

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

2017



# ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ ΜΕ ΚΕΝΟ ΑΕΡΟΣ

ΚΑΛΑΝΤΖΗΣ ΑΛΚΙΒΙΑΔΗΣ  
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

## **Πρόλογος – Ευχαριστίες**

Οι ηλιακοί συλλέκτες μπορούν να δώσουν μία χρήσιμη λύση στις θερμικές απαιτήσεις των κτιρίων, όπως η θέρμανση οικιακού νερού και χώρων. Εκτός από εφαρμογές στη θέρμανση, υπάρχει επίσης ανάγκη να ικανοποιηθεί η αυξανόμενη κατανάλωση ενέργειας λόγω του κλιματισμού κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η αναλύση και μοντελοποίηση της λειτουργίας ενός ηλιακού συλλέκτη τύπου VTC.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την επίκουρη καθηγήτρια κ.Κορωνάκη Ειρήνη που μου έδωσε την ευκαιρία να ασχολήθω με το αντικείμενο αυτό καθώς και τον υποψήφιο διδάκτορα κ.Νίτσα Μιχάλη για την πολύτιμη καθοδήγησή του στην εκπόνηση της εργασίας αυτής.

Αλκιβιάδης Καλαντζής

02104680

Σεπτέμβριος 2017

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....	
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ .....	5
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ.....	5
1.2 ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ .....	6
1.2.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΗΛΙΟΥ .....	8
1.3 ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ .....	14
1.3.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΙΛΙΚΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΕ ΚΕΚΛΙΜΕΝΟ ΕΠΙΠΕΔΟ .....	19
1.3.2 ΑΠΛΟΥΣΤΕΥΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ.....	23
1.4 ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΛΙΣΗ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ.....	30
1.5 ΠΡΑΚΤΙΚΟΙ ΚΑΝΟΝΕΣ ΓΙΑ ΤΗ ΣΥΛΛΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ..	33
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ .....	35
2.1 ΕΙΔΗ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ .....	35
2.2 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ.....	36
2.3 ΜΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ.....	37
2.3.1 ΕΠΙΠΕΔΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ .....	37
2.3.2 ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ ΜΕ ΣΩΛΗΝΕΣ ΚΕΝΟΥ .....	39
2.4 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΗΛΙΑΚΗΣ ΨΥΞΗΣ .....	59
2.4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	59
2.4.2 ΠΑΘΗΤΙΚΑ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΗΤΙΚΑ ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ .....	59
2.4.3 ΨΥΞΗ ΚΑΙ ΚΥΚΛΟΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ.....	60
2.4.4 ΗΛΙΑΚΟΣ ΣΥΛΛΕΚΤΗΣ ΩΣ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΠΗΓΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΨΥΚΤΙΚΟ ΚΥΚΛΟ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ.....	63
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	
ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΓΙΑ ΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ.....	
ΚΕΝΟΥ VTC.....	65
3.1 ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ.....	65
3.1.1 ΚΑΜΠΥΛΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ .....	66
3.2 ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΟΜΟΚΕΝΤΡΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ ΕΙΣΟΔΟΥ – ΕΞΟΔΟΥ (ΓΥΑΛΙ – ΜΕΤΑΛΛΟ).....	68
3.3 ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ ΤΥΠΟΥ ΣΙΔΝΕΪ (ΓΥΑΛΙ – ΓΥΑΛΙ) .....	71

3.3.1 ΤΥΠΙΚΟΣ ΣΥΛΛΕΚΤΗΣ.....	71
3.3.2 ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΣ ΣΥΛΛΕΚΤΗΣ ΤΥΠΟΥ ΣΙΔΝΕΪ .....	73
3.3.3 ΣΥΛΛΕΚΤΗΣ ΤΥΠΟΥ ΣΙΔΝΕΪ ΜΕ ΑΝΑΚΛΑΣΤΗ.....	75
3.4 ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ .....	78
3.4.1 ΤΥΠΙΚΟΣ ΣΥΛΛΕΚΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ .....	78
3.4.2 ΘΕΡΜΙΚΟΣ ΣΩΛΗΝΑΣ ΛΕΠΤΗΣ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ.....	82
3.4.3 ΟΜΟΑΞΟΝΙΚΟΣ ΘΕΡΜΙΚΟΣ ΣΩΛΗΝΑΣ .....	84
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....</b>	
<b>ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ ΚΕΝΟΥ VTC ΚΑΙ ETC.....</b>	<b>85</b>
4.1 ΘΕΡΜΙΚΑ ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ .....	85
4.1.1 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ .....	85
4.2 ΗΛΙΑΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΓΙΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΚΑΙ ΨΥΞΗ.....	89
4.3 ΗΛΙΑΚΗ ΨΥΞΗ.....	91
4.4 ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ .....	91
4.5 ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ.....	92
4.6 ΗΛΙΑΚΟΙ ΦΟΥΡΝΟΙ .....	93
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....</b>	
<b>ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ ΚΕΝΟΥ.....</b>	
<b>ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....</b>	
<b>ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ .....</b>	<b>94</b>
5.1 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ VTC .....	94
5.1.1 ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ.....	94
5.1.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ .....	96
5.1.3 ΣΥΝΟΛΙΚΕΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ .....	98
5.1.4 ΚΑΘΑΡΗ ΩΦΕΛΙΜΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ .....	100
5.1.5 ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ.....	104
5.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....	105
5.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ .....	115
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.....</b>	
<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>118</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ.....</b>	<b>120</b>



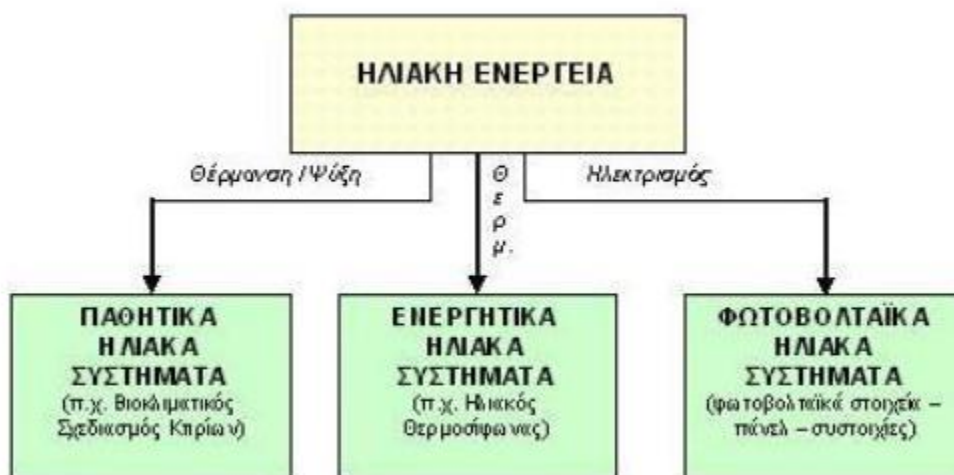
# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:

## ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

### 1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

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

Η ηλιακή ενέργεια στο σύνολό της είναι πρακτικά ανεξάντλητη, αφού προέρχεται από τον ήλιο, και ως εκ τούτου δεν υπάρχουν περιορισμοί χώρου και χρόνου για την εκμετάλλευσή της. Όσον αφορά την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας, θα μπορούσαμε να πούμε ότι χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες εφαρμογών: τα παθητικά ηλιακά συστήματα, τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα, και τα φωτοβολταϊκά συστήματα (Σχήμα 1.1). Τα παθητικά και τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα εκμεταλλεύονται τη θερμότητα που εκπέμπεται μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ τα φωτοβολταϊκά συστήματα στηρίζονται στη μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρικό ρεύμα μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου.

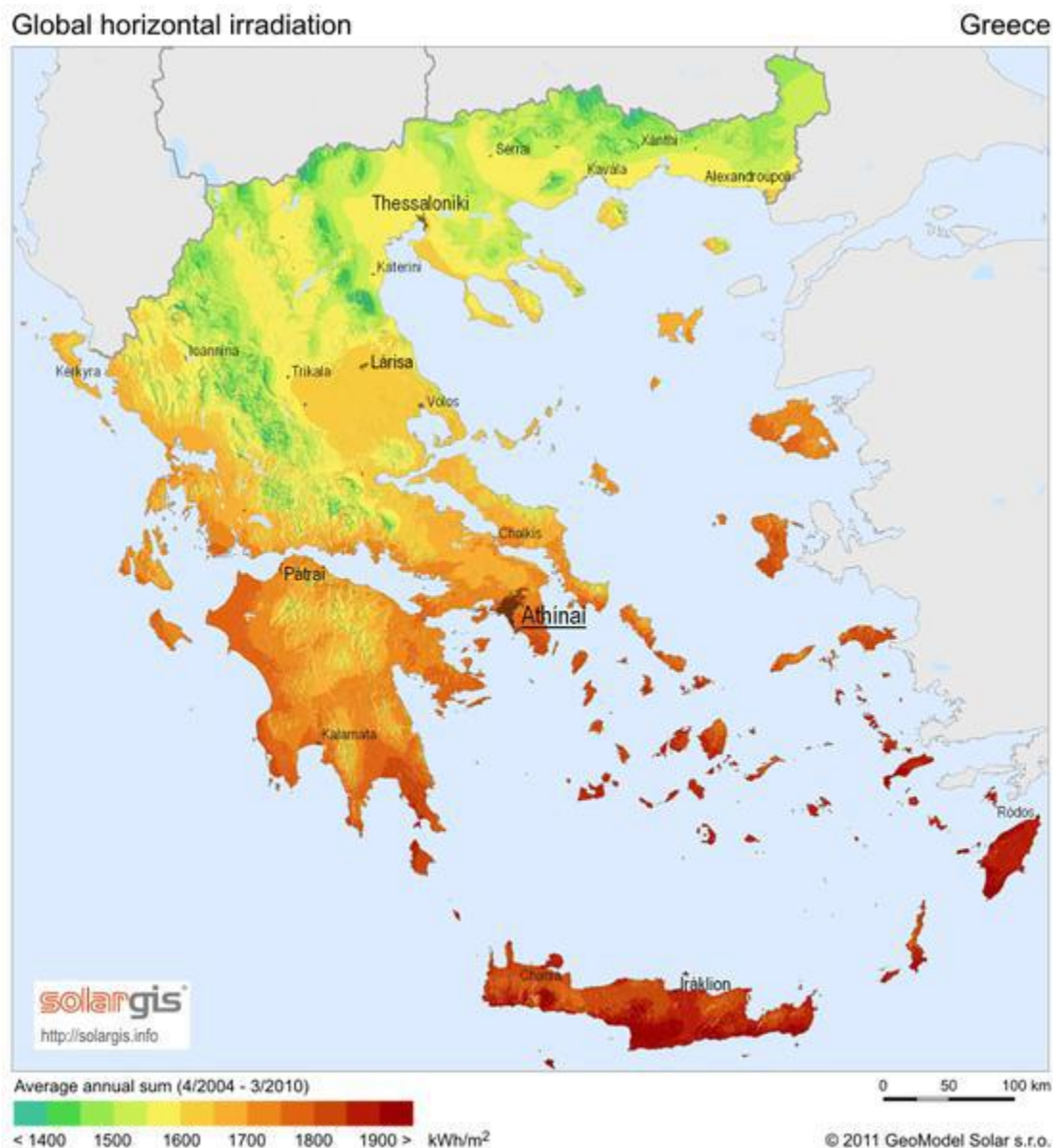


Σχήμα 1.1

## 1.2 ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

Ο ήλιος παρέχει ενέργεια με την μορφή της ακτινοβολίας, χωρίς την οποία η ζωή δεν θα μπορούσε να υπάρξει. Είναι ένας αστέρας με μάζα  $2 \times 10^{30}$  kg, ακτίνα 700.000 km, ηλικία 5.000.000.000 χρόνια και προσδόκιμο χρόνο ζωής άλλα τόσα χρόνια περίπου. Η επιφανειακή θερμοκρασία του εκτιμάται σε 5.800 K, η θερμοκρασία του πυρήνα του σε 14.000.000 K και η μέση απόσταση από τη γη είναι 150.000.000 km. Για να διανύσει αυτή την απόσταση το φως με την ταχύτητα των 300.000 km/s, απαιτούνται περίπου 8,5 min.

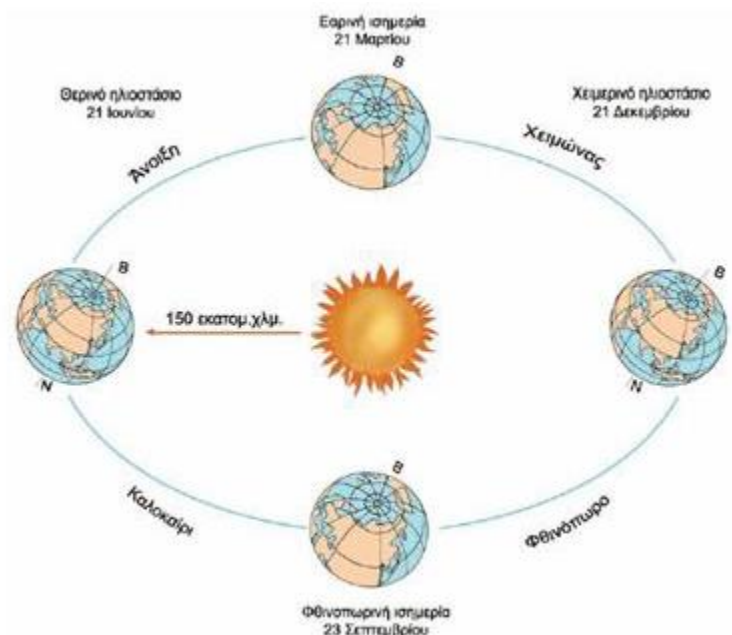
Η υψηλή θερμοκρασία του ήλιου οφείλεται στις αυτοσυντηρούμενες θερμοπυρηνικές αντιδράσεις, που συμβαίνουν στον πυρήνα του. Αυτές μετατρέπουν κάθε δευτερόλεπτο 564 εκατ. τόνους υδρογόνου σε 560 εκατ. τόνους ήλιο. Η μάζα που χάνεται μετασχηματίζεται σε ενέργεια. Υπολογίζεται ότι από τη μετατροπή 1g υδρογόνου παράγεται ενέργεια ίση με  $1,67 \times 10^5$  kWh. Η ηλιακή ενέργεια που εκπέμπεται σε 20 min είναι ίση με την ενέργεια, που καταναλώνει ο πληθυσμός της γης σε ένα ολόκληρο χρόνο. Η ηλιακή ενέργεια διαδίδεται στο σύμπαν κυρίως με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, αλλά και με σωματιδιακή.



Σχήμα 1.2 Ηλιακή ακτινοβολία στην Ελλάδα

Η γη αποτελεί έναν από τους 9 πλανήτες του ηλιακού μας συστήματος, κινείται γύρω από τον ήλιο με περίοδο 365,25 ημερών σε ελαφρώς ελλειπτική τροχιά (Εικόνα 3.3). Κατά την περιφορά της καταλαμβάνει δύο ακραίες θέσεις, την 21η Ιουνίου και την 21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου. Στο βόρειο ημισφαίριο της γης στις 21 Ιουνίου έχουμε τη μεγαλύτερη ημέρα του έτους (θερινό ηλιοστάσιο), ενώ στις 21 Δεκεμβρίου έχουμε τη μικρότερη ημέρα του έτους (χειμερινό ηλιοστάσιο). Στις 21 Μαρτίου και 23 Σεπτεμβρίου η διάρκεια της ημέρας είναι ίση με τη διάρκεια της νύχτας, οπότε έχουμε την εαρινή και τη φθινοπωρινή ισημερία αντίστοιχα.





Σχήμα 1.3 Ελλειπτική τροχιά της γης γύρω από τον ήλιο.

Η γη εκτελεί επίσης μία πλήρη περιστροφή, γύρω από τον άξονα της, με σχεδόν σταθερή γωνιακή ταχύτητα, σε 24 ώρες περίπου. Με την κίνηση της γης γύρω από τον ήλιο εξασφαλίζει τη διαδοχή των εποχών και με την περιστροφή της γύρω από τον άξονά της εξασφαλίζει τη διαδοχή της ημέρας και της νύχτας.

## 1.2.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΗΛΙΟΥ

Ο σημαντικότερος παράγοντας που διαμορφώνει την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας είναι η θέση του ήλιου σε σχέση με το σημείο της γης που δέχεται την ακτινοβολία. Με βάση αυτή την αρχή διακρίνουμε τα παρακάτω γεωμετρικά στοιχεία.

### 1.2.1.1 ΗΛΙΑΚΗ ΣΤΑΘΕΡΑ $G_{sc}$

Ως ηλιακή σταθερά ορίζεται η ροή της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μία μοναδιαία επιφάνεια κάθετη στις ακτίνες του ήλιου στο όριο της ατμόσφαιρας:

$$G_{sc} = 1353 \text{ W/m}^2$$

Εξαιτίας των μεταβολών της πυκνότητας και της κατεύθυνσης, καθώς και της αλληλεπίδρασης με διάφορες ουσίες στα υπερκείμενα στρώματα αέρα, η ισχύς της

ηλιακής ακτινοβολίας μειώνεται στα 1000 W/m<sup>2</sup>, όταν η θέση του ηλίου είναι κατακόρυφη και πάνω από την περιοχή. Λόγω της μεταβολής της απόστασης ήλιου-γης κατά την διάρκεια του έτους χρησιμοποιείται η ακόλουθη σχέση για τον υπολογισμό της διαχρονικής μεταβολής της ηλιακής σταθεράς:

$$G_{on} = G_{sc} \left( 1 + 0.0033 \cos \frac{360 \cdot n}{365} \right)$$

Όπου:

n οι ημέρες του έτους n=1,2,3,...,365

G<sub>on</sub> η ακτινοβολία που δέχεται επίπεδο εκτός ατμόσφαιρας και κάθετο στις ακτίνες του ήλιου.

### 1.2.1.2 ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΟ ΠΛΑΤΟΣ ΤΟΠΟΥ φ

Το γεωγραφικό πλάτος του τόπου εκφράζει τη γωνία που σχηματίζει ο τόπος με τον ισημερινό και είναι:  $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$

Στον Πίνακα 1.1, δίνονται τα γεωγραφικά πλάτη διαφόρων ελληνικών περιοχών.

Πόλη ή περιοχή	Γεωγραφικό πλάτος
Σιδηρόκαστρο, Διδυμότειχο, Ορεστιάδα, Φλώρινα, Έδεσσα, Γιαννιτσά, Κιλκίς, Σέρρες, Δράμα, Καβάλα	41° 30'
Ξάνθη, Κομοτηνή, Αλεξανδρούπολη	41°
Καστοριά, Πτολεμαίδα, Κοζάνη, Νάουσα, Βέροια, Κατερίνη, Θεσσαλονίκη, Πολύγυρος, Σαμοθράκη	40° 30'
Κόνιτσα, Γρεβενά, Λιτοχωρό, Κασσάνδρα, Λήμνος	40°
Κέρκυρα, Ηγουμενίτσα, Ιωάννινα, Μέτσοβο, Τρίκαλα, Καρδίτσα, Λάρισα, Βόλος -	39°30'
Λευκάδα, Πρέβεζα, Άρτα, Καρπενήσι, Λαμία, Σκύρος, Μυτιλήνη	39°
Κεφαλληνία, Ιθάκη, Αγρίνιο, Μεσολόγγι, Πάτρα, Αμφιλοχία, Λιβαδειά, Θήβα, Χαλκίδα, Χίος	38° 30'
Ζάκυνθος, Αμαλιάδα, Καλάβρυτα, Κόρινθος, Μέγαρα, Ελευσίνα, Αθήνα, Ραφήνα, Κάρυστος, Άνδρος, Ικαρία, Σάμος	38°
Πύργος, Μεγαλόπολη, Τρίπολη, Αργος, Ναύπλιο, Πόρος, Σύρος, Πάτμος	37° 30'
Πύλος, Καλαμάτα, Σπάρτη, Πάρος, Νάξος, Κάλυμνος, Κως	37°

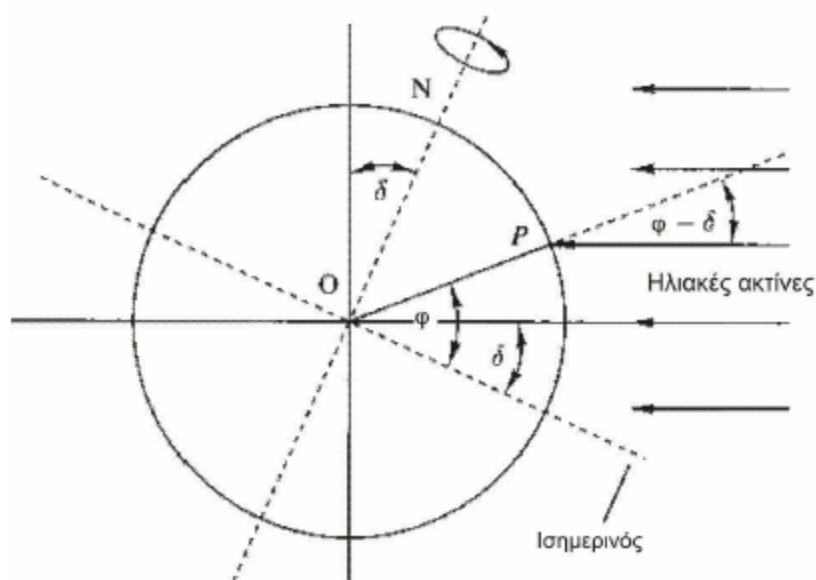
Γύθειο, Μήλος, Σαντορίνη, Ρόδος	36° 30'
Κύθηρα, Καστελόριζο	36°
Χανιά, Ρέθυμνο, Ηράκλειο, Κάσσοι, Κάρπαθος	35° 30'
Χώρα Σφακίων, Ιεράπετρα, Αγ.Νικόλαος Κρήτης, Κύπρος	35°

Πίνακας 1.1 Γεωγραφικό πλάτος (κατά προσέγγιση) διαφόρων Ελληνικών πόλεων και περιοχών.

### 1.2.1.3 ΑΠΟΚΛΙΣΗ $\delta$ ΤΟΥ ΗΛΙΟΥ

Κατά τη διάρκεια της έτους, η θέση του ήλιου παίρνει πολύ διαφορετικές τιμές σαν αποτέλεσμα της μεταβολής της απόκλισης  $\delta$ , δηλαδή της γωνίας που σχηματίζεται ανάμεσα στη ευθεία που ενώνει το κέντρο της γης με το κέντρο του ήλιου, και στο επίπεδο του ισημερινού (Εικόνα 1.2.1.3). Οι τιμές της απόκλισης του ήλιου είναι θετικές για το βόρειο ημισφαίριο και αρνητικές για το νότιο. Οι ακραίες τιμές είναι  $+23,45^\circ$  της 21 Ιουνίου (θερινό ηλιοστάσιο για το βόρειο ημισφαίριο) και  $-23,45^\circ$  της 21 Δεκεμβρίου (χειμερινό ηλιοστάσιο). Άμεση συνέπεια των διαφορετικών τιμών της απόκλισης του ήλιου κατά τη διάρκεια του έτους είναι οι κυκλικές τροχιές που διαγράφονται βορειότερα στο ουρανό το καλοκαίρι, με νωρίτερη ανατολή και αργότερη δύση στο βόρειο ημισφαίριο, ενώ το χειμώνα συμβαίνει το αντίθετο.

Παράλληλα διαμορφώνονται οι αντίστοιχες μετεωρολογικές και κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν σε διάφορες εποχές του έτους. Ιδιαίτερα χρήσιμα μεγέθη για τη γενική εκτίμηση της καθημερινής και της εποχιακής διακύμανσης της ακτινοβολίας σε ένα τόπο, είναι η θεωρητική ηλιοφάνεια, δηλαδή το χρονικό διάστημα από την ανατολή μέχρι τη δύση του ήλιου, καθώς και η μέση πραγματική ηλιοφάνεια που δείχνει το μέσο όρο των ωρών που ο ήλιος δεν καλύπτεται από σύννεφα. Της, ο αριθμός των ημερών με ηλιοφάνεια, στη διάρκεια των οποίων ο ήλιος δεν καλύπτεται από σύννεφα, καθώς και των ανήλιων ημερών, που ο ήλιος καλύπτεται από σύννεφα σε ολόκληρο το διάστημα της ημέρας.



Σχήμα 1.4 Η απόκλιση του ήλιου

Η απόκλιση του ήλιου δίνεται από την εξίσωση:

$$\delta = 23,45^\circ \cdot \sin\left(360 \cdot \frac{n+284}{365}\right)$$

όπου  $n$  οι ημέρες του έτους  $n=1,2,3,\dots,365$

Θεωρούμε το επίπεδο με κλίση  $\beta$  ως το οριζόντιο επίπεδο, που δέχεται ηλιακή ακτινοβολία στην Εικόνα 1.4.

