Rt(final int day, final double  $\omega$ )
    {
        final double a = 0.409 + (0.5016 * Math.sin( $\omega_s$ (day) - (60 *
(Math.PI / 180.0))));
        final double b = 0.6609 - (0.4767 * Math.sin( $\omega_s$ (day) - (60 *
(Math.PI / 180.0))));

        final double ar = Math.PI * (a + b * Math.cos( $\omega$ )) * (Math.cos( $\omega$ )
- Math.cos( $\omega_s$ (day)));
        final double par = 24.0 * (Math.sin( $\omega_s$ (day)) -  $\omega_s$ (day) *
Math.cos( $\omega_s$ (day)));

        return ar / par;
    }

    // Corelation between Id and Hd
    private final double Rd(final int day, final double  $\omega$ )
    {
        final double ar = Math.PI * (Math.cos( $\omega$ ) - Math.cos( $\omega_s$ (day)));
        final double par = 24.0 * (Math.sin( $\omega_s$ (day)) -  $\omega_s$ (day) *
Math.cos( $\omega_s$ (day)));

        return ar / par;
    }

```

```

    }

    // Ratio of average daily diffuse radiation to average daily global
    radiation
    private final double HdH(final int day)
    {
        final double kt = getClearnessIndex(day);

        if (kt <= 0.17)
            return 0.99;
        else if (kt > 0.17 && kt <= 0.75)
            return 1.188 - (2.272 * kt) + (9.473 * Math.pow(kt, 2)) -
(21.865 * Math.pow(kt, 3)) + (14.648 * Math.pow(kt, 4));
        else if (kt > 0.75 && kt <= 0.80)
            return (0.54 * kt) + 0.632;
        else
            return 0.2;
    }

    // Daily solar irradiation of horizontal plane
    private final double Ho(final int day)
    {
        final double val = ((24.0*3600.0)/Math.PI) * Gsc * (1 +
(0.033*Math.cos( ((360 * day)/365) * (Math.PI / 180) ))) *
((Math.cos(δ(day))*Math.cos(φ)*(Math.sin(ωs(day)))) +
((2*Math.PI*(ωs(day)))/360)*(180.0/Math.PI))*Math.sin(δ(day)) *
Math.sin(φ));

        return val > 0 ? val : 0;
    }

    // Returns month based on day of year
    private final int getMonth(int dayOfYear)
    {
        if (dayOfYear == 0)
            return 0;

        int month = -1;

        while (dayOfYear > 0)
        {
            month++;
            dayOfYear -= DAYS_PER_MONTH[month];
        }

        return month;
    }

    // Returns clearness index
    private final double getClearnessIndex(final int day)
    {
        return CLEARNESS_INDEX[getMonth(day)];
    }

    private final int getTypicalDayOfMonth(final int month)
    {

```

```

switch(month)
{
    case 0:
        return 17;
    case 1:
        return 47;
    case 2:
        return 75;
    case 3:
        return 105;
    case 4:
        return 135;
    case 5:
        return 162;
    case 6:
        return 198;
    case 7:
        return 228;
    case 8:
        return 258;
    case 9:
        return 288;
    case 10:
        return 318;
    default:
        return 344;
}

}

private final double panelEfficiency(final int day, final double Tc)
{
    return  $\eta_r$  * (1 +  $\beta_p$  * (Tc - REFERENCE_TEMP));
}

private final double getGlassTransmittance(final double angle)
{
    final double n1 = 1;
    final double n2 = 1.52;

    final double t = Math.asin(n1*Math.sin(angle)/n2);
    final double rp = Math.pow(((n1*Math.cos(angle)-
n2*Math.cos(t))/(n1*Math.cos(angle)+n2*Math.cos(t))), 2);
    final double rs = Math.pow(((n2*Math.cos(angle)-
n1*Math.cos(t))/(n2*Math.cos(angle)+n1*Math.cos(t))), 2);

    return ((1-rs)/(1+rs) + (1-rp)/(1+rp)) / 2;
}

private final double getAmbientTemperature(final int day)
{
    return AVERAGE_TEMP_PER_MONTH[getMonth(day)];
}

private final double getWaterTemperature(final int day)
{
    return AVERAGE_WATER_TEMP_PER_MONTH[getMonth(day)];
}

```