#### 1.2.1.4 ΚΛΙΣΗ $\beta$

Ορίζεται η γωνία μεταξύ του επιπέδου αναφοράς και του οριζοντίου επιπέδου. Η γωνία αυτή μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ  $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$ .

#### 1.2.1.5 ΓΩΝΙΑ $\gamma$ ΑΙΜΟΥΘΙΟΥ ΤΟΥ ΕΠΙΠΕΔΟΥ

Ορίζεται η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της προβολής στο οριζόντιο επίπεδο της καθέτου επί της κεκλιμένης επιφάνειας και της γραμμής B-N (Βορρά-Νότου). Η αζιμούθια γωνία επιφανείας είναι μηδέν όταν η προβολή της καθέτου στο οριζόντιο επίπεδο συμπίπτει με το Νότο, αρνητική εφόσον είναι της την Ανατολή και θετική εφόσον είναι της τη Δύση.

#### 1.2.1.6 ΑΖΙΜΟΥΘΙΑ ΓΩΝΙΑ ΗΛΙΟΥ $\gamma_s$

Ορίζεται η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της προβολής στο οριζόντιο επίπεδο της ευθείας που συνδέει τον ήλιο με την κεκλιμένη επιφάνεια και της γραμμής B-N (Βορρά-Νότου).

#### 1.2.1.7 ΓΩΝΙΑ ΥΨΟΥΣ ΗΛΙΟΥ $\alpha$

Ορίζεται η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της ευθείας που συνδέει τον ήλιο με την κεκλιμένη επιφάνεια και το οριζόντιο επίπεδο. Οι γωνίες  $\Psi$  και  $\alpha$  ονομάζονται σφαιρικές συντεταγμένες και καθορίζουν σε κάθε χρονική στιγμή τη θέση του ήλιου.

### 1.2.1.8 ZENITHΙΑ ΓΩΝΙΑ $\Theta_z$

Ορίζεται η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ των ευθειών, που συνδέουν την κεκλιμένη επιφάνεια με τον ήλιο και το ζενίθ. Η γωνία αυτή είναι συμπληρωματική της γωνίας ύψους του ηλίου ( $\Theta_z = 90 - \alpha$ ) και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\cos\theta_z = \cos\delta \cdot \sin\phi \cdot \cos\omega + \sin\delta \cdot \sin\phi$$

όπου,

$\delta$  [°] : η ηλιακή απόκλιση,

$\phi$  [°] : το γεωγραφικό πλάτος,

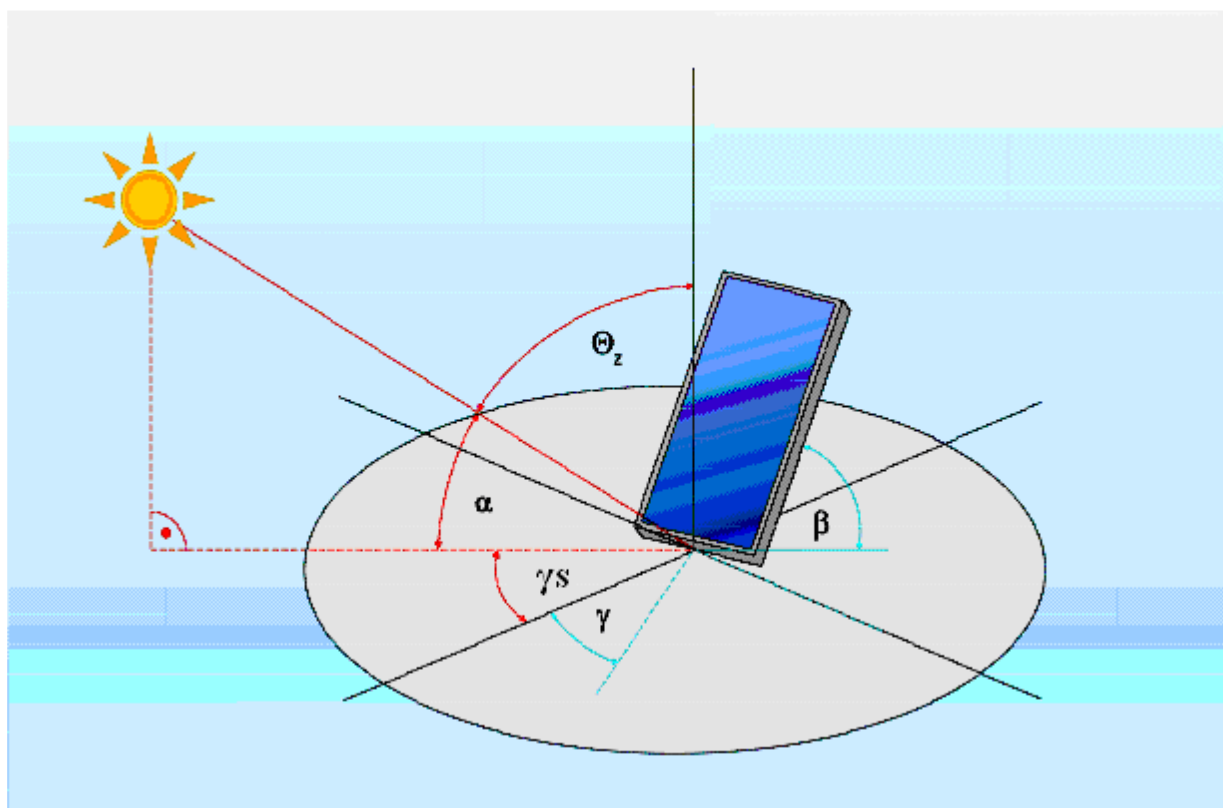
$\omega$  [°] : ωριαία γωνία απόκλισης ήλιου, που υπολογίζεται από τη σχέση

$$\omega = 15 (HX - 12) [^\circ]$$

όπου,

HX [h] : ο ηλιακός χρόνος τόπου, όπου μετράται με βάση τη φαινόμενη κίνηση του ήλιου στον ουρανό.

Λαμβάνεται  $\omega > 0$  για μ.μ και  $\omega < 0$  για π.μ.



Σχήμα 1.5 Γεωμετρικές παράμετροι θέσης ήλιου – κεκλιμένης επιφανείας

### 1.3 ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Η ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας μεταδίδεται με τη μορφή διακεκριμένων ποσοτήτων ενέργειας, που ονομάζονται φωτόνια ή κβάντα φωτός. Τα φωτόνια κινούνται στο κενό με την ταχύτητα του φωτός και κάθε ένα από αυτά μεταφέρει ενέργεια  $E$ , που υπολογίζεται από τη σχέση:

$$E = h \cdot \nu = h \cdot c / \lambda \text{ [J]}$$

Όπου

$h$  [J·s] : σταθερά του Planck ( $h = 6,67 \cdot 10^{-34}$  J·s)

$\nu$  [ $s^{-1}$ ] : συχνότητα ακτινοβολίας

$c$  [m/s]: ταχύτητα φωτός ( $c = 3 \cdot 10^8$  m/s)

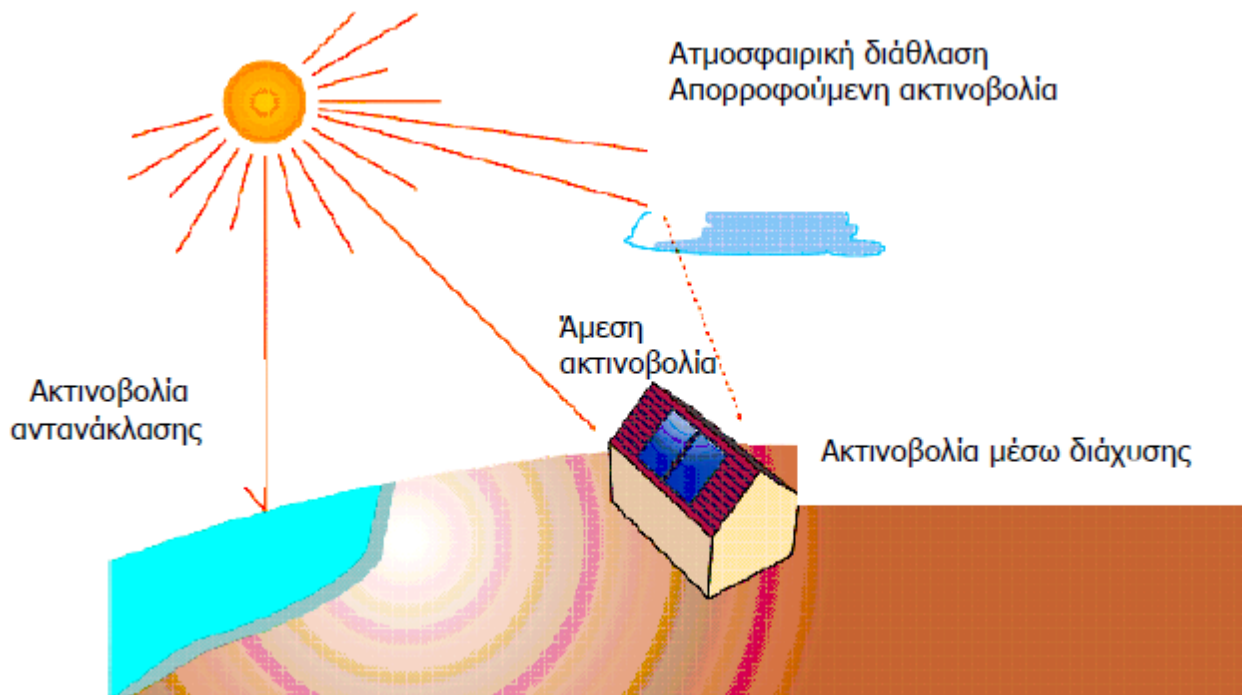
$\lambda$  [m] : μήκος κύματος

Λαμβάνοντας υπόψη ότι η συνήθης έκφραση του μήκους κύματος  $\lambda$  είναι σε (nm) και η ενέργεια του φωτονίου  $E$  σε [eV], η προηγούμενη σχέση γράφεται:

$$E = 1240 / \lambda \text{ [eV]}$$

Όπου  $\lambda$  [nm]: μήκος κύματος

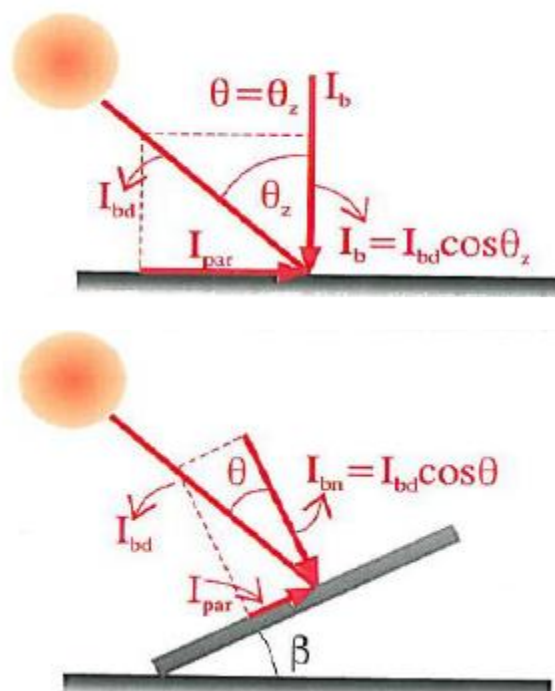
Λόγω του φαινομένου κατά το οποίο οι ηλιακές ακτίνες εισέρχονται από τη γήινη ατμόσφαιρα, τα φωτόνια σκεδάζονται της υδρατμούς, τη σκόνη, τον καπνό και τα διάφορα σωματίδια. Όλα αυτά έχουν σαν αποτέλεσμα την αποσύνθεση της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σ' ένα σώμα στην επιφάνεια της γης, σε τρία διαφορετικά συστατικά (ΣΧΗΜΑ 1.6).



Σχήμα 1.6 Η ηλιακή ακτινοβολία στα τρία διαφορετικά συστατικά

- Στην άμεση ηλιακή ακτινοβολία,  $I_b$  που είναι αυτή που φτάνει κατευθείαν από τον ήλιο χωρίς να υποστεί αντανάκλαση ή διασκορπισμό. Μετράται σε  $\text{Joule/m}^2$ . Για της διάφορους υπολογισμούς την αναλύουμε σε δύο συνιστώσες (ΣΧΗΜΑ 1.7), μία κάθετη και μία παράλληλη στην επιφάνεια της γης ή του συλλέκτη ανάλογα με την περίπτωση. Η οριζόντια συνιστώσα δεν αλληλεπιδρά με την επιφάνεια της γης ή του συλλέκτη αντίστοιχα και δε συνεισφέρει στη μετατροπή της ακτινοβολίας σε θερμική ενέργεια.





Σχήμα 1.7 Ανάλυση ακτινοβολίας σε δύο συνιστώσες

Η γωνία πρόσπτωσης  $\theta$  στην περίπτωση αυτή ταυτίζεται με την έννοια της ζενίθιας γωνίας,  
δηλ.  $\theta = \theta_z$

όπου  $\theta$  η γωνία πρόσπτωσης

- στη διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία,  $I_d$  που προέρχεται από τον ολόκληρο τον ουράνιο θόλο και δημιουργείται από τη σκέδαση της άμεσης ακτινοβολίας από σωματίδια της ατμόσφαιρας ή σύννεφα. Μετράται σε  $\text{Joule/m}^2$ .
- στην ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία,  $I_r$  που προέρχεται από ανάκλαση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας από διάφορα γειτονικά αντικείμενα ή από το έδαφος. Η τοπογραφία του χώρου και ο συντελεστής διάχυτης ανάκλασης  $Al$  των επιφανειών δίνει σημαντικές πληροφορίες στη γνώση της. Ο συντελεστής αυτός ονομάζεται albedo (αλμπέντο) και οι διάφορες τιμές του δίνεται στον Πίνακα 1.2. Μας ενδιαφέρει το ποσοστό της που φθάνει τελικά στην επιφάνεια που μελετούμε π.χ. στο σύστημα ηλιακών συλλεκτών ή της τοίχους μιας κατοικίας.

Είδος επιφάνειας	Συντελεστής Ανάκλασης
Επιφάνεια νερού, Θάλασσα	0.05
Ασφαλτόστρωμα	0.07
Αγρός με σκοτεινόχρωμα χώμα	0.08
Πράσινος αγρός	0.15
Βραχώδη επιφάνεια	0.20
Επιφάνεια παλαιού τσιμέντου	0.24
Επιφάνεια νέου τσιμέντου	0.30
Χιόνι	0.60

Πίνακας 1.2 Τιμές albedo για διάφορες κατηγορίες επιφανειών

- στην ολική ακτινοβολία,  $I$  που προσπίπτει σε μια επιφάνεια και ορίζεται το άθροισμα των τριών παραπάνω συνιστωσών. Μετράται σε  $\text{Joule/m}^2$ . Η ολική ωριαία ακτινοβολία σε ένα οριζόντιο επίπεδο δίνεται από τη σχέση:

$$I = I_b + I_d \text{ [W/m}^2\text{]}$$

Όπου:

$I_b$  [W/m<sup>2</sup>]: άμεση ωριαία ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο

$I_d$  [W/m<sup>2</sup>]: διάχυτη ωριαία ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο

Ενδεικτικά έχει πινακοποιηθεί σαν μέση ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο, ανά μήνα για ένα ευρύ φάσμα περιοχών της χώρας, και φαίνεται στον Πίνακα 1.3.

Περιοχή/μήνας	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΙΑ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
Αθήνα (Ελληνικό)	63,0	79,0	117,7	154,3	195,4	214,0	222,4	202,7	152,6	109,0	70,7	55,7
Αθήνα (Φιλαδέλφεια)	63,3	77,7	118,9	152,7	190,4	207,4	214,5	198,6	156,0	111,1	68,1	54,4
Αγρίνιο	63,5	78,3	119,4	148,4	189,9	214,1	224,2	200,3	151,3	109,8	69,8	55,1
Αρχιάλοσ	61,3	74,3	112,5	149,2	189,7	212,7	217,4	195,1	146,8	98,8	63,1	51,5
Αλεξανδρούπολη	50,7	68,9	107,3	141,8	182,8	205,8	211,6	192,3	144,2	99,4	57,8	43,7
Αλιάρτος	51,0	70,0	114,0	158,0	206,0	216,0	220,0	204,0	153,0	102,0	66,0	49,0
Ανδραβίδα	68,4	83,4	128,4	159,5	200,2	220,6	228,4	205,5	156,1	115,6	75,2	60,1
Άραξος	62,6	78,6	119,7	155,6	196,1	210,9	217,8	197,6	152,4	110,2	69,4	54,6
Άργος (Πυργέλα)	68,7	83,6	127,7	159,5	202,5	220,6	229,0	206,4	157,2	115,5	74,8	59,2
Αργοστόλι	65,0	80,0	124,9	157,3	204,3	219,4	226,1	203,1	155,6	112,6	72,6	56,1
Ζάκυνθος	64,2	77,6	110,1	158,8	190,8	200,1	218,5	203,8	154,0	104,3	65,4	52,8
Άρτα	65,5	79,7	120,4	149,1	190,2	211,2	218,1	196,4	150,6	110,0	69,5	56,2
Ηράκλειο	65,6	81,6	125,0	166,5	207,3	222,4	227,1	207,0	163,0	117,3	78,6	61,2
Θεσσαλονίκη	52,6	67,5	103,2	140,7	179,1	198,6	209,5	184,7	136,7	91,4	56,6	45,5
Ιεράπετρα	73,0	89,0	137,0	174,0	210,0	220,0	224,0	205,0	165,0	125,0	89,0	69,0
Ιωάννινα	51,8	66,4	105,2	134,9	178,3	202,1	212,0	190,3	136,5	96,1	57,6	45,1
Καλαμάτα	68,2	82,3	126,1	156,2	198,7	216,0	222,0	200,9	154,9	114,5	75,2	59,3
Καστοριά	57,6	71,3	111,2	141,1	173,6	201,8	206,3	185,5	138,5	97,0	60,0	47,7
Κέρκυρα	57,7	73,5	116,7	149,9	195,4	213,6	221,0	197,8	148,2	103,1	64,4	50,7
Κομοτηνή	50,0	65,0	105,0	145,0	188,0	209,0	215,0	193,0	145,0	99,0	58,0	45,0
Κόνιτσα	53,0	65,0	112,0	138,0	190,0	200,0	216,0	194,0	141,0	99,0	63,0	50,0
Κόρινθος (Βέλο)	65,4	82,8	123,4	157,9	201,7	218,3	223,2	201,9	154,2	111,9	72,0	55,2
Κύθηρα	68,0	81,0	127,0	161,0	210,0	220,0	223,0	204,0	160,0	117,0	78,0	60,0
Λαμία	59,4	73,1	113,9	150,5	188,8	210,3	214,1	193,4	145,5	100,3	65,3	52,1
Λάρισα	55,1	71,4	112,1	151,1	190,9	210,8	215,8	194,3	145,9	97,8	61,2	47,8
Λήμνος	51,1	69,6	112,3	154,3	199,5	215,3	220,9	198,5	150,8	104,6	61,3	46,0
Μεθώνη	62,0	78,0	125,0	155,0	207,0	215,0	220,0	199,0	157,0	116,0	77,0	57,0
Μήλος	56,0	67,0	120,0	175,0	213,0	223,0	226,0	205,0	164,0	112,0	77,0	52,0
Μυτιλήνη	52,0	70,0	113,0	156,0	209,0	219,0	223,0	201,0	156,0	109,0	67,0	50,0
Νάξος	60,3	77,0	122,6	161,2	204,7	220,4	224,5	204,8	159,1	115,9	73,7	55,6
Πάρος	60,0	80,0	125,0	168,0	211,0	220,0	223,0	202,0	160,0	117,0	75,0	58,0
Πάτρα	55,0	72,0	124,0	147,0	200,0	215,0	218,0	197,0	153,0	107,0	66,0	53,0
Πύργος	68,4	83,1	127,5	157,9	200,4	215,6	223,8	202,1	155,0	115,9	75,5	59,3
Ρέθυμνο	62,0	81,0	119,0	164,0	211,0	218,0	223,0	204,0	160,0	106,0	81,0	58,0
Ρόδος	69,9	85,1	130,8	164,0	203,0	217,2	225,1	204,3	158,9	120,2	79,2	61,2
Σάμος	64,9	82,1	126,7	162,5	206,8	224,9	230,6	209,6	163,7	120,5	78,6	58,5
Σέρρες	50,8	68,0	105,7	141,0	180,5	202,8	209,7	187,7	140,8	94,7	56,5	43,7
Σητεία	66,5	83,0	128,4	165,2	207,4	223,2	227,1	207,5	163,7	119,3	80,4	61,9
Σκύρος	51,2	69,1	109,9	153,3	197,2	214,2	219,7	198,8	151,7	102,5	62,9	47,7
Σούδα	65,0	81,7	130,7	166,5	208,5	221,9	228,5	209,3	163,6	116,3	76,8	60,3
Σύρος	58,0	80,0	121,0	172,0	212,0	219,0	225,0	204,0	160,0	199,0	74,0	57,0
Τανάγρα	59,1	74,2	112,7	151,9	194,0	215,4	222,0	201,3	153,1	104,5	64,7	51,2
Τρίκαλα (Ημαθίας)	57,3	72,2	105,6	140,2	178,0	202,9	206,4	185,8	138,6	94,0	59,7	49,1
Τυμπάκιο	73,4	90,5	137,5	169,0	207,8	222,9	228,7	209,8	166,3	127,2	85,9	67,7
Χανιά	62,0	80,0	124,0	167,0	212,0	220,0	225,0	205,0	161,0	111,0	78,0	59,0
Χίος	55,0	72,0	119,0	161,0	210,0	220,0	225,0	203,0	159,0	116,0	71,0	53,0
Χρυσούπολη	57,5	78,0	111,3	137,6	189,9	204,0	208,8	187,6	141,8	97,7	62,1	43,3

Πίνακας 1.3 Μέση μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο  
[kWh/(m<sup>2</sup>.mo)]

### 1.3.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΙΛΙΚΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΕ ΚΕΚΛΙΜΕΝΟ ΕΠΙΠΕΔΟ

Ο υπολογισμός της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας Η<sub>Τ</sub> σε κεκλιμένο επίπεδο είναι απαραίτητος για να εκτιμηθούν τα παθητικά ηλιακά κέρδη στα κτίρια αλλά και για τη διαστασιολόγηση των ηλιακών συλλεκτών. Η μεθοδολογία ακολουθεί τα παρακάτω βήματα:

Βήμα 1ο: Υπολογισμός γεωμετρικού παράγοντα R<sub>b</sub> ολικής ηλιακής ακτινοβολίας

$$R_b = \frac{[\cos(\varphi - \beta) \cdot \cos\delta \cdot \sin\omega_s + \left(\frac{\pi}{180}\right) \cdot \omega_s \cdot \sin(\varphi - \beta) \cdot \sin\delta]}{[\cos\varphi \cdot \cos\delta \cdot \sin\omega_s + \left(\frac{\pi}{180}\right) \cdot \omega_s \cdot \sin\varphi \cdot \sin\delta]} \quad [-]$$

Όπου,

φ [°]: γεωγραφικό πλάτος τόπου (Πίνακας 1.1)

β [°]: κλίση επιπέδου

δ [°]: ηλιακή απόκλιση

ω<sub>s</sub>[°]: ωριαία γωνία δύσης ηλίου, υπολογιζόμενη από τη σχέση

$$\omega_s = \min\{\text{Toξ}\cos(-\tan\varphi \cdot \tan\delta), \text{Toξ}\cos[-\tan(\varphi - \beta) \cdot \tan\delta]\} \quad [^\circ]$$

για β ≠ 0 και γ = 0

Βήμα 2ο: Υπολογισμός λόγου διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας Η<sub>d</sub> σε οριζόντιο επίπεδο, προς την ολική ηλιακή ακτινοβολία Η στο ίδιο επίπεδο.

Λόγος Η<sub>d</sub>/Η

$$\frac{H_d}{H} = 1,39 - 4,03K_T + 5,53K_T^2 + 3,11K_T^3 \quad [-]$$

Όπου:

K<sub>T</sub> [-]: μηνιαίος δείκτης αιθριότητας Πίνακας 1.4

ΠΟΛΗ	ΙΑΝ.	ΦΕΒ.	ΜΑΡ.	ΑΠΡ.	ΜΑΪΟΣ	ΙΟΥΝ.	ΙΟΥΛ.	ΑΥΓ.	ΣΕΠΤ.	ΟΚΤ.	ΝΟΕΜ.	ΔΕΚ.
Αθήνα	0,41	0,44	0,46	0,51	0,56	0,59	0,63	0,64	0,59	0,52	0,48	0,42
Αλιάρτος	0,35	0,39	0,42	0,48	0,54	0,57	0,59	0,67	0,55	0,46	0,42	0,37
Άραξος	0,42	0,43	0,46	0,49	0,53	0,55	0,60	0,62	0,58	0,51	0,47	0,41
Αργοστόλι	0,44	0,43	0,46	0,47	0,56	0,60	0,63	0,63	0,58	0,51	0,47	0,41
Άρτα	0,45	0,42	0,46	0,45	0,53	0,56	0,60	0,61	0,56	0,51	0,46	0,43
Ηράκλειο	0,38	0,42	0,44	0,51	0,58	0,62	0,65	0,65	0,60	0,50	0,47	0,41
Θεσσαλονίκη	0,39	0,41	0,42	0,47	0,51	0,54	0,59	0,57	0,53	0,46	0,41	0,38
Ιεράπετρα	0,46	0,48	0,50	0,52	0,57	0,63	0,66	0,66	0,62	0,56	0,54	0,48
Ιωάννινα	0,36	0,37	0,41	0,43	0,49	0,51	0,57	0,57	0,51	0,47	0,40	0,36
Καλαμάτα	0,45	0,45	0,47	0,46	0,57	0,61	0,63	0,63	0,58	0,52	0,50	0,41
Κέρκυρα	0,41	0,41	0,44	0,48	0,53	0,58	0,63	0,62	0,56	0,50	0,44	0,40
Κομοτινή	0,40	0,40	0,40	0,45	0,49	0,53	0,56	0,57	0,53	0,48	0,42	0,40
Κόνιτσα	0,40	0,38	0,43	0,41	0,48	0,51	0,56	0,57	0,51	0,46	0,44	0,42
Κόρινθος	0,39	0,42	0,45	0,48	0,55	0,58	0,60	0,62	0,57	0,50	0,47	0,42
Κύθηρα	0,45	0,44	0,46	0,49	0,56	0,62	0,63	0,63	0,59	0,52	0,48	0,43
Λαμία	0,38	0,38	0,44	0,48	0,53	0,58	0,59	0,60	0,54	0,47	0,45	0,42
Λάρισα	0,36	0,39	0,43	0,48	0,53	0,55	0,58	0,60	0,54	0,47	0,45	0,37
Λήμνος	0,34	0,39	0,43	0,49	0,54	0,58	0,59	0,62	0,57	0,50	0,42	0,37
Μεθώνη	0,41	0,42	0,46	0,46	0,55	0,59	0,61	0,61	0,57	0,52	0,48	0,41
Μήλος	0,36	0,35	0,44	0,55	0,59	0,66	0,70	0,70	0,65	0,49	0,48	0,37
Μυτιλήνη	0,38	0,40	0,43	0,48	0,56	0,60	0,64	0,64	0,60	0,51	0,46	0,40
Νάξος	0,37	0,40	0,44	0,49	0,54	0,58	0,60	0,61	0,58	0,51	0,47	0,41
Πάρος	0,39	0,43	0,46	0,51	0,58	0,63	0,64	0,64	0,60	0,52	0,46	0,41
Πάτρα	0,38	0,40	0,47	0,45	0,52	0,58	0,59	0,59	0,56	0,49	0,43	0,41
Πύργος	0,45	0,44	0,48	0,47	0,56	0,60	0,62	0,63	0,59	0,53	0,50	0,46
Ρέθυμνο	0,39	0,43	0,42	0,49	0,57	0,60	0,64	0,64	0,57	0,45	0,48	0,39
Ρόδος	0,43	0,44	0,49	0,53	0,58	0,62	0,65	0,66	0,64	0,56	0,52	0,45
Σάμος	0,42	0,44	0,46	0,50	0,55	0,61	0,64	0,64	0,62	0,55	0,49	0,42
Σέρρες	0,38	0,39	0,42	0,46	0,50	0,54	0,57	0,58	0,53	0,46	0,43	0,40
Σητεία	0,39	0,43	0,46	0,51	0,57	0,62	0,65	0,64	0,60	0,50	0,48	0,40
Σκύρος	0,33	0,38	0,40	0,48	0,55	0,60	0,62	0,62	0,57	0,47	0,42	0,36
Σούδα	0,39	0,43	0,45	0,51	0,57	0,60	0,64	0,66	0,60	0,48	0,47	0,41
Σύρος	0,39	0,45	0,45	0,53	0,58	0,60	0,65	0,65	0,61	0,55	0,47	0,42
Τυμπάκι	0,44	0,46	0,51	0,51	0,57	0,62	0,64	0,67	0,62	0,55	0,52	0,46
Χανιά	0,39	0,42	0,45	0,50	0,58	0,63	0,66	0,66	0,59	0,48	0,47	0,40
Χίος	0,39	0,41	0,45	0,50	0,58	0,62	0,65	0,65	0,61	0,54	0,47	0,41

Πίνακας 1.4 Μηνιαίος δείκτης αιθριότητας Κ<sub>T</sub> σε διάφορες πόλεις της Ελλάδας

### Βήμα 3ο: Υπολογισμός συντελεστή μετατροπής

Ο συντελεστής μετατροπής εκφράζει τη συμμετοχή των τριών συνιστωσών της ηλιακής ακτινοβολίας (άμεσης – διάχυτης – ανακλώμενης) που προσπίπτει στο κεκλιμένο επίπεδο και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$R = \left(1 - \frac{H_d}{H}\right) \cdot R_b + 0,5 \left(\frac{H_d}{H}\right) \cdot (1 + \cos\beta) + 0,5AL \cdot (1 - \cos\beta) [-]$$

Όπου:

$H_d/H$  [-]: λόγος διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο προς την ολική ηλιακή ακτινοβολία στο ίδιο επίπεδο

$R_b$  [-]: γεωμετρικός παράγοντας ολικής ηλιακής ακτινοβολίας

$\beta$  [-]: κλίση επιπέδου.

AL: συντελεστής ανακλαστικότητας εδάφους ή albedo και οι τιμές αναγράφονται στον Πίνακα 1.2

### Βήμα 4ο: Υπολογισμός ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο

Ολική ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο

$$H_T = R \cdot H \text{ [kWh/m}^2\text{]}$$

Όπου:

$R$  [-]: συντελεστής μετατροπής

$H$  [kWh/m<sup>2</sup>-μήνα]: μηνιαία ολική ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο που οι τιμές της αναγράφονται στον Πίνακα 1.5

ΠΟΛΗ	ΙΑΝ.	ΦΕΒ.	ΜΑΡ.	ΑΠΡ.	ΜΑΪΟΣ	ΙΟΥΝ.	ΙΟΥΛ.	ΑΥΓ.	ΣΕΠ.	ΟΚΤ.	ΝΟΕΜ.	ΔΕΚ.	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ ΗΛΙΑ- ΚΗΣ ΑΚΤΙΝ. [kWh/m <sup>2</sup> -μήνα]	ΕΤΗΣΙΑ ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝ. [kWh/m <sup>2</sup> -έτος]
Αθήνα	58	74	110	147	190	204	219	202	149	104	70	54	132	1561
Αλιαντος	48	64	102	139	182	197	205	210	136	91	61	47	124	1483
Αραξος	59	71	111	143	181	189	207	195	147	103	68	52	127	1527
Αργοστόλι	61	72	111	137	190	207	217	198	146	102	67	52	130	1559
Άρτα	60	68	109	130	178	193	208	192	141	100	65	52	125	1497
Ηράκλειο	59	75	110	151	196	214	226	205	157	105	75	58	136	1631
Θεσσαλονίκη	49	64	96	135	174	186	205	178	131	87	55	44	117	1403
Ιεράπετρα	72	85	127	155	195	216	227	211	164	120	87	69	144	1728
Ιωάννινα	48	59	95	124	165	177	196	177	127	91	56	42	113	1357
Καλαμάτα	66	76	116	135	192	209	217	198	149	106	75	55	133	1586
Κέρκυρα	54	65	103	137	178	201	217	193	140	97	60	48	124	1493
Κομοτηνή	50	61	92	128	165	183	194	177	130	91	55	45	114	1368
Κόνιτσα	52	61	100	118	163	174	193	176	126	89	59	49	113	1361
Κόρινθος	54	69	110	139	185	199	208	194	145	101	69	54	127	1526
Κύθηρα	67	77	114	143	190	212	216	200	153	109	74	59	135	1615
Λαμία	51	62	105	137	180	198	204	187	135	92	63	52	122	1466
Λάρισα	47	62	100	138	179	189	202	186	135	91	61	44	119	1433
Λήμνος	45	62	101	140	184	200	206	192	142	96	58	44	123	1489
Μεθώνη	58	73	113	136	186	202	213	194	147	107	73	55	130	1556
Μήλος	53	60	107	159	200	227	241	220	168	102	72	49	138	1660
Μυτιλήνη	51	65	102	138	189	207	222	200	150	101	64	49	126	1539
Νάξος	54	69	107	142	183	199	207	192	150	105	70	54	128	1531
Πάρος	58	75	114	151	198	216	223	202	155	108	72	58	136	1629
Πάτρα	53	67	113	129	177	199	203	185	141	99	62	51	123	1479
Πύργος	64	73	117	136	191	206	216	198	149	106	74	59	133	1592
Ρέθυμνο	59	76	106	145	194	206	222	203	149	95	76	56	132	1587
Ρόδος	64	77	122	155	196	214	227	211	166	117	79	61	141	1686
Σάμος	60	74	111	144	188	210	221	202	158	111	72	54	134	1606
Σέρρες	47	60	97	130	170	185	198	178	129	87	56	45	115	1380
Σητεία	60	75	115	149	195	212	224	202	156	107	77	58	136	1630
Σκύρος	45	61	95	139	187	205	215	194	142	93	59	45	123	1460
Σούδα Κρήτης	59	75	112	149	196	206	221	208	156	102	74	57	135	1616
Σόρος	56	75	109	154	198	208	226	204	155	112	70	55	135	1621
Ταμπάκι	69	83	128	152	193	213	223	213	162	118	83	66	142	1703
Χανιά	59	75	112	149	198	215	229	210	154	101	74	56	136	1630
Χίος	53	67	108	144	195	214	225	205	155	107	67	52	133	1594

Πίνακας 1.1.3 Μηνιαία ολική ακτινοβολία διάφορων πόλεων της Ελλάδας σε οριζόντιο επίπεδο

### 1.3.2 ΑΠΛΟΥΣΤΕΥΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ

Για τον υπολογισμό της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας  $H_T$ , σε κεκλιμένο επίπεδο, απαιτείται μία μεθοδολογία σχετικά χρονοβόρα και επίπονη. Για το λόγο αυτό η διαδικασία που ακολουθείται γίνεται πιο απλή αν στη σχέση της  $H_T$  ο συντελεστής  $R$  πάρει προσεγγιστικές τιμές, οι οποίες δίνονται στον Πίνακα 1.6 και αναφέρονται στις 6 κλιματικές ζώνες (ΣΧΗΜΑ 1.8) στις οποίες διαιρείται η Ελλάδα σε ηλιοθερμικό επίπεδο.



Σχήμα 1.8 Κλιματικές ζώνες στην Ελλάδα



<b>ΖΩΝΗ 1</b>										
<b>ΚΑΙΣΗ</b>	<b>0°</b>	<b>10°</b>	<b>20°</b>	<b>30°</b>	<b>40°</b>	<b>50°</b>	<b>60°</b>	<b>70°</b>	<b>80°</b>	<b>90°</b>
<b>Ιαν</b>	1.00	1.18	1.33	1.46	1.55	1.60	1.61	1.59	1.52	1.42
<b>Φεβ</b>	1.00	1.12	1.22	1.30	1.34	1.35	1.34	1.29	1.21	1.10
<b>Μαρ</b>	1.00	1.07	1.13	1.16	1.16	1.14	1.09	1.01	0.92	0.80
<b>Απρ</b>	1.00	1.03	1.04	1.02	0.99	0.93	0.85	0.76	0.65	0.53
<b>Μαϊ</b>	1.00	0.99	0.97	0.93	0.87	0.79	0.70	0.60	0.49	0.38
<b>Ιουν</b>	1.00	0.98	0.94	0.89	0.82	0.73	0.64	0.53	0.42	0.32
<b>Ιουλ</b>	1.00	0.98	0.95	0.90	0.84	0.75	0.66	0.55	0.44	0.33
<b>Αυγ</b>	1.00	1.01	1.01	0.99	0.94	0.87	0.78	0.68	0.57	0.45
<b>Σεπ</b>	1.00	1.06	1.11	1.13	1.12	1.08	1.02	0.93	0.82	0.70
<b>Οκτ</b>	1.00	1.12	1.22	1.30	1.34	1.34	1.32	1.26	1.17	1.06
<b>Νοε</b>	1.00	1.18	1.34	1.47	1.56	1.62	1.63	1.60	1.53	1.42
<b>Δεκ</b>	1.00	1.20	1.38	1.53	1.64	1.71	1.74	1.72	1.66	1.56

<b>ΖΩΝΗ 2</b>										
<b>ΚΑΙΣΗ</b>	<b>0°</b>	<b>10°</b>	<b>20°</b>	<b>30°</b>	<b>40°</b>	<b>50°</b>	<b>60°</b>	<b>70°</b>	<b>80°</b>	<b>90°</b>
<b>Ιαν</b>	1.00	1.19	1.36	1.49	1.59	1.65	1.67	1.59	1.59	1.49
<b>Φεβ</b>	1.00	1.13	1.24	1.32	1.36	1.38	1.37	1.24	1.24	1.13
<b>Μαρ</b>	1.00	1.07	1.13	1.16	1.17	1.14	1.10	1.02	0.93	0.81
<b>Απρ</b>	1.00	1.03	1.03	1.02	0.99	0.93	0.86	0.77	0.66	0.55
<b>Μαϊ</b>	1.00	0.99	0.97	0.93	0.88	0.80	0.71	0.61	0.51	0.40
<b>Ιουν</b>	1.00	0.98	0.94	0.89	0.82	0.74	0.65	0.54	0.44	0.33
<b>Ιουλ</b>	1.00	0.99	0.96	0.91	0.85	0.77	0.67	0.57	0.46	0.35
<b>Αυγ</b>	1.00	1.02	1.01	0.99	0.95	0.88	0.80	0.70	0.58	0.46
<b>Σεπ</b>	1.00	1.06	1.11	1.12	1.11	1.08	1.02	0.93	0.83	0.71
<b>Οκτ</b>	1.00	1.12	1.22	1.29	1.33	1.34	1.32	1.26	1.18	1.06
<b>Νοε</b>	1.00	1.19	1.35	1.49	1.58	1.64	1.66	1.63	1.56	1.46
<b>Δεκ</b>	1.00	1.20	1.38	1.53	1.64	1.71	1.74	1.72	1.66	1.56

<b>ΖΩΝΗ 3</b>										
<b>ΚΑΙΣΗ</b>	<b>0°</b>	<b>10°</b>	<b>20°</b>	<b>30°</b>	<b>40°</b>	<b>50°</b>	<b>60°</b>	<b>70°</b>	<b>80°</b>	<b>90°</b>
<b>Ιαν</b>	1.00	1.20	1.37	1.51	1.62	1.69	1.71	1.69	1.63	1.53
<b>Φεβ</b>	1.00	1.13	1.24	1.32	1.37	1.39	1.38	1.33	1.25	1.15
<b>Μαρ</b>	1.00	1.08	1.13	1.17	1.17	1.15	1.11	1.03	0.94	0.83
<b>Απρ</b>	1.00	1.03	1.04	1.03	0.99	0.94	0.87	0.78	0.68	0.56
<b>Μαϊ</b>	1.00	1.00	0.98	0.94	0.88	0.81	0.72	0.62	0.52	0.41
<b>Ιουν</b>	1.00	0.98	0.95	0.90	0.83	0.75	0.66	0.55	0.45	0.34
<b>Ιουλ</b>	1.00	0.99	0.96	0.92	0.85	0.77	0.68	0.58	0.47	0.36
<b>Αυγ</b>	1.00	1.02	1.02	1.00	0.95	0.89	0.81	0.71	0.60	0.48
<b>Σεπ</b>	1.00	1.07	1.11	1.13	1.12	1.09	1.03	0.95	0.85	0.72
<b>Οκτ</b>	1.00	1.12	1.23	1.30	1.35	1.36	1.33	1.28	1.20	1.08
<b>Νοε</b>	1.00	1.19	1.35	1.48	1.58	1.63	1.65	1.62	1.56	1.45
<b>Δεκ</b>	1.00	1.21	1.39	1.55	1.66	1.74	1.77	1.70	1.70	1.60

<b>ΖΩΝΗ 4</b>										
<b>ΚΑΙΣΗ</b>	<b>0°</b>	<b>10°</b>	<b>20°</b>	<b>30°</b>	<b>40°</b>	<b>50°</b>	<b>60°</b>	<b>70°</b>	<b>80°</b>	<b>90°</b>
<b>Ιαν</b>	1.00	1.18	1.33	1.46	1.55	1.61	1.62	1.60	1.54	1.44
<b>Φεβ</b>	1.00	1.12	1.22	1.29	1.34	1.35	1.33	1.28	1.21	1.11
<b>Μαρ</b>	1.00	1.07	1.13	1.15	1.16	1.14	1.09	1.02	0.93	0.82
<b>Απρ</b>	1.00	1.03	1.04	1.03	0.99	0.94	0.87	0.78	0.68	0.56
<b>Μαϊ</b>	1.00	1.00	0.98	0.94	0.88	0.81	0.73	0.63	0.52	0.41
<b>Ιουν</b>	1.00	0.98	0.95	0.90	0.83	0.75	0.66	0.56	0.45	0.35
<b>Ιουλ</b>	1.00	0.99	0.96	0.92	0.85	0.77	0.68	0.58	0.47	0.36
<b>Αυγ</b>	1.00	1.02	1.02	1.00	0.95	0.89	0.81	0.71	0.60	0.48
<b>Σεπ</b>	1.00	1.06	1.11	1.13	1.12	1.09	1.03	0.94	0.84	0.72
<b>Οκτ</b>	1.00	1.12	1.22	1.29	1.33	1.34	1.32	1.26	1.18	1.07
<b>Νοε</b>	1.00	1.17	1.32	1.44	1.53	1.58	1.59	1.57	1.50	1.40
<b>Δεκ</b>	1.00	1.19	1.37	1.51	1.61	1.68	1.71	1.69	1.64	1.54

<b>ΖΩΝΗ 5</b>										
<b>ΚΑΙΣΗ</b>	<b>0°</b>	<b>10°</b>	<b>20°</b>	<b>30°</b>	<b>40°</b>	<b>50°</b>	<b>60°</b>	<b>70°</b>	<b>80°</b>	<b>90°</b>
<b>Ιαν</b>	1.00	1.17	1.32	1.44	1.52	1.57	1.59	1.56	1.50	1.41
<b>Φεβ</b>	1.00	1.12	1.22	1.30	1.35	1.36	1.35	1.30	1.22	1.12
<b>Μαρ</b>	1.00	1.07	1.13	1.16	1.17	1.15	1.10	1.03	0.94	0.83
<b>Απρ</b>	1.00	1.03	1.04	1.03	1.00	0.95	0.88	0.79	0.69	0.57
<b>Μαϊ</b>	1.00	1.00	0.98	0.94	0.89	0.82	0.73	0.64	0.53	0.42
<b>Ιουν</b>	1.00	0.98	0.95	0.91	0.84	0.76	0.67	0.57	0.47	0.37
<b>Ιουλ</b>	1.00	0.99	0.96	0.92	0.86	0.78	0.69	0.59	0.49	0.38
<b>Αυγ</b>	1.00	1.02	1.02	1.00	0.96	0.90	0.82	0.72	0.61	0.49
<b>Σεπ</b>	1.00	1.07	1.11	1.13	1.13	1.09	1.04	0.96	0.86	0.74
<b>Οκτ</b>	1.00	1.12	1.22	1.29	1.34	1.35	1.33	1.27	1.19	1.08
<b>Νοε</b>	1.00	1.19	1.35	1.48	1.58	1.63	1.65	1.63	1.57	1.46
<b>Δεκ</b>	1.00	1.20	1.37	1.52	1.63	1.70	1.73	1.72	1.66	1.57

<b>ΖΩΝΗ 6</b>										
<b>ΚΛΙΣΗ</b>	<b>0°</b>	<b>10°</b>	<b>20°</b>	<b>30°</b>	<b>40°</b>	<b>50°</b>	<b>60°</b>	<b>70°</b>	<b>80°</b>	<b>90°</b>
<b>I</b>	1.00	1.18	1.34	1.48	1.57	1.64	1.66	1.64	1.58	1.49
<b>Φ</b>	1.00	1.13	1.23	1.31	1.36	1.38	1.37	1.32	1.25	1.15
<b>M</b>	1.00	1.08	1.13	1.17	1.17	1.16	1.11	1.04	0.96	0.85
<b>A</b>	1.00	1.03	1.04	1.04	0.99	0.96	0.89	0.80	0.70	0.59
<b>M</b>	1.00	1.00	0.98	0.95	0.88	0.83	0.74	0.65	0.55	0.44
<b>I</b>	1.00	0.98	0.96	0.91	0.82	0.77	0.68	0.58	0.48	0.38
<b>I</b>	1.00	0.99	0.97	0.93	0.85	0.79	0.71	0.61	0.50	0.39
<b>A</b>	1.00	1.02	1.02	1.01	0.95	0.91	0.83	0.73	0.62	0.51
<b>Σ</b>	1.00	1.07	1.11	1.14	1.11	1.10	1.05	0.97	0.87	0.75
<b>O</b>	1.00	1.12	1.23	1.30	1.33	1.36	1.34	1.29	1.21	1.10
<b>N</b>	1.00	1.19	1.35	1.48	1.58	1.64	1.66	1.64	1.58	1.48
<b>Δ</b>	1.00	1.22	1.41	1.57	1.64	1.78	1.82	1.81	1.76	1.67

Πίνακας 1.6 Προσεγγιστικές τιμές συντελεστή R για τις κλιματικές ζώνες της Ελλάδας

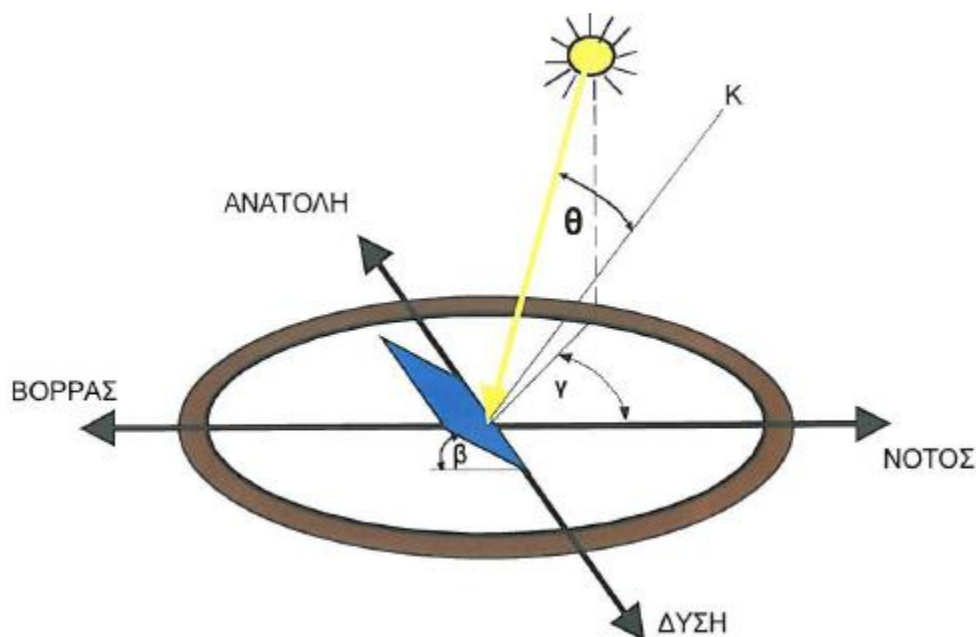
## 1.4 ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΛΙΣΗ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ

Για να είναι εφικτή η μεγιστοποίηση της ενεργειακής παραγωγικότητας των συλλεκτών, θα πρέπει να επιτυγχάνεται βέλτιστη εκμετάλλευση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Συγκεκριμένα, εφόσον η πορεία του ήλιου αλλάζει τόσο με την ώρα της ημέρας όσο και με τη μέρα του έτους, εύλογα αντιλαμβάνεται κανείς πως για να απορροφήσει τη μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία θα πρέπει να είναι σε θέση να περιστρέφεται ώστε να μπορεί να ακολουθεί την τροχιά του ήλιου και να είναι συνεχώς κάθετο στην κατεύθυνση της ακτινοβολίας.