```

public static double getCoolantInletTemp()
{
    return COOLANT_INLET_TEMP;
}

public static void main(String[] args)
{
    // Launch object (non static execution) of the class
    DiplomatikiFinal diplom = new DiplomatikiFinal();

    System.out.println("Month\tElectrical\tThermal\tEfficiency");

    for (int i = 0; i < 12; i++)
    {
        final int day = diplom.getTypicalDayOfMonth(i);
        double electricalEnergy = 0;
        double thermalEnergy = 0;
        double electricalEfficiency = 0;
        int counter = 1;

        for (int j = 0; j < 24; j++)
        {
            final double  $\omega$  = (diplom. $\omega$ (j) + diplom. $\omega$ (j+1)) / 2.0;
            final double[] result =
diplom.getOutputForDayAndHour(day,  $\omega$ );

            electricalEnergy += result[0];
            thermalEnergy += result[1];

            if (electricalEfficiency == 0)
                electricalEfficiency = result[2];
            else
            {
                if (result[2] > 0)
                {
                    counter++;
                    electricalEfficiency += result[2];
                }
            }
        }

        electricalEnergy *= DAYS_PER_MONTH[i];
        thermalEnergy *= DAYS_PER_MONTH[i];
        electricalEfficiency /= counter;

        System.out.println((i+1)+"\t"+electricalEnergy+"\t"+thermalEnergy+"\t"+
electricalEfficiency);
    }
}

```

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.