Στην πλειονότητα των ηλιοθερμικών συστημάτων επιλέγεται σταθερός προσανατολισμός των ηλιακών συλλεκτών, ώστε να επιτυγχάνεται μέση ετήσια γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας όσο το δυνατό πιο κοντά στις  $90^\circ$ . Η επίτευξη αυτού του στόχου έγκειται στην σωστή επιλογή της κλίσης και της αζιμούθιας γωνίας του συλλέκτη. Όπως η θέση του ήλιου στον ουρανό, έτσι και ο προσανατολισμός ενός επίπεδου στην επιφάνεια της γης περιγράφεται από δύο γωνίες : την κλίση και την αζιμούθια γωνία. Η κλίση του συλλέκτη ( $\beta$ ) είναι η διέδρη γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο επίπεδο του συλλέκτη και στον ορίζοντα και μπορεί να πάρει τιμές από

$0^\circ$  μέχρι  $180^\circ$ . Για γωνίες  $\beta > 90^\circ$  το επίπεδο του συλλέκτη είναι στραμμένο προς τα κάτω (Σχήμα 1.1). Η αζιμούθια γωνία του συλλέκτη ( $\gamma$ ) είναι η γωνία που σχηματίζεται πάνω στο οριζόντιο επίπεδο ανάμεσα στην προβολή της κατακόρυφου του συλλέκτη και στον τοπικό μεσημβρινό βορρά-νότου. Παίρνει τιμές από  $-180^\circ$  μέχρι  $+180^\circ$ . Η γωνία  $-180^\circ$  (που συμπίπτει με την  $+180^\circ$ ) αντιστοιχεί σε τοποθέτηση του συλλέκτη προς το βορρά, η γωνία  $-90^\circ$  προς την ανατολή, η γωνία  $0^\circ$  προς το νότο και η γωνία  $+90^\circ$  προς τη δύση.

Προφανώς, η πυκνότερη ισχύς μιας δέσμης ηλιακής ακτινοβολίας, πάνω σε ένα επίπεδο συλλέκτη θα πραγματοποιείται όταν η επιφάνεια του είναι κάθετη προς τη κατεύθυνση της ακτινοβολίας, δηλαδή όταν η γωνία πρόσπτωσης ( $\theta$ ) είναι  $0^\circ$ . Η συνθήκη όμως αυτή δεν είναι εύκολο να εξασφαλιστεί καθώς ο ήλιος συνεχώς μετακινείται στον ουρανό κατά τη διάρκεια της ημέρας. Έχουν κατασκευαστεί μηχανικές διατάξεις που επαναπροσανατολίζουν συνεχώς τον συλλέκτη (π.χ. με τη βοήθεια υπολογιστή ή φωτοκύτταρων) ώστε η επιφάνεια του να αντικρίζει πάντα κάθετα τον ήλιο. Οι διατάξεις όμως αυτές είναι πολύπλοκες και δαπανηρές. Έτσι, η χρήση τους δικαιολογείται μόνον σε περιπτώσεις εφαρμογών όπως στα συστήματα συγκεντρωμένης ακτινοβολίας με φακούς ή κάτοπτρα.



Σχήμα 1.9 Η κλίση του συλλέκτη ( $\beta$ ), το αζιμούθιο του συλλέκτη ( $\gamma$ ) και η γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτίνων στο συλλέκτη ( $\theta$ )

Η κλίση του συλλέκτη ( $\beta$ ), το αζιμούθιο του συλλέκτη ( $\gamma$ ) και η γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτίνων στο συλλέκτη ( $\theta$ ). Στις συνηθισμένες περιπτώσεις οι συλλέκτες τοποθετούνται σε σταθερή κλίση και αζιμούθια γωνία, που επιλέγονται ώστε η γωνία της πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας να είναι όσο το δυνατό μικρότερη, κατά τη διάρκεια του έτους. Η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας συνδέεται με τις άλλες γωνίες της ηλιακής γεωμετρίας, που αναφέρθηκαν παραπάνω, με τη σχέση :

$$\cos\theta = \sin\delta \sin\varphi \cos\beta - \sin\delta \cos\varphi \sin\beta \cos\gamma + \cos\delta \cos\varphi \cos\beta \cos\omega + \cos\delta \sin\varphi \sin\beta \cos\gamma \cos\omega + \cos\delta \sin\beta \sin\omega \sin\gamma$$

Οι επίπεδοι συλλέκτες χρησιμοποιούν την άμεση και τη διάχυτη ακτινοβολία και συνήθως τοποθετούνται υπό σταθερή κλίση και προσανατολισμό κατά τη διάρκεια του έτους. Η επιλογή του ευνοϊκού προσανατολισμού και της κλίσης του συλλέκτη είναι το σημαντικότερο μέτρο για τη βελτίωση του ηλιακού κέρδους. Η θέση του συλλέκτη (προσανατολισμός και κλίση) επηρεάζει την απόδοσή του κατά δύο τρόπους. Πρώτα επηρεάζει σημαντικά το ποσό της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει στην επιφάνεια του συλλέκτη. Ακόμα η θέση του συλλέκτη επηρεάζει τον συντελεστή διάβασης των διαφανών καλυμμάτων και το συντελεστή απορρόφησης του απορροφητήρα, αφού οι δύο συντελεστές είναι συναρτήσεις της γωνίας, που η ακτινοβολία προσπίπτει στην επιφάνεια του συλλέκτη.



Γενικά η μεγαλύτερη ποσότητα της ηλιακής ενέργειας, λαμβάνεται σε μία Νότια προσανατολισμένη κλίση. Εάν η επιφάνεια του συλλέκτη δεν αντικρίζει ακριβώς το νότο, το ποσό της ωφέλιμης ενέργειας, μειώνεται ελαφρά σε μία γωνία 30° ανατολικά, δυτικά ή νότια. Η κλίση για συστήματα που λειτουργούν όλο το χρόνο είναι 45° ενώ αντίθετα για συστήματα που λειτουργούν καλοκαιρινούς μήνες π.χ ξενοδοχεία η κλίση λαμβάνεται μικρότερη περίπου 25°. Έτσι είναι δυνατόν να αξιολογηθεί ορθά η εγκατάσταση ηλιακών συστημάτων (π.χ. ηλιακοί συλλέκτες) ώστε να βελτιστοποιηθεί η απόδοσή τους.

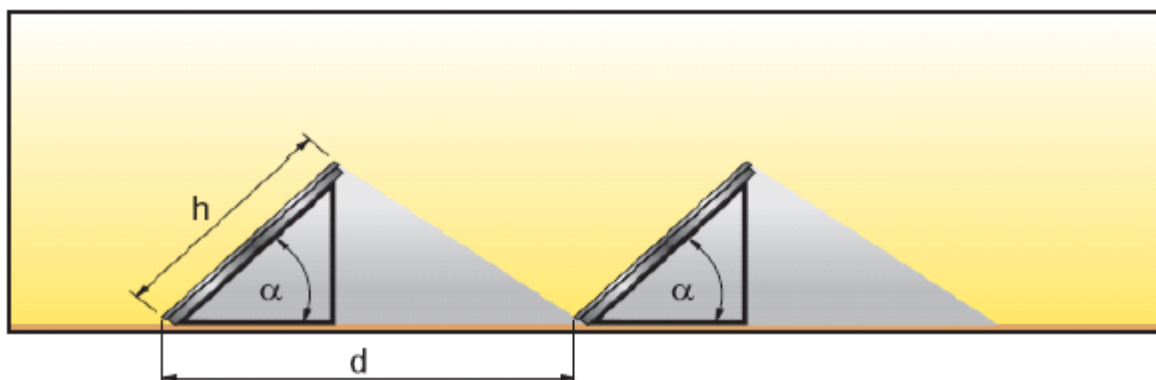
Τέλος, η τοποθέτηση τους είναι πολύ σημαντική και συμβάλλει στην μεγιστοποίηση της απόδοσης του συλλέκτη. Οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες τοποθετούνται στο έδαφος, σε οριζόντιες στέγες (ταράτσες), σε κεκλιμένες στέγες, σε στέγαστρα και σε προσόψεις κτιρίων.

Στην περίπτωση της στέγης, αν έχει ελάχιστη κλίση 20° οι συλλέκτες μπορούν να ενσωματωθούν σε αυτή αντικαθιστώντας τα κεραμίδια. Αν επιλεγθεί ο παραπάνω τρόπος εγκατάστασης απαιτείται υψηλός βαθμός στεγανοποίησης και έχει μεγαλύτερες δυσκολίες στην κατασκευή από μία απλή στήριξη των συλλεκτών πάνω στη στέγη.

Στην περίπτωση που επιλεγθεί οριζόντια επιφάνεια (έδαφος ή ταράτσα), πρέπει να εξασφαλιστεί η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των συστοιχιών των συλλεκτών, ώστε να μη σκιάζεται η επόμενη. Η ελάχιστη απόδοση υπολογίζεται από τη σχέση:

$$D = \frac{h}{\tan\alpha} = \frac{l \cdot \sin\beta}{\tan\alpha} \quad [\text{m}]$$

Όπου,  $h$  [m],  $l$  [m],  $\beta$  [ο],  $\alpha$  [ο] φαίνονται στο Σχήμα 1.2.

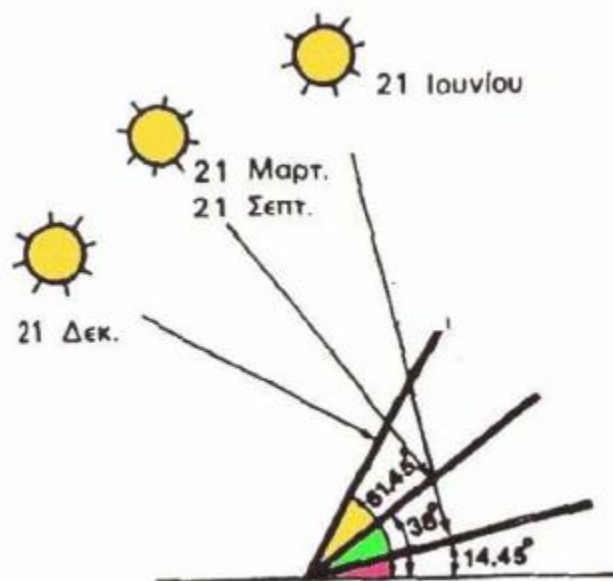


Σχήμα 1.10 Θέση τοποθέτησης ηλιακών συλλεκτών

## 1.5 ΠΡΑΚΤΙΚΟΙ ΚΑΝΟΝΕΣ ΓΙΑ ΤΗ ΣΥΛΛΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Στο βόρειο ημισφαίριο, η βέλτιστη κλίση του συλλέκτη, για τη διάρκεια του έτους, είναι ίση με τον γεωγραφικό παράλληλο του τόπου, και η αζιμούθια γωνία είναι  $0^\circ$  (προς το νότο). Λόγων όμως της μεταβολής της απόκλισης του ήλιου στη διάρκεια του έτους, η βέλτιστη κλίση του συλλέκτη είναι διαφορετική για κάθε εποχή. Έτσι, αν επιδιώκεται να παράγει το σύστημα όσο το δυνατόν περισσότερη ενέργεια στη διάρκεια του καλοκαιριού, η κλίση του συλλέκτη επιλέγεται περίπου  $10^\circ$  ως  $15^\circ$  μικρότερη από την παράλληλο του τόπου, ενώ για τον χειμώνα η κλίση επιλέγεται περίπου  $10^\circ$  ως  $15^\circ$  μεγαλύτερη από την παράλληλο του τόπου. Στο Σχήμα 1.11 δίνεται ένα παράδειγμα της βέλτιστης κλίσης για τον ηλιακό συλλέκτη στις χαρακτηριστικές ημερομηνίες του έτους. Συνοψίζοντας: Η βέλτιστη γωνία κλίσης ( $\beta$ ) θα πρέπει να είναι περίπου ίση με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου ( $\phi$ ). Κατά την διάρκεια της θερινής περιόδου: Η βέλτιστη γωνία κλίσης ( $\beta$ ) πρέπει να είναι περίπου  $10^\circ$ - $15^\circ$  μικρότερη από το γεωγραφικό πλάτος του τόπου ( $\phi$ ). Κατά την διάρκεια της χειμερινής περιόδου: Η βέλτιστη γωνία κλίσης ( $\beta$ ) πρέπει να είναι περίπου  $10^\circ$ - $15^\circ$  μεγαλύτερη από το γεωγραφικό πλάτος του τόπου ( $\phi$ ). Αν στο έδαφος υπάρχει επιφάνεια με μεγάλο συντελεστή ανάκλασης (π.χ. χιόνι) απαιτείται μεγαλύτερη κλίση. Ο βέλτιστος προσανατολισμός (αζιμούθιο  $A$ ) είναι νότιος ( $A=0$ ), ενώ απόκλιση κατά  $20^\circ$ - $30^\circ$  από νότο έχει μικρή επίδραση στην ετήσια συλλεγόμενη ενέργεια.

Η βέλτιστη κλίση ενός ηλιακού συλλέκτη στις χαρακτηριστικές μέρες του έτους, στη Κρήτη με γεωγραφικό πλάτος  $35,5^\circ$ . Τα ύψη του ηλίου αφορούν τα αντίστοιχα ηλιακά μεσημέρια. Τα παραπάνω ισχύουν για τη συλλογή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που έρχεται σαν δέσμη από τον ήλιο. Για τις άλλες, από ενεργειακή άποψη λιγότερο σημαντικές, μορφές της ηλιακής ακτινοβολίας, ο κυριότερος παράγοντας είναι η απόλυτη τιμή της κλίσης του συλλέκτη, ανεξάρτητα από τη θέση του ήλιου. Έτσι, όσο η κλίση απέχει περισσότερο από το οριζόντιο, τόσο μεγαλύτερο ποσό ανακλώμενης ακτινοβολίας από το έδαφος δέχεται ο συλλέκτης, αλλά και τόσο μικρότερο ποσό διάχυτης ακτινοβολίας από τον ουρανό.



Σχήμα 1.11 Η βέλτιστη κλίση ενός ηλιακού συλλέκτη

Για παράδειγμα, σε περιοχές με υγρό κλίμα, όπου λόγω των σταγονιδίων του νερού στην ατμόσφαιρα, ένα μεγάλο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας διαχέεται στον ουρανό, η βέλτιστη κλίση του ηλιακού συλλέκτη για τη διάρκεια ολόκληρου του έτους είναι περίπου 10 - 15% μικρότερη από τη γωνία του τοπικού γεωγραφικού πλάτους. Έτσι, ο συλλέκτης αντικρίζει περισσότερο τον ουρανό και δέχεται αφθονότερα τη διάχυτη ακτινοβολία.

Η ποσότητα της ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το υλικό που καλύπτει την επιφάνεια που δέχεται την ακτινοβολία. Η ικανότητα της ανάκλασης εκφράζεται από ένα συντελεστή που κυμαίνεται από 0, για πλήρη απορρόφηση της ακτινοβολίας, μέχρι 1, για πλήρη ανάκλαση. [1]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:

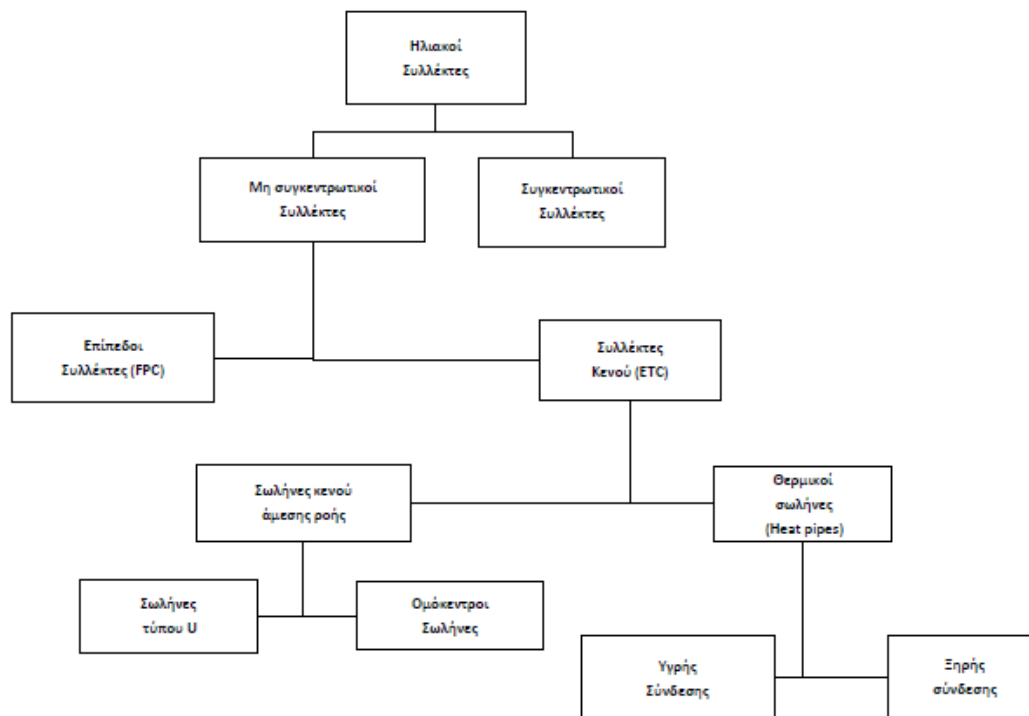
# ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ

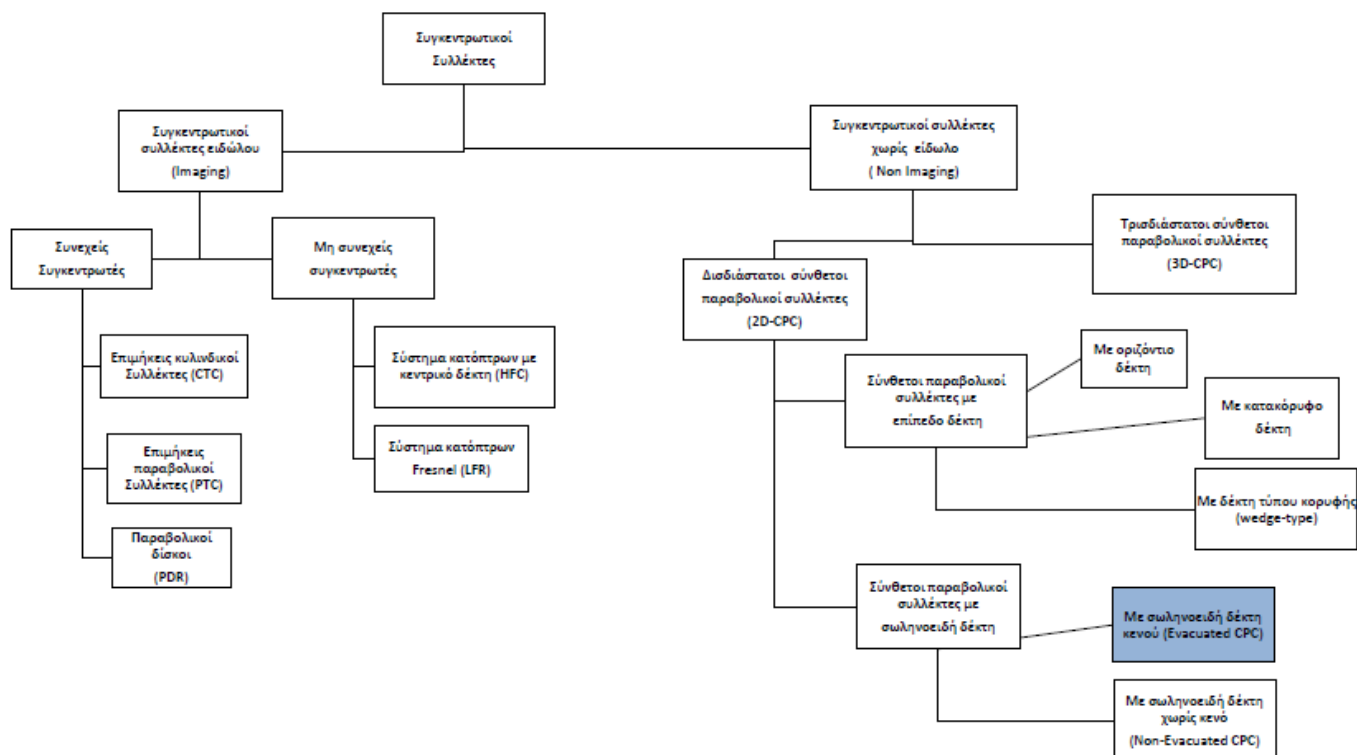
### 2.1 ΕΙΔΗ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ

Ο ηλιακός συλλέκτης είναι ένας ειδικής μορφής εναλλάκτης που μετατρέπει την ηλιακή ακτινοβολία σε θερμότητα. Η ιδιαιτερότητά του σε σχέση με τους κλασικούς εναλλάκτες έγκειται στο ότι μεταφέρει ενέργεια μορφής ακτινοβολίας από πολύ μακρινή πηγή –τον ήλιο- σε ένα εργαζόμενο μέσο (νερό,αέρας ή λάδι). Αντίθετα στους συμβατικούς εναλλάκτες η μετάδοση θερμότητας πραγματοποιείται από ρευστό σε ρευστό κυρίως με συναγωγή και η ακτινοβολία δεν παίζει σημαντικό ρόλο. Οι ηλιακοί συλλέκτες διακρίνονται αρχικά σε δύο μεγάλες κατηγορίες : τους μη συγκεντρωτικούς και τους συγκεντρωτικούς.

Οι μη συγκεντρωτικοί συλλέκτες χρησιμοποιούν την ίδια επιφάνεια για τη συλλογή και την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας.

Οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες χρησιμοποιούν ανακλαστικές επιφάνειες ή διαθλαστικούς φακούς με σκοπό τη συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας σε μικρότερη επιφάνεια απορρόφησης (δέκτης) αυξάνοντας έτσι τη ροή ενέργειας. Στο παρακάτω οργανωτικό διάγραμμα παρουσιάζονται τα βασικά είδη ηλιακών συλλεκτών. [2]





## 2.2 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ

Η ανάγκη για απόδοση ενέργειας σε θερμοκρασίες υψηλότερες από αυτές που επιτυγχάνονται από τους συνήθεις επίπεδους συλλέκτες αλλά και για την αύξηση του βαθμού απόδοσης των ηλιακών συστημάτων γενικότερα έστρεψε το ενδιαφέρον στην κατασκευή συγκεντρωτικών συλλεκτών [3].

Θεωρητικά, η θερμοκρασία που αποδίδει ένας συλλέκτης είναι δυνατόν να αυξηθεί μειώνοντας την επιφάνεια στην οποία λαμβάνουν χώρα οι θερμικές απώλειες. Πρακτικά αυτό επιτυγχάνεται με παρεμβολή μιας ανακλαστικής ή διαθλαστικής επιφάνειας μεταξύ της πηγής ακτινοβολίας (ήλιος) και της επιφάνειας απορρόφησης. Στις περισσότερες περιπτώσεις η επιφάνεια απορρόφησης είναι μικρότερη (έως και κατά πολύ μικρότερη) σε σχέση με την επιφάνεια του συγκεντρωτή ώστε η ροή ακτινοβολίας προς τον απορροφητή να είναι σημαντικά αυξημένη.

Η συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι απαραίτητη όταν επιδιώκονται υψηλές θερμοκρασίες ή όταν το κόστος του απορροφητή είναι αρκετά υψηλότερο από το κόστος του ανακλαστήρα. Οι θερμικές απώλειες είναι ανάλογες του απορροφητή και συνεπώς αντιστρόφως ανάλογες του λόγου συγκέντρωσης. Μέχρι σήμερα έχουν σχεδιαστεί και κατασκευαστεί πολυάριθμοι τύποι συγκεντρωτικών συλλεκτών. [4]

## 2.3 ΜΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ

Στην κατηγορία των μη συγκεντρωτικών συλλεκτών υπάγονται οι επίπεδοι συλλέκτες και οι συλλέκτες κενού.

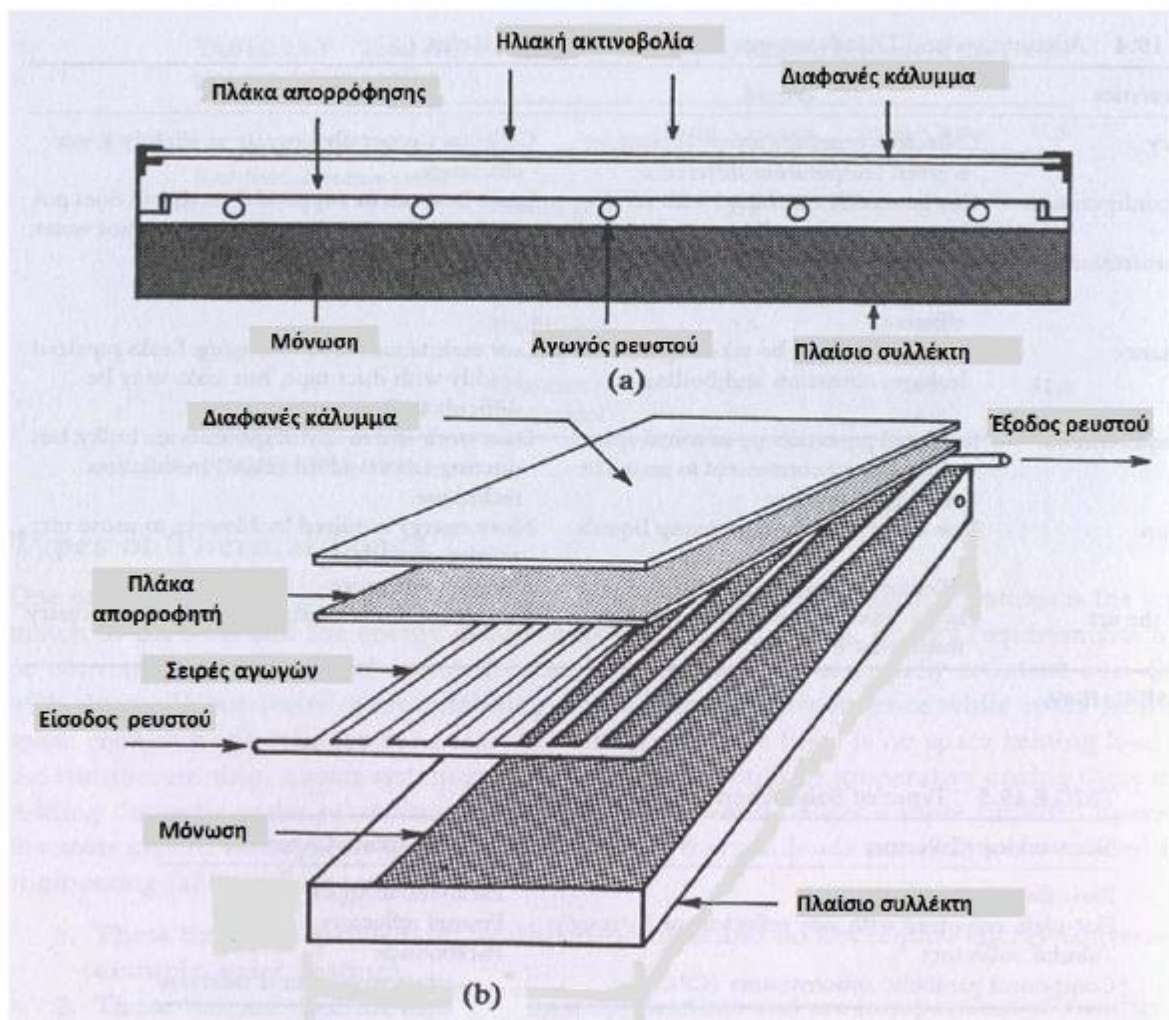
### 2.3.1 ΕΠΙΠΕΔΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ

Ένας τυπικός επίπεδος ηλιακός συλλέκτης αποτελείται τα εξής βασικά μέρη :

☐ μια μαύρη απορροφητική πλάκα (απορροφητήρας) που απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία και ένα σύστημα κυκλοφορίας του εργαζόμενου μέσου. Το σύστημα κυκλοφορίας αποτελείται κυρίως από σωλήνες αν πρόκειται για νερό και κανάλια αν πρόκειται για αέρα.

☐ ένα ή περισσότερα διαφανή καλύμματα που βρίσκονται πάνω από τον απορροφητήρα ώστε να μειώνονται οι θερμικές απώλειες συναγωγής και ακτινοβολίας προς το περιβάλλον

☐ Ένα πλαίσιο με μεταλλική βάση μονωμένο πίσω και πλευρικά ώστε να ελαχιστοποιούνται οι θερμικές απώλειες



Σχήμα 2.1 : Τυπικός επίπεδος ηλιακός συλλέκτης

Οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες αξιοποιούν την άμεση και τη διάχυτη ακτινοβολία και δεν απαιτούν μηχανισμούς παρακολούθησης του ηλίου, γι' αυτό και έχουν χαμηλό κόστος συντήρησης. Τοποθετούνται με προσανατολισμό προς τον ισημερινό με κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο  $\beta$  ώστε να μεγιστοποιείται η προσπίπτουσα ακτινοβολία κατά την περίοδο που ενδιαφέρει η χρήση του συλλέκτη.

Οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες χρησιμοποιούνται όπου απαιτείται απόδοση της ενέργειας σε μέσες θερμοκρασίες περίπου 100°C πάνω από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Συνήθως συναντώνται σε εφαρμογές όπως η θέρμανση ζεστού νερού χρήσης, η θέρμανση κτιρίων ενώ σπανιότερα ο κλιματισμός και η παραγωγή θερμότητας για βιομηχανική χρήση. Οι συμβατικοί επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες κατασκευάζονται για να είναι αποδοτικοί κυρίως σε ηλιόλουστα και θερμά κλίματα. [5]

### 2.3.1.1 ΕΠΙΠΕΔΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ ΑΕΡΑ

Οι συλλέκτες αέρα είναι επίπεδοι συλλέκτες που χρησιμοποιούνται κυρίως για τη θέρμανση χώρων. Η απορροφητική πλάκα στους συλλέκτες αέρα είναι κατασκευασμένη από μεταλλικά συνήθως υλικά. Η θερμότητα απάγεται είτε με φυσική συναγωγή ή εξαναγκασμένα ( π.χ με χρήση ανεμιστήρων). Επειδή το εργαζόμενο μέσο, που είναι ο αέρας, έχει χαμηλή δυνατότητα μεταφοράς θερμότητας, είναι αναγκαίο να περνάει από όσο το δυνατόν μεγαλύτερη επιφάνεια συναλλαγής, και συνεπώς να ρέει πάνω από όλη την επιφάνεια του απορροφητήρα, και ορισμένες φορές και από τις δυο του μεριές. Για το λόγο αυτό σε μερικά ηλιακά συστήματα αέρα, χρησιμοποιούνται πτερύγια ή αυλακώσεις στην υδραυλική διάταξη των σωλήνων για να αυξηθεί η τύρβη και να βελτιωθεί η μεταφορά θερμότητας. [6] Το μειονέκτημα σε αυτές τις περιπτώσεις είναι ότι λόγω της ύπαρξης ανεμιστήρων απαιτείται κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και άρα αύξηση του κόστους λειτουργίας. Οι συλλέκτες αέρα δεν παρουσιάζουν βλάβες οφειλόμενες σε χαμηλές θερμοκρασίες όπως τα συστήματα υγρού. Ωστόσο, τυχόν διαρροές είναι πιο δύσκολο να ανιχνευθούν. [7]

### 2.3.1.2 ΕΠΙΠΕΔΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ ΥΓΡΟΥ

Σε έναν συλλέκτη υγρού, η ηλιακή ενέργεια ζεσταίνει ένα υγρό καθώς αυτό ρέει σε αγωγούς, μέσα ή γειτονικά της απορροφητικής πλακάς. Οι αγωγοί της ροής είναι προσαρτημένοι στην απορροφητική πλάκα έτσι ώστε η απορροφούμενη θερμότητα να μεταφέρεται εύκολα στο υγρό. Οι αγωγοί μπορεί να είναι τοποθετημένοι παράλληλα, ή με μορφή σερπαντίνας. Η σερπαντίνα, λόγω του ιδιαίτερου

σχηματισμού της, ελαχιστοποιεί την πιθανότητα διαρροών και εξασφαλίζει ομοιόμορφη ροή. Δεν ενδείκνυται όμως για συστήματα που πρέπει να αποστραγγιστούν για προστασία από παγετό καθώς αυτό είναι ανέφικτο σε καμπυλωτά περάσματα.

Το ρευστό, κατά τη διέλευση του από το συλλέκτη, απορροφά ποσά θερμότητας, με συνέπεια η θερμοκρασία του να ανεβαίνει. Αν η διερχόμενη ποσότητα ρευστού είναι μικρή η τελική του θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη αλλά η απόδοση του συλλέκτη μικρότερη. Έτσι, η ποσότητα του ρευστού που διέρχεται και η αρχική του θερμοκρασία παίζουν ρόλο στην απόδοση του συλλέκτη. Η μετάδοση θερμότητας από την απορροφητική επιφάνεια προς το ρευστό εξαρτάται από τη γεωμετρία και τα υλικά από τα οποία αποτελείται το σύστημα.

Το βασικό ενεργειακό ισοζύγιο σε έναν επίπεδο συλλέκτη υγρού μπορεί να γραφεί ως εξής:

***Συλλεγόμενη ενέργεια = Απορροφούμενη ενέργεια – Θερμικές απώλειες του συλλέκτη.***

Οι θερμικές απώλειες του συλλέκτη είναι δύσκολο να υπολογισθούν. Ο συλλέκτης χάνει θερμότητα από τη πίσω μονωμένη πλευρά, από τα άκρα του, αλλά κυρίως από τη διαφανή πλάκα, από την οποία προκύπτουν απώλειες είτε με αγωγή, είτε με ακτινοβολία. Είναι δύσκολο να εκτιμηθούν γιατί οι απώλειες από το συλλέκτη είναι ανάλογες προς τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ συλλέκτη και περιβάλλοντος. Τα πιο απλά συστήματα συλλέκτη υγρού χρησιμοποιούνται για νερό οικιακής χρήσης το οποίο θερμαίνεται απευθείας μέσα στο συλλέκτη και στη συνέχεια διανέμεται με δίκτυα

αγωγών για χρήση.

Σε περιοχές όπου επικρατούν πολύ χαμηλές θερμοκρασίες το νερό πρέπει να οδηγηθεί σε έναν άλλο εναλλάκτη ή/και να χρησιμοποιηθεί αντιψυκτικό υγρό.[8]

### **2.3.2 ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ ΜΕ ΣΩΛΗΝΕΣ ΚΕΝΟΥ**

Οι συμβατικοί επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες κατασκευάστηκαν για να λειτουργούν σε ηλιόλουστα και θερμά κλίματα. Η αποδοτικότητα τους μειώνεται ραγδαία όταν δεν επικρατούν ιδανικές συνθήκες, δηλαδή κατά τη διάρκεια ημερών με χαμηλές θερμοκρασίες και υψηλές ταχύτητες αέρα. Επιπρόσθετα οι καιρικές συνθήκες καθώς και η υγρασία, προκαλούν αλλοίωση των εσωτερικών υλικών του συλλέκτη, που έχει ως αποτέλεσμα τη περαιτέρω μείωση της απόδοσης του συστήματος. Αυτές οι αδυναμίες ελαχιστοποιούνται με τους συλλέκτες κενού.

Οι ηλιακοί συλλέκτες με σωλήνες κενού, αποτελούνται από σωλήνες διπλής υάλωσης μεταξύ των οποίων υπάρχει πολύ χαμηλή πίεση. Το γυαλί που χρησιμοποιείται είναι ιδιαίτερης σκληρότητας με μεγάλες αντοχές. Ενδιάμεσα των δυο γυάλινων επιφανειών υπάρχει θερμοαπορροφητικό υλικό που μετατρέπει την ηλιακή ενέργεια σε θερμότητα.[9]



Σε έναν συλλέκτη κενού, η ηλιακή ακτινοβολία εισέρχεται διαμέσου του εξωτερικού γυάλινου αγωγού, προσπίπτει στον απορροφητικό σωλήνα, και μετατρέπεται σε θερμότητα. Ο συλλέκτης αποτελείται από συστοιχία παράλληλων γυάλινων σωλήνων, ο καθένας από τους οποίους περιέχει έναν χάλκινο απορροφητικό σωλήνα επικαλυμμένο με επιλεκτική βαφή. Ο εσωτερικός σωλήνας, αποτελεί το σωλήνα προσαγωγής του ρευστού. Το ρευστό που έχει θερμανθεί κυκλοφορεί μέσα στον εναλλάκτη ο οποίος βρίσκεται στο άνω μέρος του συλλέκτη, και δίνει τη θερμότητα αυτή στο νερό που υπάρχει συνήθως σε δεξαμενή αποθήκευσης.

Όταν κατασκευάζονται οι συλλέκτες κενού, δημιουργείται χαμηλή υποπίεση μεταξύ των δύο σωλήνων. Οι απώλειες λόγω συναγωγής ελαχιστοποιούνται, γιατί δεν υπάρχει αέρας να κυκλοφορήσει. Μπορεί να υπάρχουν κάποιες θερμικές απώλειες, το ποσό των οποίων είναι πολύ μικρό συγκριτικά με το ποσό θερμότητας που μεταφέρεται στο ρευστό μέσω του απορροφητικού εσωτερικού σωλήνα. Η χαμηλή υποπίεση στο γυάλινο αγωγό, είναι η καλύτερη μόνωση για τον ηλιακό συλλέκτη, καθώς αποτρέπει τις απώλειες και προστατεύει την απορροφητική πλάκα και το θερμοσωλήνα από τις εξωτερικές συνθήκες. Οι αποστάσεις μεταξύ των γυάλινων σωλήνων είναι τόσες ώστε να μη σκιάζει η μία την άλλη. Αυτές οι λεπτομέρειες έχουν σαν αποτέλεσμα ο συλλέκτης κενού να παρουσιάζει καλύτερη απόδοση από κάθε άλλου είδους συλλέκτη. [10]

Κύριο μειονέκτημα τους είναι ότι παρουσιάζουν κατασκευαστικές δυσκολίες λόγω της υποπίεσης που πρέπει να δημιουργηθεί και της συνεργασίας που πρέπει να επιτευχθεί μεταξύ διαφορετικών υλικών στη θέρμανση και ψύξη. Για το λόγο αυτό έχουν υψηλό κόστος κατασκευής και υψηλή τιμή πώλησης. [11]

Βασικό στοιχείο των συλλεκτών κενού είναι ο χαλκοσωλήνας που βρίσκεται στο κέντρο του διπλού γυάλινου σωλήνα. Αυτός αποτελεί έναν θερμοσωλήνα, μέσα στον οποίο υπάρχει μικρή ποσότητα ρευστού, με χαμηλό σημείο ζέσης, που φτάνει σε βρασμό και μετατρέπεται σε ατμό σε χαμηλές θερμοκρασίες. Ο ατμός ανεβαίνει στο υψηλότερο σημείο του χαλκοσωλήνα όπου έρχεται σε επαφή με το ψυχρό νερό του σωλήνα συγκέντρωσης, αποδίδει την ενέργειά του, ψύχεται, υγροποιείται και κινείται πάλι προς τα κάτω. Οι συλλέκτες αυτού του τύπου αποτελούνται από 3 τομείς:

I. Εξάτμιστή

II. Αδιαβατικό τμήμα

III. Συμπυκνωτή

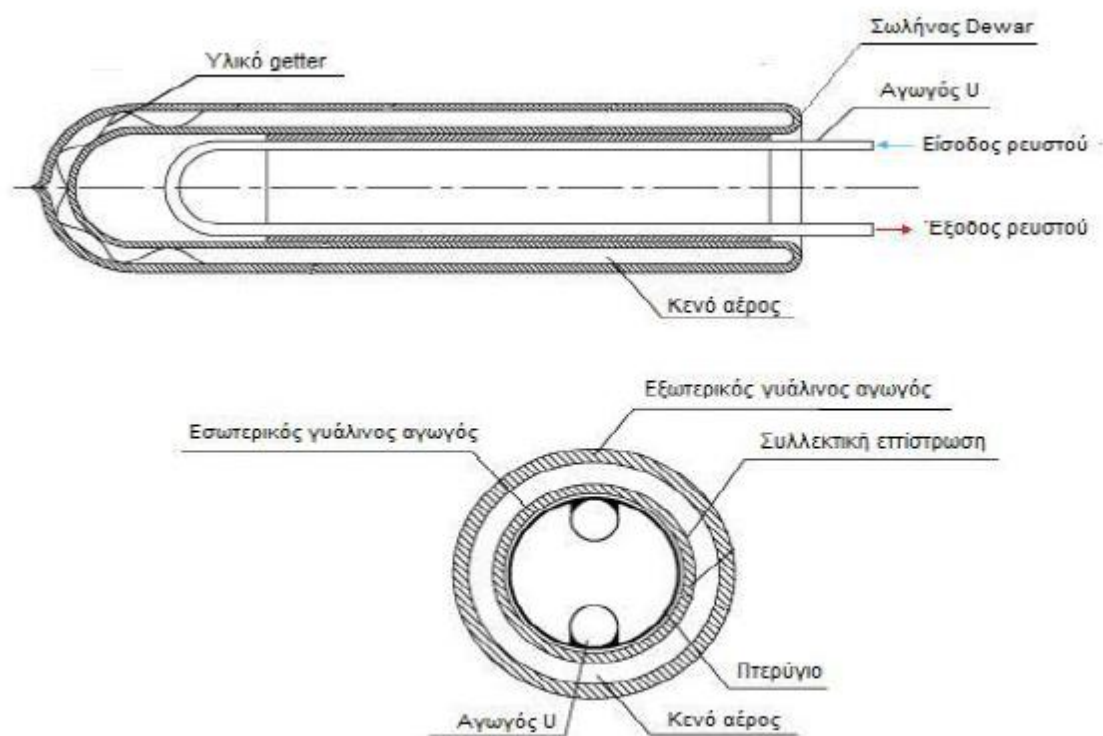
Όταν οι ακτίνες του ήλιου προσπέσουν στον τομέα εξάτμισης του θερμοσωλήνα τότε η εξάτμιση είναι άμεση, το αέριο κυκλοφορεί μέχρι το άλλο άκρο, στον συμπυκνωτή, ο οποίος βρίσκεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία και δίνει τη θερμότητα στο ρευστό απομάκρυνσης της θερμότητας. Επιστρέφει υγροποιημένο το ρευστό μέσω του ινώδους τοιχώματος εσωτερικά του θερμοσωλήνα. Το φαινόμενο αυτό επαναλαμβάνεται συνεχώς. Βρίσκουν εφαρμογή σε Βόρειες χώρες με μικρή ηλιοφάνεια και χαμηλές θερμοκρασίες. [12]

Με βάση τον τρόπο σύνδεσης των θερμοαντικών αυλών με τον κεντρικό αγωγό αλλά και τον τρόπο συναλλαγής θερμότητας μεταξύ αυτών οι συλλέκτες κενού μπορούν να ταξινομηθούν στις παρακάτω κατηγορίες:

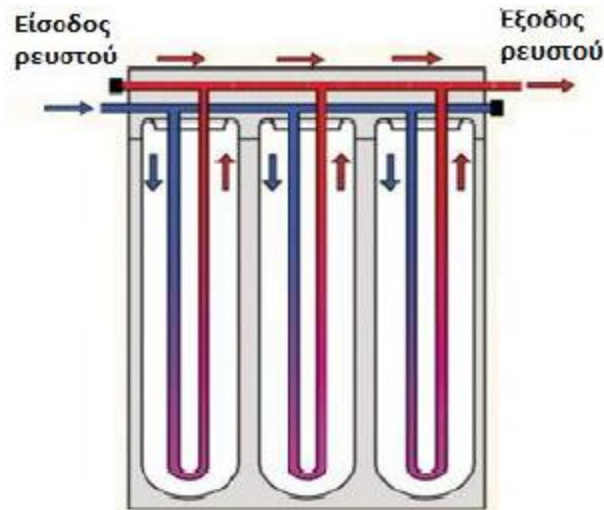
- Συλλέκτες άμεσης ροής
- Συλλέκτες θερμικών σωλήνων οι οποίοι με τη σειρά τους διακρίνονται σε συλλέκτες ξηρής σύνδεσης και υγρής σύνδεσης. [13]

### 2.3.2.1 ΣΩΛΗΝΕΣ ΚΕΝΟΥ ΑΜΕΣΗΣ ΡΟΗΣ

Στους σωλήνες άμεσης ροής το εργαζόμενο μέσο είναι συνήθως νερό και ο χάλκινος σωλήνας που περιέχεται σε κάθε σωλήνα κενού έχει σχήμα U με τα άκρα του συγκολλημένα πάνω σε δύο διαφορετικούς αγωγούς (κρύου και ζεστού νερού αντίστοιχα). Το ψυχρό ρεύμα που εισέρχεται στον έναν αγωγό περνάει μέσα από κάθε χάλκινο σωλήνα U, θερμαίνεται και εξέρχεται από την άλλη άκρη του στον αγωγό του θερμού ρεύματος.



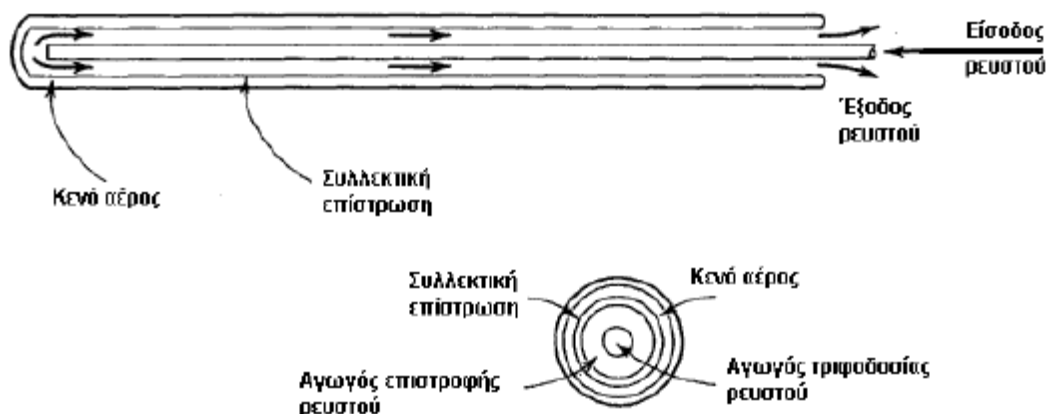
Σχήμα 2.2 : Τομή σωλήνα κενού άμεσης ροής με αγωγό U



Σχήμα 2.3 : Τομή συλλέκτη με σωλήνες κενού άμεσης ροής με αγωγούς U

Συνήθως, πάνω στο χάλκινο αγωγό υπάρχει προσκολλημένο ένα επίπεδο ή κοίλο αλουμινένιο πτερύγιο. Το πτερύγιο αυτό είναι επικαλυμμένο έτσι ώστε να απορροφάται όσο το δυνατόν περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία. Συχνά επιτρέπεται και η περιστροφή κάθε σωλήνα έτσι ώστε το απορροφητικό πτερύγιο να βρίσκεται στην επιθυμητή κλίση, ακόμα και όταν ο συλλέκτης έχει τοποθετηθεί οριζόντια.

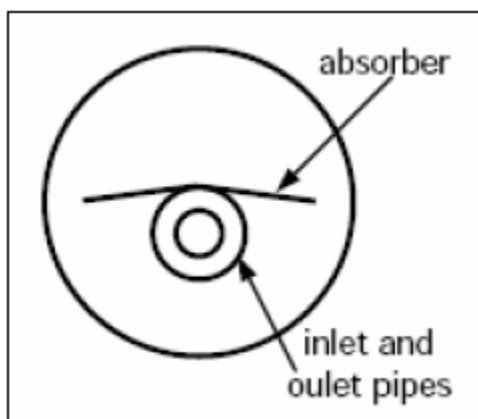
Στην κατηγορία των συλλεκτών κενού άμεσης ροής αντί για αγωγούς σχήματος U χρησιμοποιούνται εναλλακτικά ομόκεντροι σωλήνες. Αν και ο σχεδιασμός αυτός είναι αποτελεσματικός, δεν είναι πάντα αξιόπιστος, καθώς η κατανομή θερμοκρασιών μεταξύ του γυάλινου και του μεταλλικού σωλήνα διαφέρουν, συνέπεια του οποίου είναι το κενό μεταξύ τους να εξασθενεί και να αστοχεί, καθιστώντας ανύπαρκτη τη λειτουργία εν κενώ και συμβάλλοντας στην κατακόρυφη ελάττωση του βαθμού απόδοσής του. [14]



Σχήμα 2.4 : Σωλήνας κενού με ομόκεντρο σωλήνα ροής.