## Παράρτημα Γ – Τεχνικά χαρακτηριστικά και renders

### 3 Technical Specifications

#### 3.1 Drawings

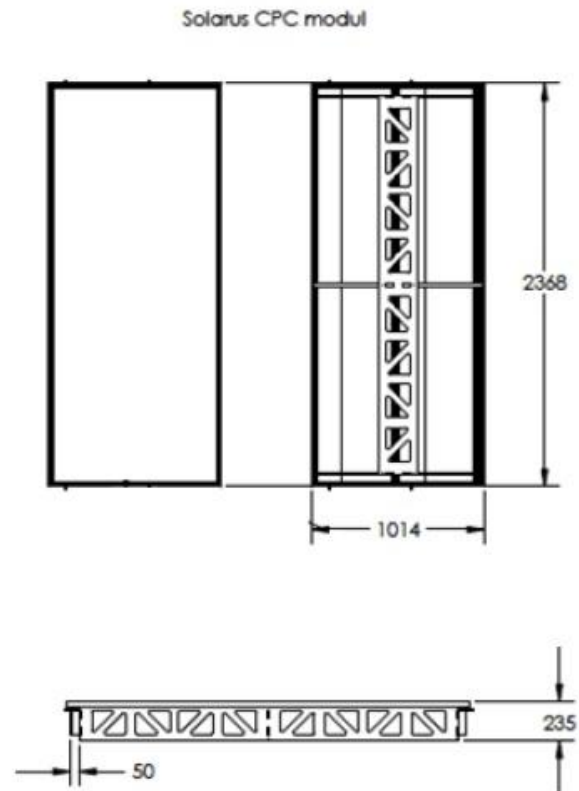


Figure 1: Dimensions of module

## 3.2 Specifications

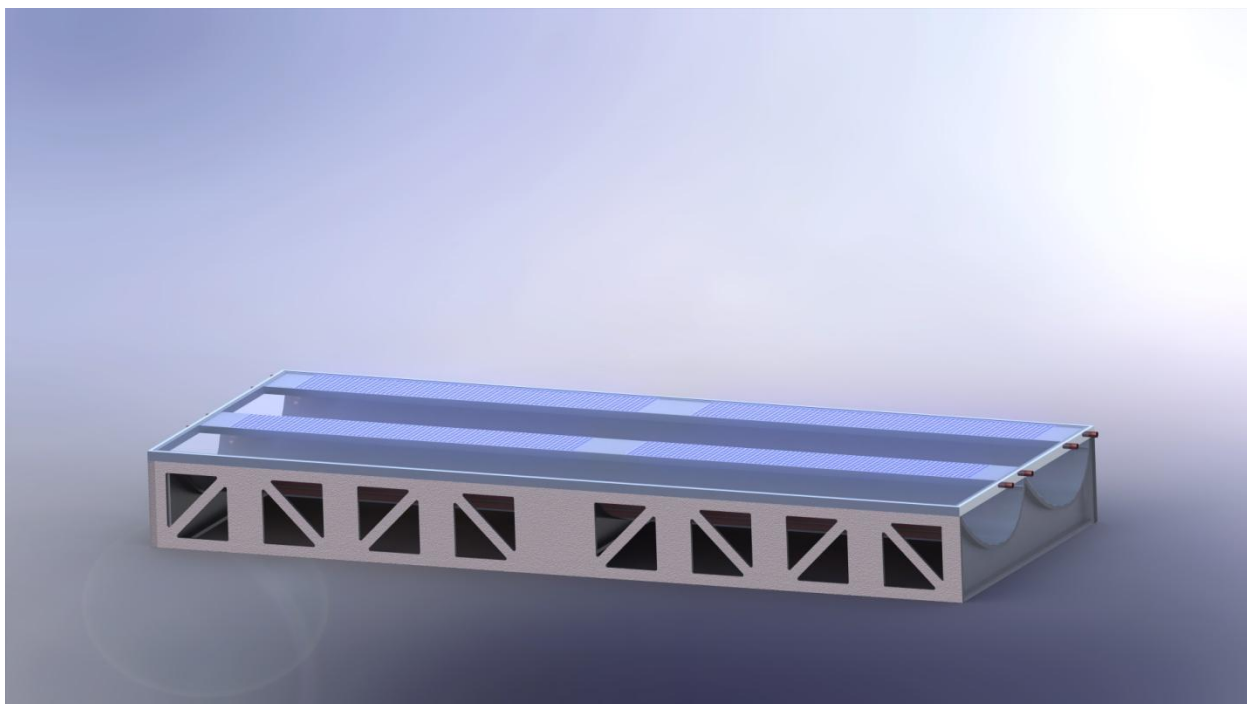
Table 1: Table of specifications

Physical properties collector	
Dimensions (L x W x H)	2368 x 1014 x 235 (mm)
Weight (empty/filled)	55 kg / 56.4 kg
Aperture area	2.17 m <sup>2</sup>
Gross area	2.40 m <sup>2</sup>
Cover	4mm low-iron tempered glass Hail safe.
Frame	Anodized aluminum & ASA/ABS plastic.
Cells	
Cell dimension (Length x Height x Thickness)	26.6 x 148 x 0.2 (mm)
Maximum power rating (P <sub>Max</sub> )	230 W (STC conditions) <sup>2</sup>
Warranted minimum	200 W
Maximum power voltage (V <sub>mp</sub> )	40 V
Maximum power current (I <sub>mp</sub> )	5 A
Open circuit voltage (V <sub>oc</sub> )	44 V
Short circuit current (I <sub>sc</sub> )	7 A
Thermal absorber	
Thermal losses first order	4.84 W/Km <sup>2</sup>
Thermal losses second order	0.0034 W/K <sup>2</sup> m <sup>2</sup>
Absorber material	Aluminium
Peak power at ambient <sup>2</sup>	1250 W
Fluid volume	1.4 litre / module
Max working pressure	10 Bar
Recommended flow	0.5 l/minute m <sup>2</sup>
Maximum flow	5 l/minute (per circuit)
Minimum flow	2 l/minute (per circuit)
Pressure drop per absorber	0.71 * flow [litre / minute] - 0.05
Stagnation temperature	175°C

Σχήμα 31 – Τεχνικά χαρακτηριστικά (2)



Σχήμα 32 – Render του μοντέλου στο Solidworks (1)



Σχήμα 33 – Render του μοντέλου στο Solidworks (2)