Ανάλογα με την κατανομή των σωλήνων, έχουμε:

### 2.3.2.1.1 ΟΜΟΚΕΝΤΡΟΙ ΣΩΛΗΝΕΣ ΕΙΣΟΔΟΥ – ΕΞΟΔΟΥ (ΓΥΑΛΙ – ΜΕΤΑΛΛΟ)



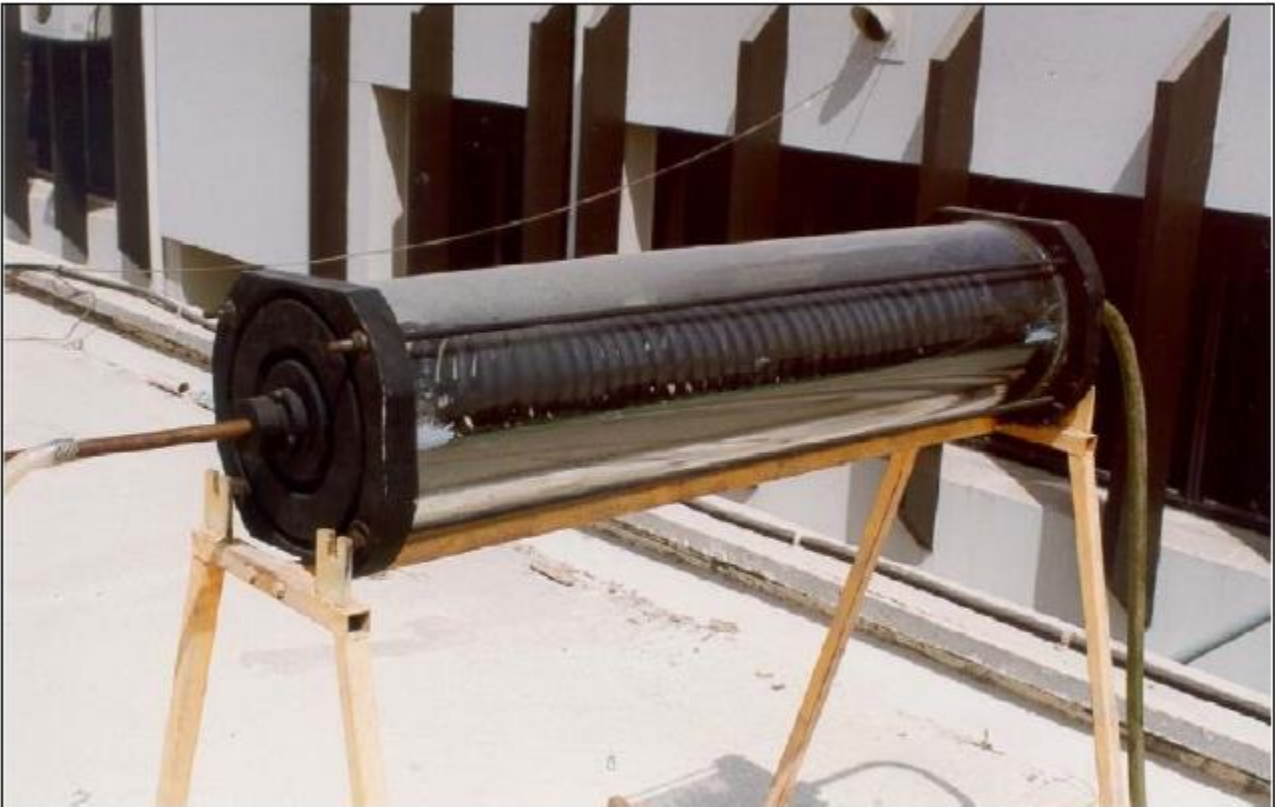
Σχήμα 2.5 : Ομόκεντροι σωλήνες εισόδου-εξόδου

Οι ομόκεντροι σωλήνες εισόδου – εξόδου εμφανίζουν μικρότερες θερμικές απώλειες, λόγω του ότι κατασκευάζονται από γυαλί και μέταλλο. Τέλος, ο χώρος που καταλαμβάνει ο συλλέκτης άμεσης ροής είναι αρκετά μικρότερος από τον αντίστοιχο των επίπεδων ηλιακών συλλεκτών, καθώς επίσης και, το κόστος κατασκευής του. [15]

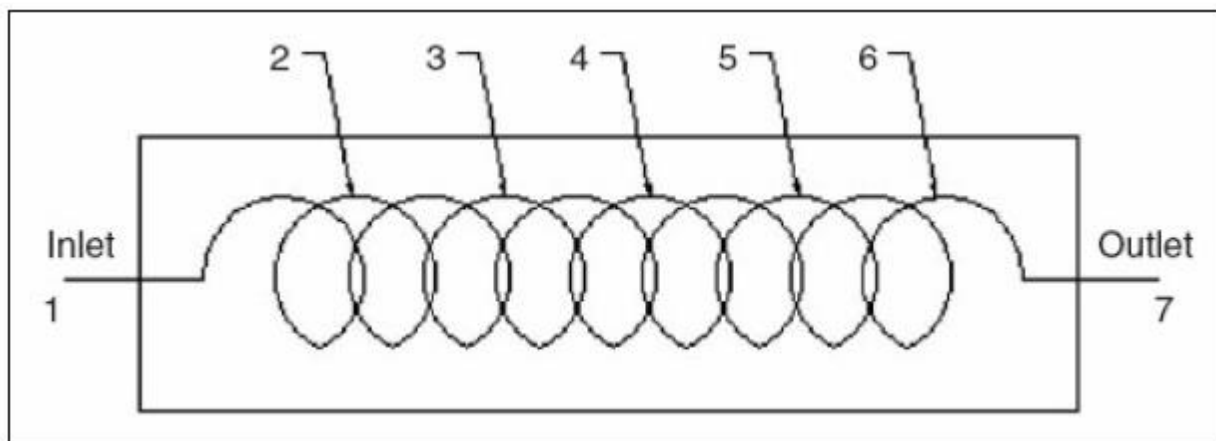
Ο ηλιακός συλλέκτης αυτού του τύπου αποτελείται από έναν γυάλινο σωλήνα, ο οποίος λειτουργεί ως δέκτης της ηλιακής ακτινοβολίας και από ένα μεταλλικό σωλήνα, στο εσωτερικό του οποίου ρέει το νερό και ο οποίος παίζει το ρόλο του συλλέκτη.

Ο γυάλινος σωλήνας έχει εξωτερική διάμετρο 0.14 m, πάχος 6 mm και μήκος 0.8 m. Τα δύο άκρα του κλείνονται αεροστεγώς με διαφανείς φλάντζες, έτσι ώστε να δημιουργηθεί κενό, το οποίο είναι απαραίτητο για την αποφυγή δημιουργίας ατμών κατά τη θέρμανση του νερού. Η επιλογή του γυαλιού ως υλικό κατασκευής του σωλήνα δικαιολογείται από την μέγιστη απορροφητικότητα που το χαρακτηρίζει, καθώς επίσης και από την ελάχιστη αντανάκλαστικότητά του, βελτιώνοντας κατά πολύ την θερμική απόδοση του συλλέκτη. Ο μεταλλικός σωλήνας είναι σπειροειδούς σχήματος, εξωτερικής διαμέτρου 3.175mm και εσωτερικής 2.0 mm. Για τη μέγιστη δυνατή απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας, ο σωλήνας βάφεται μαύρος. Κατά μήκος του σωλήνα τοποθετούνται επτά θερμοζεύγη για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του νερού, το οποίο ρέει στο εσωτερικό του.

Σχηματικά, ο συλλέκτης αυτός παρουσιάζεται στα σχήματα 2.6 και 2.7.

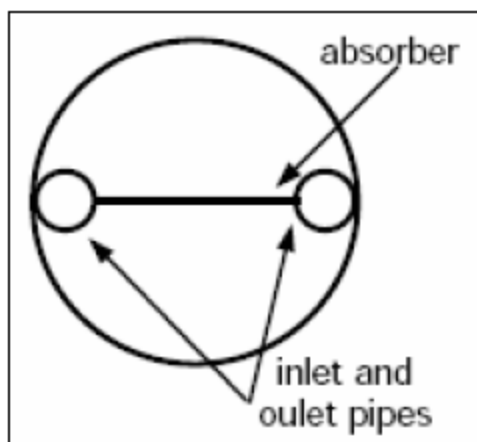


Σχήμα 2.6 : Ομόκεντρος σωλήνας εισόδου – εξόδου



Σχήμα 2.7 : Σχηματική απεικόνιση ομόκεντρου σωλήνα εισόδου – εξόδου

### 2.3.2.1.2 ΞΕΧΩΡΙΣΤΟΙ ΣΩΛΗΝΕΣ ΕΙΣΟΔΟΥ-ΕΞΟΔΟΥ (ΓΥΑΛΙ-ΜΕΤΑΛΛΟ)



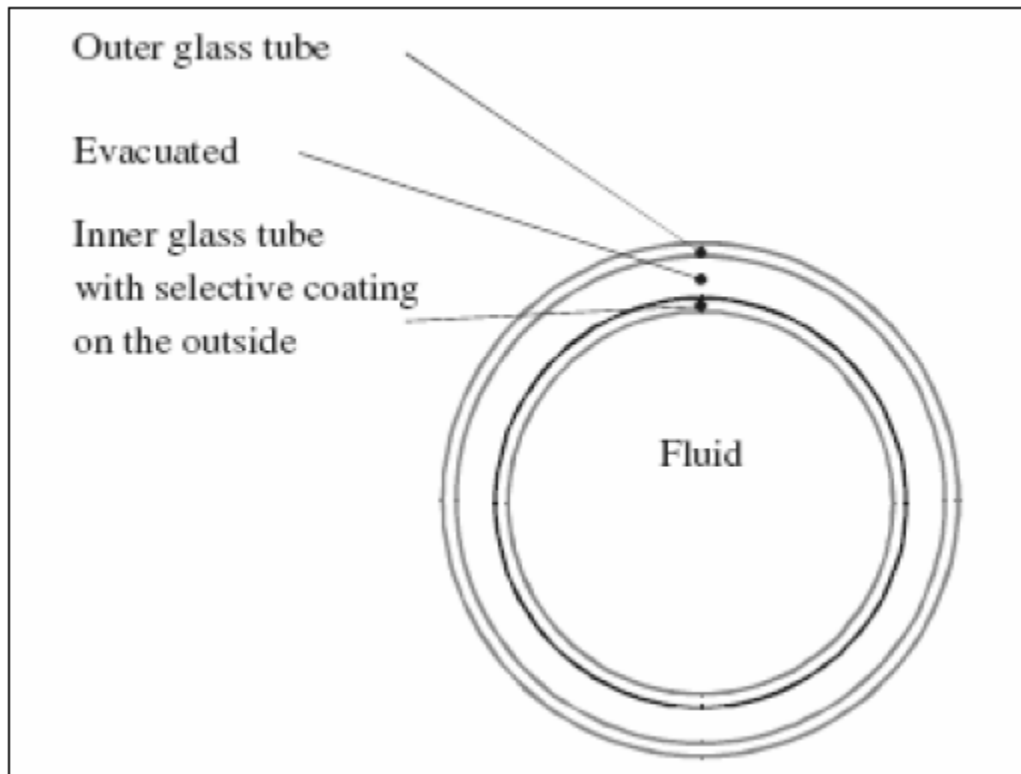
Σχήμα 2.7 : Ξεχωριστοί σωλήνες εισόδου - εξόδου

Αυτό είναι το συνηθισμένο είδος σωλήνων κενού. Ο απορροφητής μπορεί να είναι είτε επίπεδος είτε κοίλος. Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, ο βαθμός απόδοσής τους μπορεί να είναι υψηλός, αλλά υπάρχει πάντα ο κίνδυνος του κενού.

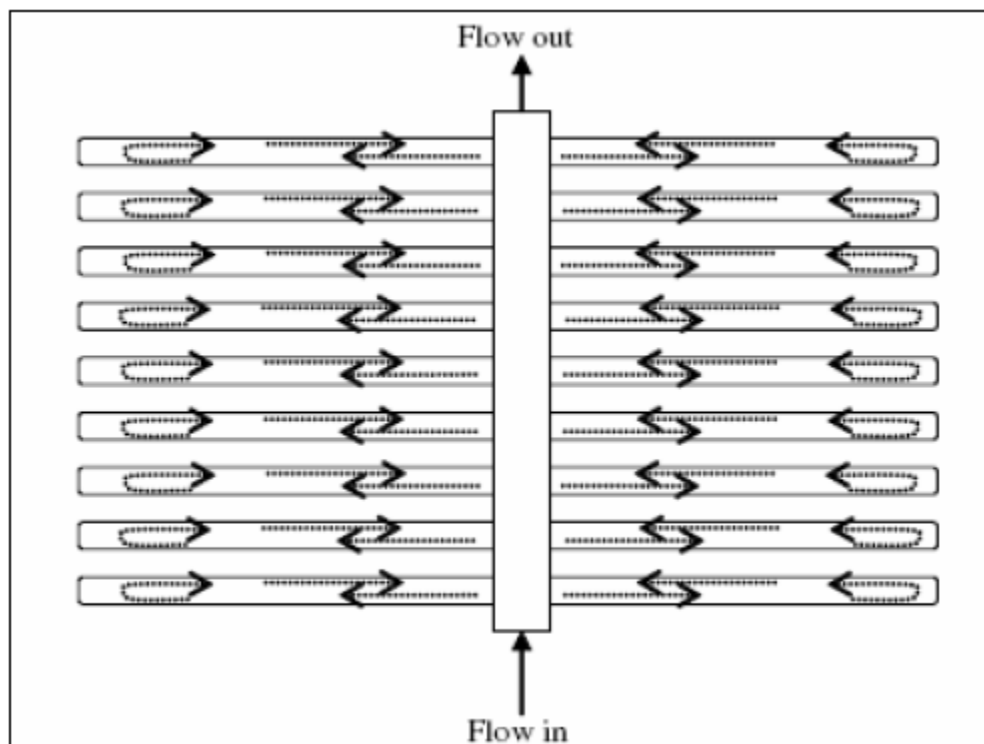
### 2.3.2.1.3 ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ ΤΥΠΟΥ ΣΙΔΝΕΪ (ΓΥΑΛΙ – ΓΥΑΛΙ)

Οι ηλιακοί συλλέκτες τύπου Σίδνεϊ χρησιμοποιούνται συχνά στην παγκόσμια αγορά. Αν και δεν είναι τόσο αποτελεσματικοί όσο τα δύο προαναφερθέντα είδη σωλήνων κενού, είναι πιο φθηνοί και πιο αξιόπιστοι σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών. Εξαιτίας της μορφολογίας τους, τα χαρακτηριστικά της ροής του εργαζόμενου μέσου καθώς επίσης και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του συλλέκτη είναι υψίστης σημασίας για την θερμική του απόδοση.

Αυτός ο συλλέκτης αποτελείται από δύο γυάλινους σωλήνες (ο ένας μέσα στον άλλον), των οποίων τα άκρα είναι ενωμένα. Ο εσωτερικός σωλήνας είναι επικαλυμμένος με κυλινδρικό μεταλλικό απορροφητή. Το είδος αυτό δεν είναι τόσο αποτελεσματικό όσο τα άλλα δύο, αλλά είναι φθηνότερο και πιο αξιόπιστο. Επιπρόσθετα, σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών υπερτερεί σε σύγκριση με τα δύο προαναφερθέντα. Μερικές φορές, τοποθετείται και ένας ανακλαστής στο πίσω μέρος των σωλήνων, έτσι ώστε να αυξηθεί η απορροφώμενη ποσότητα ηλιακής ακτινοβολίας.



Σχήμα 2.8 : Τυπικός συλλέκτης τύπου Σίδνεϊ



Σχήμα 2.9 : Σχηματική απεικόνιση ροής του ρευστού διαμέσω συλλέκτη Σίδνεϊ



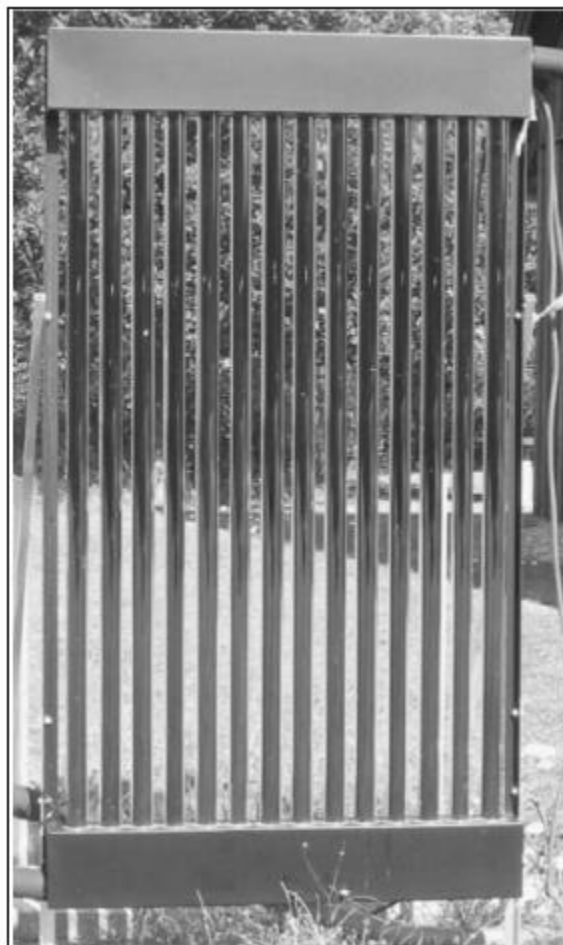
Σχήμα 2.10 : Συλλέκτης τύπου Σίδνεϊ

#### 2.3.2.1.4 ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΣ ΣΥΛΛΕΚΤΗΣ ΤΥΠΟΥ ΣΙΔΝΕΪ

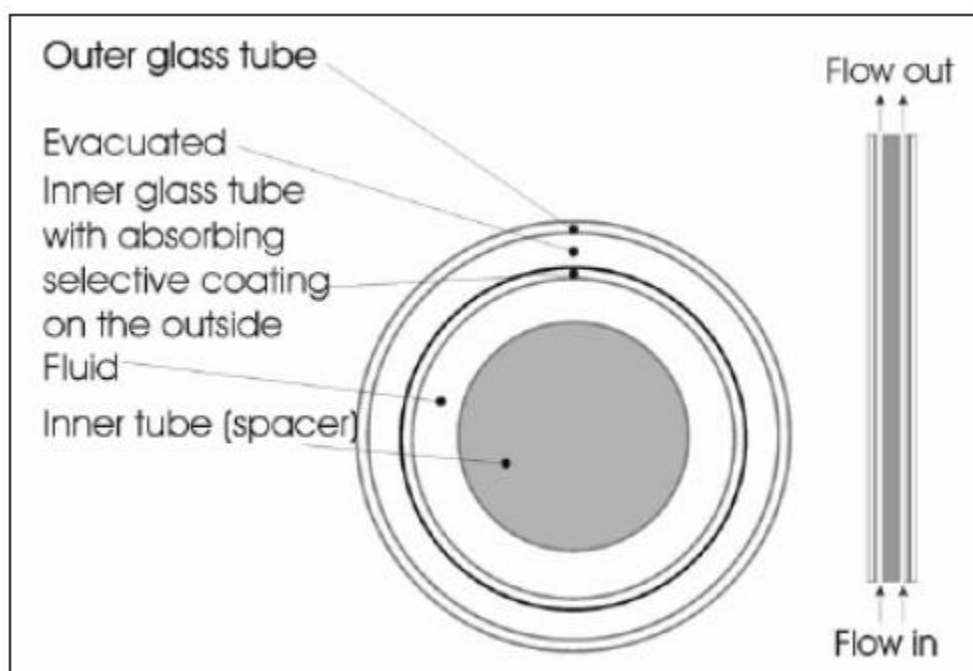
Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστεί ένας συλλέκτης τύπου Σίδνεϊ του οποίου το κύριο χαρακτηριστικό είναι η κατακόρυφη τοποθέτηση. Τα στοιχεία που επηρεάζουν το βαθμό απόδοσής του είναι η απόσταση μεταξύ των σωλήνων και η γωνία αζιμουθίου, τα οποία και θα μελετηθούν περαιτέρω στη συνέχεια. [16]

Ο συλλέκτης αυτός αποτελείται από 14 σωλήνες κενού, οι οποίοι είναι διατεταγμένοι παράλληλα και τα άκρα των οποίων συνδέονται σε δύο κεντρικούς σωλήνες. Όπως προείπαμε και στην προηγούμενη ενότητα, οι συλλέκτες τύπου Σίδνεϊ είναι δύο γυάλινοι σωλήνες, ο ένας μέσα στον άλλον. Στην προκειμένη περίπτωση, στο εσωτερικό του εσωτερικού σωλήνα τοποθετείται ένας συμπαγής σωλήνας, έτσι ώστε να απαιτείται λιγότερο εργαζόμενο μέσο. Επιπλέον, διασφαλίζει μεγαλύτερο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας. Ο συλλέκτης είναι τοποθετημένος κατακόρυφα και προσανατολισμένος προς το Νότο.

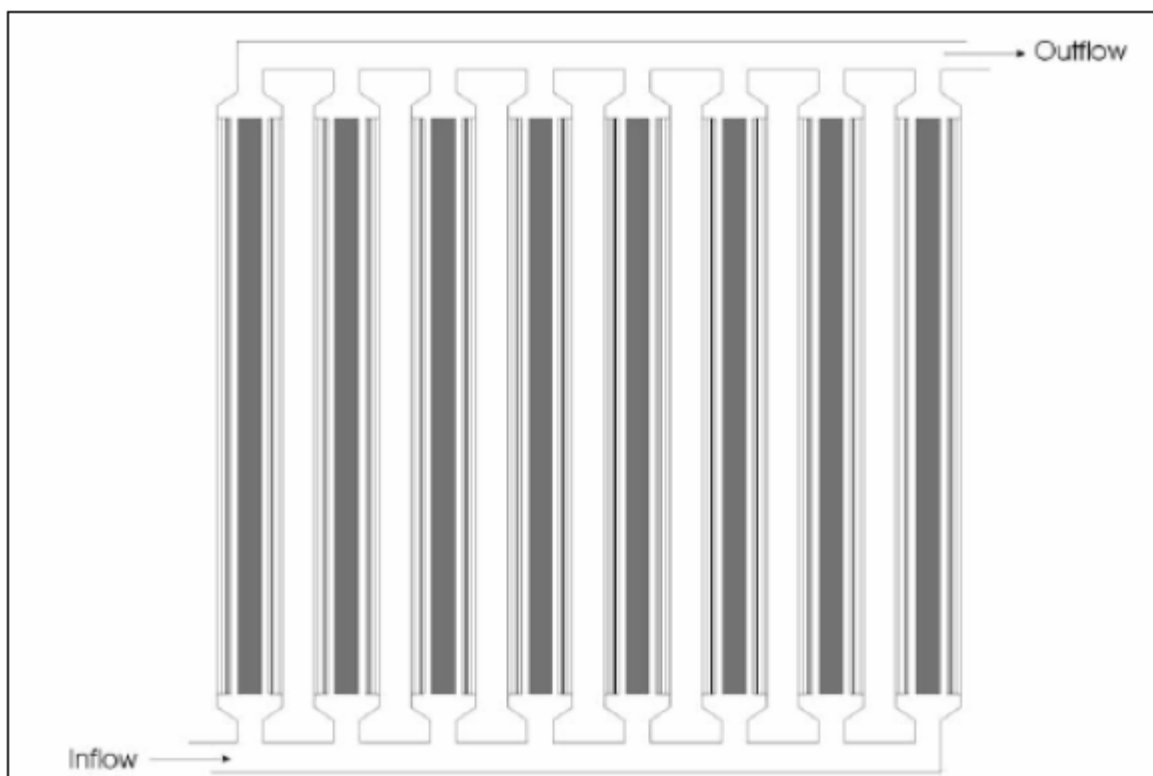




Σχήμα 2.11 : Κατακόρυφος συλλέκτης τύπου Σίδνεϊ



Σχήμα 2.12 : Τομή κατακόρυφου συλλέκτη τύπου Σίδνεϊ



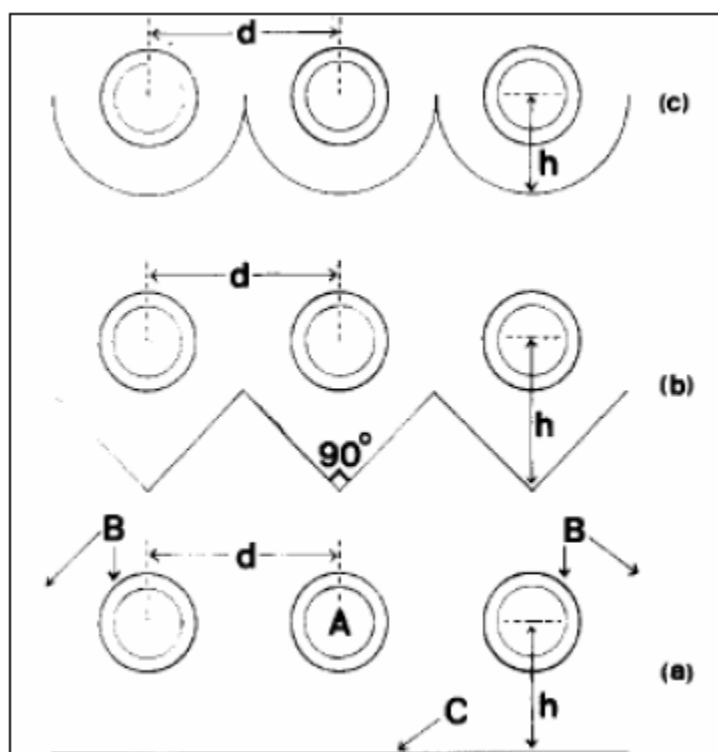
Σχήμα 2.13 : Σχηματική απεικόνιση ροής του ρευστού διαμέσω των σωλήνων κενού

### 2.3.2.1.5 ΣΥΛΛΕΚΤΗΣ ΤΥΠΟΥ ΣΙΔΝΕΪ ΜΕ ΑΝΑΚΛΑΣΤΗ

Οι σύγχρονοι σωλήνες κενού συνήθως συνοδεύονται από έναν ανακλαστή, ο οποίος είναι τοποθετημένος στο πίσω μέρος του συλλέκτη, έτσι ώστε να γίνεται πλήρης εκμετάλλευση της απορροφητικής επιφάνειας, συνέπεια του οποίου είναι να αυξάνεται ο βαθμός απόδοσης του συλλέκτη. Υπάρχουν διάφορα είδη ανακλαστών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Τα πιο διαδεδομένα είναι τα κατοπτρικά, τα διάχυτα και τα επίπεδα. Στην παρούσα ενότητα, θα μελετηθούν περαιτέρω τρία είδη κατόπτρων: ένα επίπεδο, ένα τριγωνικό και ένα ημικυκλικό.

Οι συλλέκτες αυτού του τύπου αποτελούνται από εσωτερικούς σωλήνες διαμέτρου 22mm και πάχους 1.8mm και εξωτερικούς σωλήνες διαμέτρου 30mm και πάχους 1.4mm. Τα μήκη των σωλήνων είναι περίπου 1.4m. Ο συντελεστής απορροφητικότητας είναι 0.92 για μη επικαλυμμένους σωλήνες, 0.80 για επικαλυμμένους με απλή λευκή μπογιά και 0.88 για γυαλιστερή λευκή μπογιά.

Σχηματικά, οι συλλέκτες αυτοί φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:



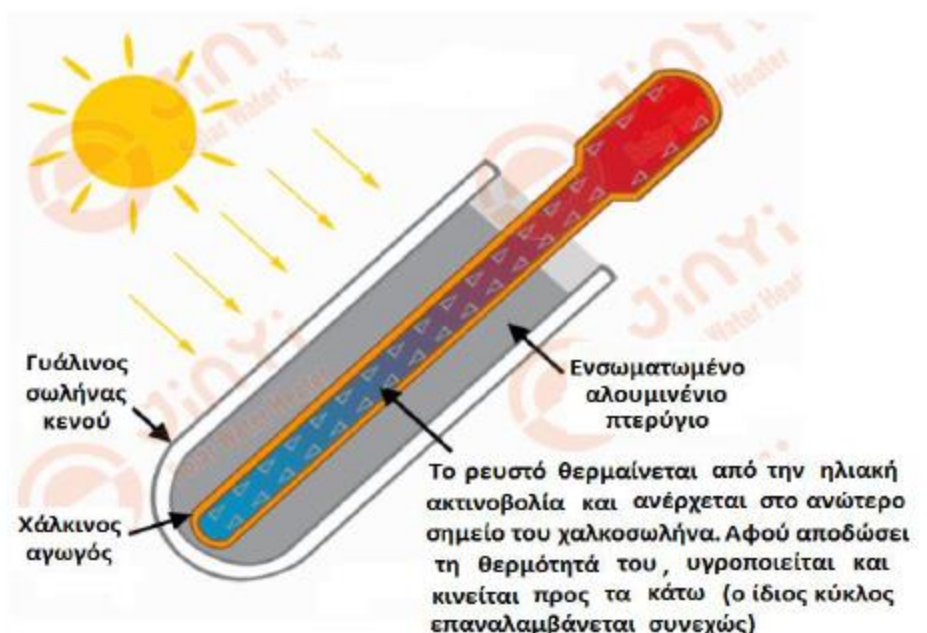
Σχήμα 2.14 :Συλλέκτες τύπου Σίδνεϊ με ανακλαστή

### 2.3.2.2 ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ

Στους ηλιακούς συλλέκτες αυτού του τύπου καθένας από τους σωλήνες περιέχει κλειστό χάλκινο απορροφητικό σωλήνα επικαλυμμένο με επιλεκτική βαφή μέσα στο οποίο περιέχεται συνήθως ποσότητα ανόργανου μίγματος με χαμηλό σημείο ζέσεως (συνήθως γλυκόλη ή ακετόλη) που έχει τη δυνατότητα να εξατμίζεται σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες 25-30°C. Ορισμένες φορές χρησιμοποιείται και νερό ως εργαζόμενο μέσο. Ωστόσο η γλυκόλη ή ακετόνη δίνει στο σύστημα τη δυνατότητα να λειτουργεί σε ψυχρά κλίματα χωρίς κίνδυνο φραξίματος ή σπασίματος από τη δημιουργία πάγου.

Ο χάλκινος θερμαντικός αυλός ξεκινά μέσα από τον αεροστεγή σωλήνα καταλήγοντας στην άκρη του (συμπυκνωτής), η οποία είναι ταπωμένη μέσα σε ένα μονωμένο αυλό. Η ηλιακή ακτινοβολία εισέρχεται διαμέσου του εξωτερικού γυάλινου αγωγού, προσπίπτει στον απορροφητικό σωλήνα και θερμαίνει το ρευστό το οποίο φτάνει σε κατάσταση βρασμού και μετατρέπεται σε ατμό. Ο ατμός ανεβαίνει στο υψηλότερο σημείο του χαλκοσωλήνα (συμπυκνωτής) όπου έρχεται σε επαφή με το ψυχρό νερό του εναλλάκτη (που βρίσκεται στο πάνω μέρος του συλλέκτη), αποδίδει την ενέργειά του, ψύχεται, υγροποιείται και κινείται πάλι προς

τα κάτω . Όσο οι θερμικοί σωλήνες δέχονται ακτινοβολία το φαινόμενο αυτό επαναλαμβάνεται με συνεχόμενο τρόπο.



Σχήμα 2.15 : Τομή θερμικού σωλήνα



Σχήμα 2.16 : Θερμικός σωλήνας του εμπορίου

Οι συλλέκτες κενού θερμικών σωλήνων πλεονεκτούν έναντι των άμεσης ροής κυρίως επειδή ο κάθε σωλήνας κενού είναι ένα κλειστό ανεξάρτητο κύκλωμα. Αυτό σημαίνει ότι σε περίπτωση βλάβης ενός σωλήνα υπάρχει δυνατότητα εύκολης αντικατάστασής του.

Σε αυτό το είδος συλλέκτη, ο θερμικός σωλήνας είναι ρηχός και λειτουργεί υπό κενό όπως και στην προηγούμενη περίπτωση. Η διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι το κενό δεν διαδραματίζει μονωτικό ρόλο αλλά βοηθά στην αλλαγή φάσης του εργαζόμενου

μέσου. Αναλυτικότερα, η μικρή ποσότητα νερού (αναμεμειγμένη με διάφορες προσμίξεις) που υπάρχει στον θερμικό σωλήνα επέρχεται σε κατάσταση βρασμού στους 30 °C εξαιτίας του κενού, εξατμίζεται και μετακινείται στο πάνω μέρος του σωλήνα, μεταφέροντας θερμότητα στον συμπυκνωτή. Μεταδίδοντας την θερμότητα στον συμπυκνωτή, επανέρχεται στην υγρή κατάσταση και επιστρέφει στο κάτω μέρος του σωλήνα, οπότε και η διαδικασία ξεκινά εκ νέου.

Ένα πλεονέκτημα του συλλέκτη αυτού είναι η στεγνή σύνδεση του απορροφητή με τον κεντρικό σωλήνα. Κατά αυτόν τον τρόπο, η εγκατάσταση γίνεται ευκολότερη και κάθε σωλήνας μπορεί να αντικατασταθεί, χωρίς να χρειάζεται να αδειάσει όλο το σύστημα από το εργαζόμενο μέσο.

Μειονεκτεί ωστόσο στο γεγονός ότι είναι αναγκαίο να τοποθετείται υπό κλίση 250 έτσι ώστε να είναι δυνατή η ροή του νερού προς το κάτω μέρος του συλλέκτη. [14]

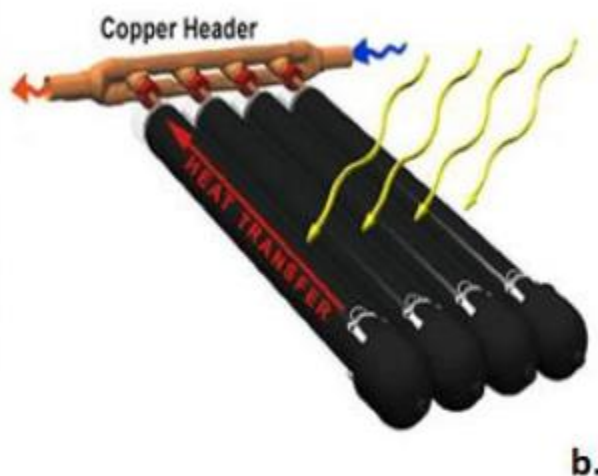
Με κριτήριο τη σύνδεση των θερμικών σωλήνων με τον εναλλάκτη διακρίνουμε τους συλλέκτες θερμικών σωλήνων σε :

#### Υγρής σύνδεσης:

Σε αυτόν τον τύπο οι συμπυκνωτές των θερμικών σωλήνων βρίσκονται μέσα στον αγωγό που κυκλοφορεί το προς θέρμανση νερό. Αυτό σημαίνει ότι αν κάποιος σωλήνας κενού πρέπει να αντικατασταθεί απαιτείται άδειασμα του κυκλώματος του εναλλάκτη.

#### Ξηρής σύνδεσης:

Σε αυτόν τον τύπο οι συμπυκνωτές των θερμικών σωλήνων βρίσκονται εξωτερικά σε επαφή με τον αγωγό του προς θέρμανση νερού. Επομένως αν κάποιος σωλήνας κενού πρέπει να αντικατασταθεί δεν απαιτείται άδειασμα του κυκλώματος του εναλλάκτη. [17]

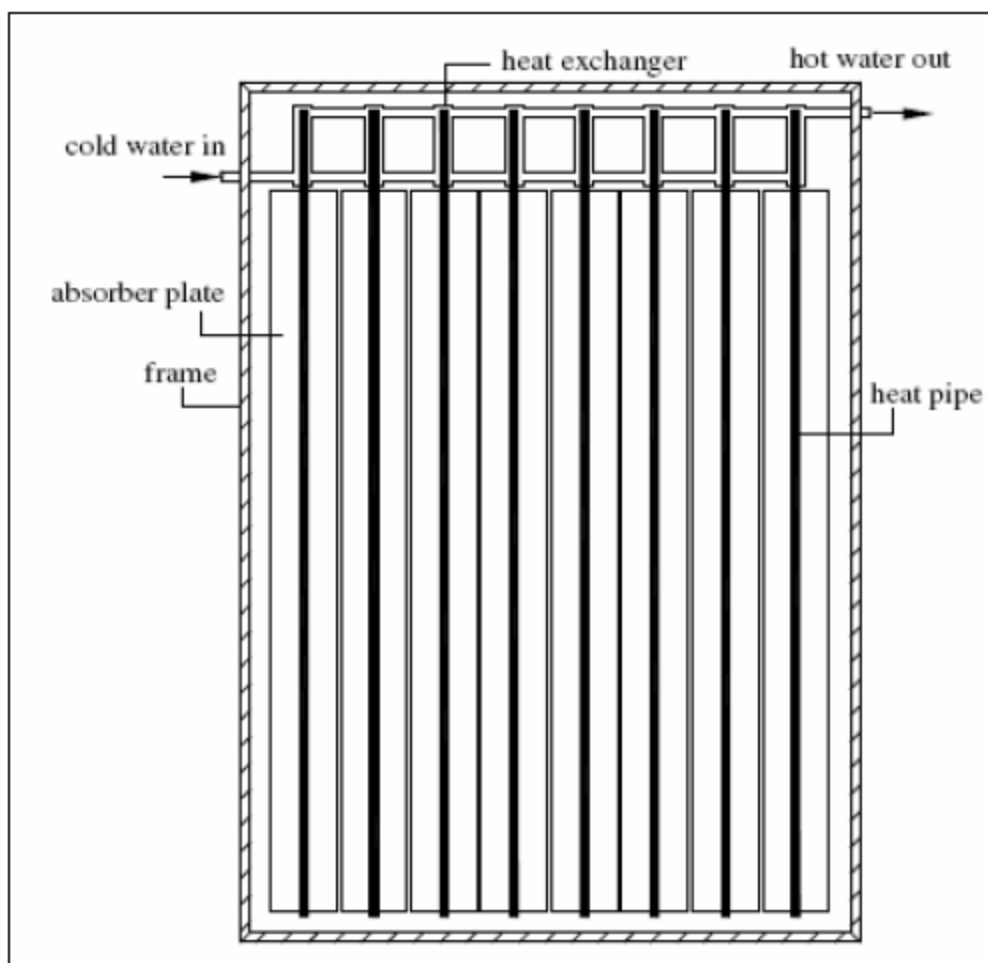


Πηγή : [www.enforce-een.eu](http://www.enforce-een.eu)

Πηγή : [www.ecobuilding-club.net](http://www.ecobuilding-club.net)

Σχήμα 2.17 : Θερμικοί σωλήνες υγρής σύνδεσης (α.) , Θερμικοί σωλήνες ξηρής σύνδεσης (β.)

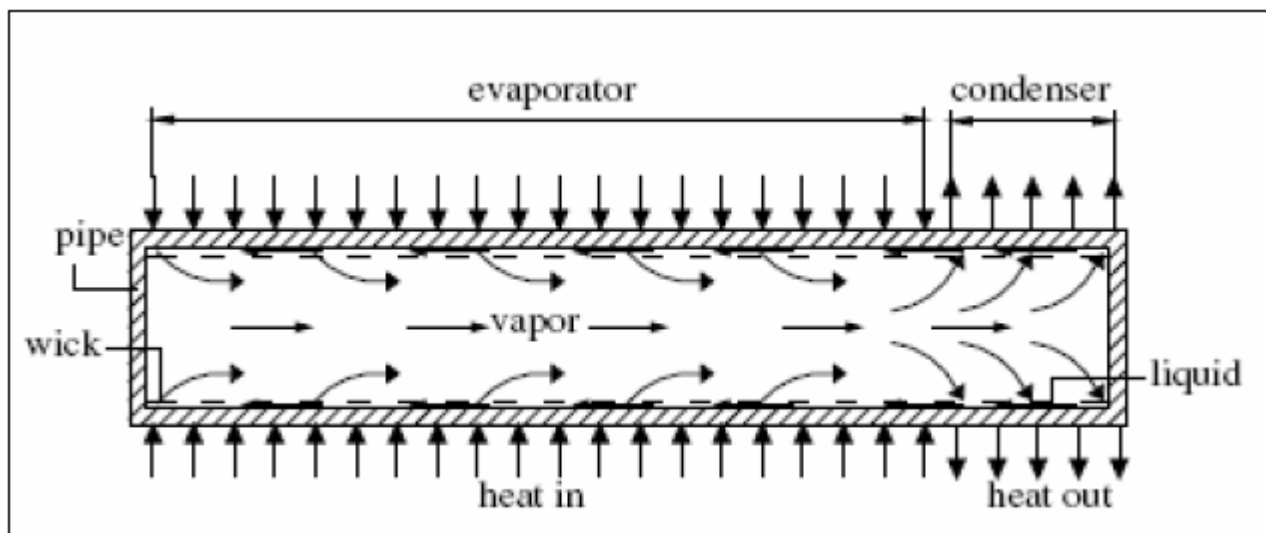
Η λειτουργία του τυπικού συλλέκτη βασίζεται στην προαναφερθείσα διαδικασία της εξάτμισης – συμπύκνωσης του εργαζόμενου μέσου και η οποία συντελείται με τη βοήθεια της βαρύτητας. Οι συλλέκτες θερμικών σωλήνων υπερτερούν έναντι των συλλεκτών άμεσης ροής στο ότι δεν παρουσιάζουν διάβρωση των μερών τους (εξαιτίας της στεγνής σύνδεσής τους) και στην εναλλαξιμότητά τους. Με άλλα λόγια, όταν ένας συλλέκτης αποχρήσει, είναι πολύ εύκολη η αντικατάστασή του και δεν απαιτεί διακοπή της λειτουργίας του συλλέκτη. [18]



Σχήμα 2.18 : Συλλέκτης με έξι θερμικούς σωλήνες

Στο σχήμα 2.18 φαίνεται ένας συλλέκτης, ο οποίος αποτελείται από έξι θερμικούς σωλήνες, εξωτερικής διαμέτρου 12.7 mm και συνολικού μήκους 1850 mm (το μήκος του εξατμιστή είναι 1550 mm, ενώ του συμπυκνωτή 300 mm). Επιπρόσθετα, το βήμα μεταξύ των θερμικών σωλήνων είναι 160 mm και το απορροφητικό πιάτο βάφεται μαύρο για τη μέγιστη απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας. [19]

Το σχήμα 2.19 απεικονίζει ένα μεμονωμένο θερμικό σωλήνα και την αρχή λειτουργίας του.



Σχήμα 2.19 : Αρχή λειτουργίας μεμονωμένου θερμικού σωλήνα

### 2.3.2.2.1 ΘΕΡΜΙΚΟΣ ΣΩΛΗΝΑΣ ΛΕΠΤΗΣ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται ένας συλλέκτης λεπτής μεμβράνης, ο οποίος αναμένεται να παρουσιάσει μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης από τον τυπικό, καθώς επίσης και χαμηλότερο κόστος κατασκευής.

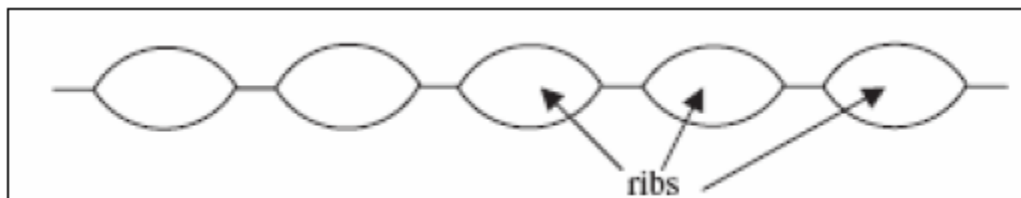
Ο συλλέκτης αυτού του τύπου (σχήμα 2.20 & 2.22) αποτελείται από έναν απορροφητή, ένα δοχείο συγκέντρωσης στο κάτω μέρος του και τον συμπυκνωτή στο πάνω μέρος του. Ένας μονωτικός μικροπορώδης δίσκος τοποθετείται στο πίσω μέρος του απορροφητή έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται οι θερμικές απώλειες.

Η διαφορά του από τον τυπικό θερμικό σωλήνα έγκειται στο γεγονός ότι το κύριο τμήμα του συλλέκτη αποτελείται από δυο δίσκους, οι οποίοι διαχωρίζονται από ένα λεπτό κενό εξάτμισης. Οι δυο δίσκοι είναι τοπικά συγκολλημένοι μεταξύ τους κατά όλο το μήκος του απορροφητή, δημιουργώντας κατά αυτόν τον τρόπο ένα δίκτυο μικροσκοπικών θερμικών σωλήνων που συνδέουν το τμήμα εξάτμισης με το τμήμα συμπύκνωσης (σχήμα 2.21).

Επειδή ο απορροφητής και οι επιμέρους θερμικοί σωλήνες είναι κατασκευασμένοι από το ίδιο υλικό, το κόστος του συλλέκτη αυτού είναι αρκετά μειωμένο. Επίσης, ο χώρος μεταξύ του καλύμματος και του απορροφητή είναι πλήρως μονωμένος, συνέπεια του οποίου είναι οι απώλειες να θεωρούνται μηδαμινές.

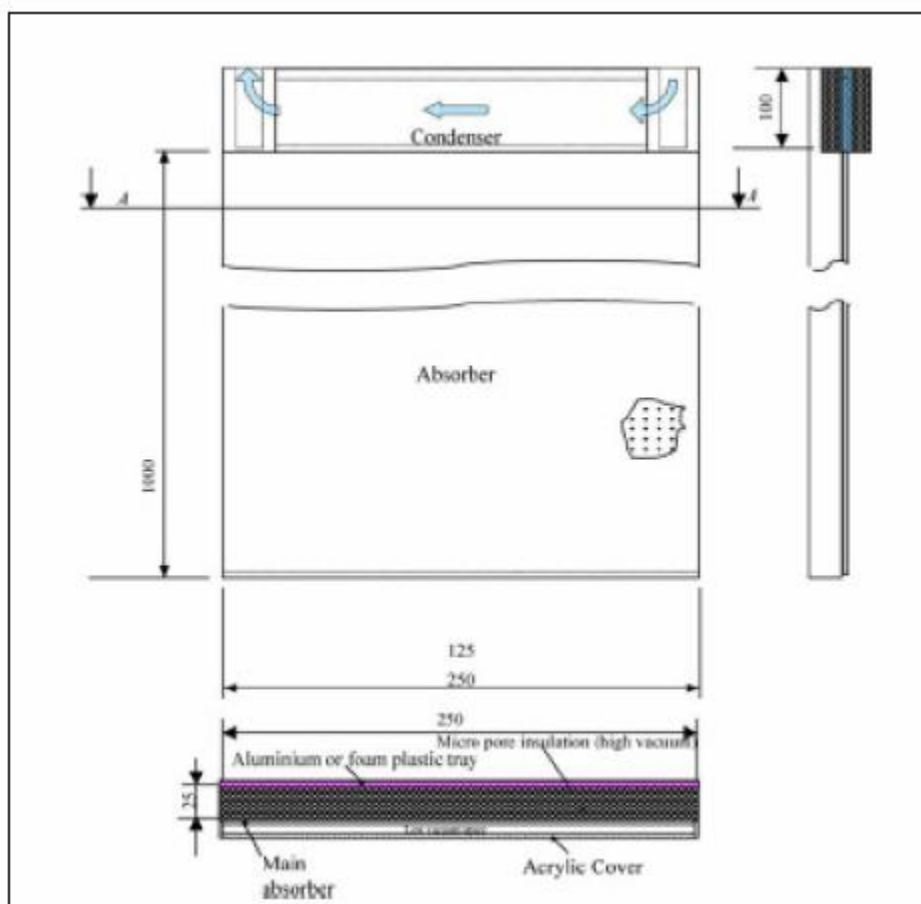


Σχήμα 2.20 : Θερμικός σωλήνας λεπτής μεμβράνης



Σχήμα 2.21 : Δίκτυο μικροσκοπικών θερμικών σωλήνων





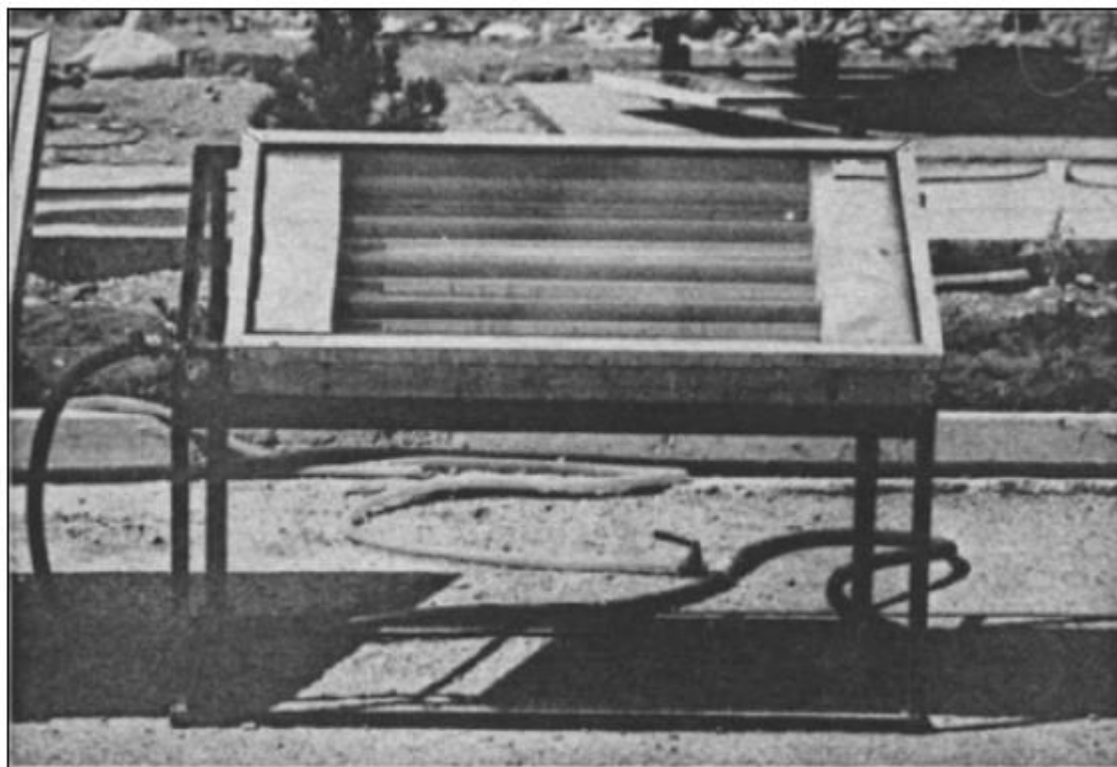
Σχήμα 2.22 : Σχηματική απεικόνιση σωλήνα λεπτής μεμβράνης

### 2.3.2.2.2 ΟΜΟΑΞΟΝΙΚΟΣ ΘΕΡΜΙΚΟΣ ΣΩΛΗΝΑΣ

Ο ομοαξονικός θερμικός σωλήνας παρουσιάζει τα παρακάτω πλεονεκτήματα:

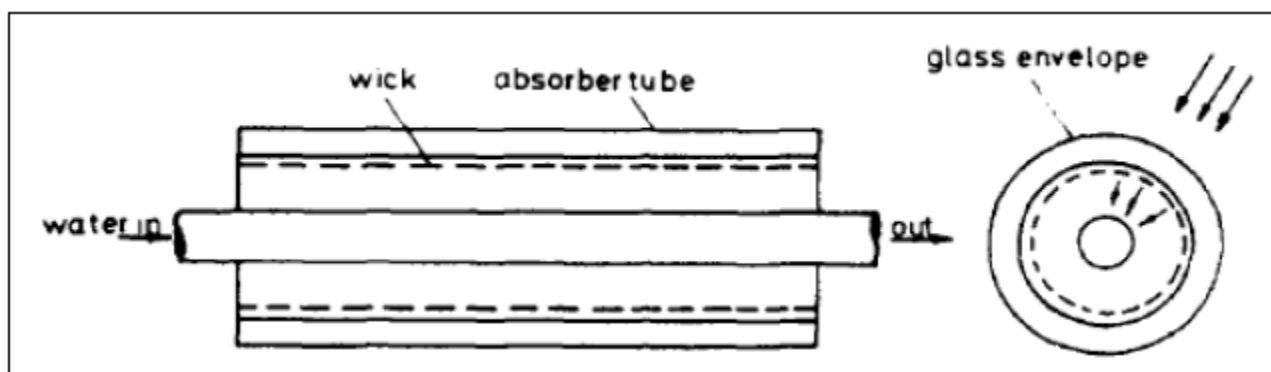
- Μπορεί να απορροφήσει μικρής ροής ενέργεια, πάνω σε σχετικά μεγάλη επιφάνεια, ενώ αντιθέτως να την απάγει σε μικρή επιφάνεια.
- Μπορεί να σχεδιαστεί κατά τρόπο ο οποίος να ευνοεί τη μεταφορά θερμότητας από τον εξατμιστή στον απορροφητή.
- Είναι ανεξάρτητος της γωνίας κλίσης του, λόγω του κυκλικού σχήματος του απορροφητή, συνέπεια του οποίου είναι να μπορεί να εγκατασταθεί από οριζόντια έως και κατακόρυφη θέση.

Ο συλλέκτης αυτός αποτελείται από δύο σωλήνες διαφορετικής διαμέτρου, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι ο ένας στο εσωτερικό του άλλου κατά ομοαξονικό τρόπο.



Σχήμα 2.23 : Ομοαξονικός θερμικός σωλήνας

Το εργαζόμενο μέσο (νερό) βρίσκεται στο εσωτερικό του εξωτερικού σωλήνα, η εξωτερική επιφάνεια του οποίου βάφεται μαύρη για τη μεγιστοποίηση της απορροφούμενης ηλιακής ακτινοβολίας.



Σχήμα 2.24 : Τομή ομοαξονικού θερμικού σωλήνα

Η ηλιακή ακτινοβολία λαμβάνεται από την εξωτερική επιφάνεια του εξωτερικού σωλήνα (εξατμιστής), προκαλώντας την εξάτμιση του εργαζόμενου μέσου. Ο ατμός που δημιουργείται, ρέει ακτινικά προς την εξωτερική επιφάνεια του εσωτερικού σωλήνα, όπου και συμπυκνώνεται. Κατά αυτόν τον τρόπο μεταφέρει λανθάνουσα

θερμότητα στο κρύο εργαζόμενο μέσο, που ρέει στο εσωτερικό του μικρού εσωτερικού σωλήνα. Το συμπύκνωμα οδηγείται, λόγω βαρύτητας, στο κάτω μέρος του εξωτερικού μεγάλου σωλήνα και από εκεί, με τη βοήθεια της άνωσης, κατευθύνεται στο τμήμα της εξάτμισης όπου και η διαδικασία ξεκινά εκ νέου. [20]

Οι συλλέκτες κενού που συχνά συνδυάζονται με ανακλαστικές επιφάνειες συγκέντρωσης του ηλίου, αποτελούν μια ιδιαίτερα ανταγωνιστική τεχνολογία έναντι των κλασικών επίπεδων ηλιακών συλλεκτών. Τα κύρια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους συνοψίζονται παρακάτω :

- Οι συνθήκες κενού στο εξωτερικό τμήμα κάθε σωλήνα ελαχιστοποιούν τις θερμικές απώλειες συναγωγής και προστατεύουν την απορροφητική πλάκα και το θερμοσωλήνα από τις εξωτερικές συνθήκες υγρασίας που προκαλούν αλλοίωση των εσωτερικών υλικών του συλλέκτη.
- Οι σωλήνες κενού είναι κυλινδρικοί με αποτέλεσμα οι ακτίνες του ηλίου να πέφτουν κάθετα καθ' όλη την διάρκεια της ημέρας και όχι μόνο το μεσημέρι όπως συμβαίνει στους επίπεδους συμβατικούς συλλέκτες. [21]
- Η κλίση των σωλήνων κενού μπορεί να είναι από 20 έως 80 μοίρες, λύνοντας έτσι προβλήματα αισθητικής ή δυσκολίας τοποθέτησης όπως συμβαίνει με τους συμβατικούς συλλέκτες.
- Λόγω του κλειστού κυκλώματος και της μικρής ποσότητας νερού που περνάει μέσα από τον εναλλάκτη μειώνουμε την ισχύ των κυκλοφορητών με αποτέλεσμα χαμηλότερο λειτουργικό κόστος.

- Κύριο μειονέκτημα τους είναι ότι παρουσιάζουν κατασκευαστικές δυσκολίες λόγω της υποπίεσης που πρέπει να δημιουργηθεί και της συνεργασίας που πρέπει να επιτευχθεί μεταξύ διαφορετικών υλικών στη θέρμανση και ψύξη. Αυτό εξηγεί και το υψηλότερο κόστος κατασκευής τους.

Ωστόσο, οι συλλέκτες κενού βρίσκουν σημαντική εφαρμογή σε Βόρειες χώρες με μικρή ηλιοφάνεια και χαμηλές θερμοκρασίες καθώς η αποδοτικότητα των επίπεδων συλλεκτών μειώνεται ραγδαία όταν δεν επικρατούν ιδανικές συνθήκες. Διεθνείς μετρήσεις ενεργειακής απόδοσης του συλλέκτη δείχνουν ότι αποδίδει περίπου 35% περισσότερη ενέργεια από καλού επιπέδου συμβατικούς συλλέκτες. [22]

## 2.4 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΗΛΙΑΚΗΣ ΨΥΞΗΣ

### 2.4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ήδη από το 2010 η Ευρωπαϊκή Επιτροπή εξέδωσε την ανακοίνωση «Ενέργεια 2020» που καθορίζει μια νέα στρατηγική προς το 2020 για μία ανταγωνιστική, αειφόρο και ασφαλή ενέργεια. Προτεραιότητα δίνεται κυρίως στα κτήρια καθώς η κατανάλωση ενέργειας στις οικίες και στα εμπορικά κτήρια καταλαμβάνει το 40% του ενεργειακού προϋπολογισμού της Ευρώπης. Με δεδομένη την ανάγκη εξοικονόμησης ενέργειας η Ευρωπαϊκή Ένωση μέσω οδηγιών για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτηρίων τόνισε τη συμβολή των ηλιακών θερμικών εγκαταστάσεων για εξοικονόμηση ενέργειας στα κτήρια. Πολύ γρήγορα προωθήθηκαν οι ηλιακές θερμικές εγκαταστάσεις σε πολλές χώρες της Ευρώπης κυρίως για την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης ενώ σε κάποιες από αυτές συνίσταται υποχρεωτικά στην κατασκευή νέων κτηρίων.

Μελλοντικός στόχος της Ευρωπαϊκής Ένωσης αποτελεί η εγκατάσταση ηλιακών θερμικών συστημάτων στο κτηριακό τομέα τόσο για παραγωγή ζεστού νερού χρήσης όσο και για θέρμανση-ψύξη, καθώς τα συνδυασμένα αυτά συστήματα θα καθιστούν αυτόνομο ενεργειακά το κτήριο.

Στην παρούσα εργασία θα αναλυθεί η τεχνολογία της ηλιακής ψύξης αυτόνομα καθώς στην Ελλάδα παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον η προοπτική ανάπτυξής της. Αυτό προκύπτει λόγω του ότι η ανάγκη ενός κτηρίου για ψύξη έρχεται τους καλοκαιρινούς μήνες όπου η ηλιακή ακτινοβολία προσφέρει ιδανικές ευκαιρίες για χρήση ηλιακά καθοδηγούμενων συστημάτων για ψύξη. Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται το ετήσιο ηλιακό δυναμικό για την Ελλάδα.

### 2.4.2 ΠΑΘΗΤΙΚΑ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΗΤΙΚΑ ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Η επίτευξη της θέρμανσης και της ψύξης κτηρίων μέσω της εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας μπορεί να επιτευχθεί με δύο τρόπους: χρήση παθητικών ηλιακών συστημάτων και χρήση ενεργητικών ηλιακών συστημάτων.

#### 2.4.2.1 ΕΝΕΡΓΗΤΙΚΑ ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Στα ενεργητικά ηλιακά συστήματα η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας γίνεται με χρήση μηχανικού εξοπλισμού με σκοπό τη μετατροπή της σε χρήσιμη θερμική ή ηλεκτρική ενέργεια. Για τη παραγωγή θερμικής ενέργειας χρησιμοποιούνται οι ηλιακοί συλλέκτες όπως αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 2, ενώ για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται τα φωτοβολταϊκά στοιχεία. Συγκεκριμένα για την ηλιακή ψύξη απαιτείται ένας συνδυασμός μηχανικού εξοπλισμού έτσι ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα.

### 2.4.2.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΗΛΙΑΚΗΣ ΨΥΞΗΣ

Η ηλιακή ψύξη μπορεί να επιτευχθεί με δύο βασικούς τρόπους: Με συλλογή της ηλιακής ακτινοβολίας μέσω ηλιακών συλλεκτών και αξιοποίηση της θερμικής ενέργειας για παραγωγή ψύξης και με χρήση φωτοβολταϊκών συστημάτων για μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική και μετέπειτα καθοδήγηση ηλεκτροκίνητου μέσου.

Γενικά τα θερμικά καθοδηγούμενα συστήματα ψύξης ταξινομούνται σε δύο βασικές κατηγορίες :

☒ Κλειστά συστήματα: Ονομάζονται οι θερμοκίνητοι ψύκτες οι οποίοι παρέχουν ψυχρό νερό και χρησιμοποιούνται στις κεντρικές κλιματικές μονάδες για παροχή κλιματισμένου αέρα ή μέσω δικτύου ψυχρού νερού στις τοπικές κλιματιστικές μονάδες ενός χώρου. Στα κλειστά συστήματα περιλαμβάνονται οι ψύκτες απορρόφησης που αποτελούν την επιτομή της ηλιακής ψύξης και θα αναλυθούν στην παρούσα εργασία και οι ψύκτες προσρόφησης.

☒ Ανοιχτά συστήματα: Τα ανοιχτά συστήματα παρέχουν πλήρη κλιματισμό και απαιτούν την άμεση επαφή του ψυκτικού μέσου (νερό) με τον αέρα. Τέτοια συστήματα τα οποία χρησιμοποιούνται σήμερα για την ηλιακή ψύξη είναι οι μονάδες ανοικτού κύκλου (desiccant) οι οποίες λειτουργούν με έναν περιστρεφόμενο τροχό αφύγρανσης και με ένα ροφητικό υλικό. Ανάλογα τον τύπο του ροφητικού υλικού χωρίζονται σε στερεού και υγρού τύπου. Τέτοιου είδους συστήματα βρίσκονται σε διαρκή εξέλιξη αλλά δεν είναι τόσο αποδοτικά όσο τα κλειστά συστήματα.

### 2.4.3 ΨΥΞΗ ΚΑΙ ΚΥΚΛΟΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ

Με τον όρο ψύξη καλούμε τη διαδικασία απομάκρυνσης της θερμότητας από ένα μέρος όπου δεν είναι επιθυμητή και μεταφορά αυτής της θερμότητας σ' ένα μέρος όπου δε θα προκληθεί μεταβολή των ιδιοτήτων του. Θερμότητα απομακρύνεται από τα τρόφιμα έτσι ώστε να διατηρηθεί η ποιότητα και η γεύση τους, επίσης θερμότητα μεταφέρεται από τον αέρα ενός δωματίου για την επίτευξη θερμικής άνεσης του ανθρώπου. Γενικά υπάρχουν αναρίθμητες εφαρμογές στη βιομηχανία μεταφοράς θερμότητας από έναν συγκεκριμένο τόπο ή ένα υλικό έτσι ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα της ψύξης.

Η διαδικασία της ψύξης περιγράφεται μέσα από τους ψυκτικούς κύκλους και τα εξαρτήματα τα οποία χρειάζονται για να επιτευχθεί. Ανάλογα με τον τρόπο που επιτυγχάνεται η ψύξη υπάρχουν και οι αντίστοιχοι ψυκτικοί κύκλοι. Σύμφωνα με την ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) οι ψυκτικοί κύκλοι χωρίζονται σε ψυκτικούς κύκλους συμπίεσης ατμού και σε ψυκτικούς κύκλους απορρόφησης.

### 2.4.3.1 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΙΔΑΝΙΚΟΥ ΨΥΚΤΙΚΟΥ ΚΥΚΛΟΥ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ

Ο ψυκτικός κύκλος αποτελείται από ένα τμήμα υψηλής πίεσης και ένα τμήμα χαμηλής πίεσης και ακολουθεί τα εξής βήματα: Από μια περιοχή όπου αποθηκεύεται το ψυκτικό υγρό (δεξαμενή αποθήκευσης), ρέει σε υψηλή πίεση μέσα από ένα σημείο ελέγχου (συνήθως βαλβίδα εκτόνωσης) το οποίο αποτελεί σημείο πτώσης πίεσης. Στο σημείο εκείνο το ψυκτικό υγρό, ως κορεσμένο μίγμα χαμηλής ποιότητας, έχει θερμοκρασία μικρότερη του ψυχόμενου χώρου και οδηγείται μέσα στον εξατμιστή, ο οποίος βρίσκεται υπό χαμηλή πίεση, με αποτέλεσμα να εξατμίζεται πλήρως απορροφώντας θερμότητα από το ψυχόμενο χώρο. Ο ατμός πλέον εξέρχεται από τον εξατμιστή και ρέει μέσω μιας βαλβίδας εισαγωγής στον συμπιεστή. Μέσα στο συμπιεστή ο ατμός συμπιέζεται και αυξάνει τη θερμοκρασία του, αρκετά πάνω από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, και έπειτα μέσω μιας βαλβίδας εξαγωγής οδηγείται στον συμπυκνωτή ως υπέρθερμος ατμός. Στο συμπυκνωτή ο υπέρθερμος ατμός απορρίπτει τη θερμότητα του προς το περιβάλλον και μετατρέπεται σε υγρό και μετά ο κύκλος επαναλαμβάνεται.

### 2.4.3.2 ΨΥΚΤΙΚΟ ΜΕΣΟ

Οι σημαντικές παράμετροι που πρέπει να ληφθούν για την επιλογή του ψυκτικού μέσου είναι οι θερμοκρασίες του χώρου που ψύχεται και του περιβάλλοντος με τα οποία το ψυκτικό μέσο ανταλλάσσει θερμότητα. Για να υπάρξει μεταφορά θερμότητας με σημαντικό ρυθμό θα πρέπει να διατηρείται μια θερμοκρασιακή διαφορά της τάξεως των 5°C έως 10°C. Δεδομένου ότι η θερμοκρασία του ψυκτικού μέσου θα πρέπει να είναι σε πολλές εφαρμογές κάτω του μηδενός όταν βρίσκεται στον εξατμιστή ενώ παράλληλα πρέπει να υπάρχει και πίεση μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής, για να μην υπάρξει εισροή αέρα στον εξατμιστή, δημιουργούν συνθήκες στις οποίες ορισμένα ρευστά μπορούν να ανταπεξέλθουν.

Δύο τέτοια ρευστά τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές ψύξης είναι η αμμωνία και το R-134a. Το R-134a ανήκει στην οικογένεια των χλωροφθορανθράκων (CFC's) τα οποία καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο μέρος των ψυκτικών ρευστών που χρησιμοποιούνται έως σήμερα.

### 2.4.3.3 ΨΥΚΤΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ ΜΕ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ

Στις αρχές του 1850 επινοήθηκε ο ψυκτικός κύκλος με απορρόφηση λίγο αργότερα από τον ψυκτικό κύκλο με συμπίεση ατμού. Η πρώτη ψυκτική μηχανή αμμωνίας-νερού ( $NH_3-H_2O$ ) η οποία στηρίχτηκε πάνω στην απορρόφηση αποτέλεσε μια ευρεσιτεχνία του γάλλου Ferdinand Carre το 1859. Μετέπειτα άρχισαν να διαδίδονται τέτοια συστήματα ψύξης κυρίως σε μεγάλες εμπορικές εφαρμογές.

Ο ψυκτικός κύκλος με απορρόφηση είναι θερμοκαθοδηγούμενος χρησιμοποιώντας θερμότητα η οποία μπορεί να προσφερθεί είτε άμεσα από έναν καυστήρα αερίου η άλλου καυσίμου, είτε έμμεσα όταν υπάρχει μια πηγή θερμότητας η οποία να παράγει θερμό νερό όπως οι ηλιακοί συλλέκτες ή ο υπέρθερμος ατμός ενός εργοστασίου ατμοπαραγωγής.

Ο κύκλος απαιτεί για τη λειτουργία του δύο εργαζόμενες ουσίες έναν ροφητή και ένα υγρό ψυκτικό. Τα δύο διαδεδομένα διαλύματα είναι αμμωνία-νερό ( $NH_3-H_2O$ ), όπου η αμμωνία έχει το ρόλο του ψυκτικού και το νερό το ρόλο του ροφητή, και το άλλο είναι βρωμιούχο λίθιο-νερό ( $LiBr-H_2O$ ) όπου το βρωμιούχο λίθιο έχει το ρόλο του ροφητή και το νερό το ρόλο του ψυκτικού μέσου. Και τα δύο αυτά διαλύματα είναι φιλικά προς το περιβάλλον σε αντίθεση με τους χλωροφθοράνθρακες.

Σε ένα ψυκτικό κύκλο απορρόφησης η ιδέα είναι η ίδια με αυτήν ενός ψυκτικού κύκλου μηχανικής συμπίεσης δηλαδή, ένα ψυκτικό μέσο απορροφά θερμότητα από ένα μέρος και την αποβάλλει σε ένα άλλο. Η κύρια διαφορά είναι ότι ο κύκλος μηχανικής συμπίεσης απαιτεί τη λειτουργία ενός συμπιεστή για την αύξηση πίεσης του μέσου ενώ ο κύκλος απορρόφησης αντί του συμπιεστή χρησιμοποιεί έναν απορροφητή και ένα συγκεντρωτή -γεννήτρια. Ο συγκεντρωτής είναι αυτός που χρειάζεται την εξωτερική πηγή θερμότητας για να λειτουργήσει ο κύκλος. Στη συνέχεια θα αναλυθεί η λειτουργία του κύκλου και τα επιμέρους εξαρτήματά του.

#### 2.4.3.4 Ο ΡΟΛΟΣ ΤΩΝ ΔΙΑΛΥΜΑΤΩΝ

Λίγα διαλύματα μπορούν να λειτουργήσουν κατάλληλα σαν ζεύγη απορροφητικού μέσου-ψυκτικού μέσου και αυτό συμβαίνει διότι πρέπει να εμφανίζουν κάποια συγκεκριμένα χαρακτηριστικά για να χρησιμοποιηθούν σε έναν ψυκτικό κύκλο απορρόφησης. Παρατίθενται τα κυριότερα:

- Απουσία στερεάς φάσης: Το ζεύγος απορροφητικού-ψυκτικού μέσου δεν πρέπει να σχηματίζει στερεή κατάσταση κάτω από τις συνθήκες όπου θα εργάζεται γιατί αυτό προκαλεί παύση της ροής και κλείσιμο του εξοπλισμού.
- Λόγος μεταβλητότητας: Το ψυκτικό μέσο πρέπει να είναι περισσότερο ευμετάβλητο έτσι ώστε να μπορεί να γίνει εύκολος διαχωρισμός των δύο μέσων.
- Πίεση: Οι πιέσεις λειτουργίας, οι οποίες καθορίζονται σε μεγάλο βαθμό από τις ιδιότητες του ψυκτικού μέσου, πρέπει να είναι μέσης κατάστασης. Οι ιδιαίτερα υψηλές πιέσεις απαιτούν μεγάλη ισχύ για την μεταφορά του διαλύματος από το τμήμα χαμηλής πίεσης στο τμήμα υψηλής πίεσης.
- Διάβρωση: Τα απορροφητικά υγρά μπορούν να διαβρώσουν υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται στον εξοπλισμό. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη η χρήση διαβρωτικών αναστολέων.
- Ασφάλεια: Τα υγρά πρέπει να είναι μη τοξικά και μη εύφλεκτα ιδιαίτερα σε οικιακές εγκαταστάσεις ώστε να αποφεύγονται ατυχήματα.
- Ιδιότητες μεταφοράς: Το ιξώδες και η επιφανειακή τάση είναι σημαντικά χαρακτηριστικά για το ζεύγος απορροφητικού-ψυκτικού μέσου. Ρευστό χαμηλού ιξώδους μειώνει την ισχύ άντλησης δυσχεραίνοντας τη ροή του στον ψυκτικό κύκλο.
- Λανθάνουσα θερμότητα: Η λανθάνουσα θερμότητα του ψυκτικού μέσου πρέπει να είναι ιδιαίτερα υψηλή έτσι ώστε να διατηρείται ένας ελάχιστος ρυθμός κυκλοφορίας απορροφητικού και ψυκτικού υγρού.
- Περιβαλλοντικά: Τόσο το απορροφητικό όσο και το ψυκτικό μέσο πρέπει να είναι όσο το δυνατόν περισσότερο φιλικά προς το περιβάλλον.

Κανένα ζεύγος απορροφητικού-ψυκτικού μέσου έως τώρα δεν έχει βρεθεί το οποίο να πληροί όλες τις παραπάνω προϋποθέσεις, ωστόσο τα διαλύματα βρωμιούχο λίθιο-νερό ( $LiBr-H_2O$ ) και αμμωνία-νερό ( $NH_3-H_2O$ ) εμφανίζουν εξαιρετικές θερμοδυναμικές ιδιότητες με ελάχιστες επιπτώσεις στο περιβάλλον. Η αμμωνία πληροί τις περισσότερες προϋποθέσεις αλλά λόγω του χαμηλού λόγου μεταβλητότητάς της, απαιτεί υψηλές πιέσεις λειτουργίας και δεν ενδείκνυται για εσωτερικές εγκαταστάσεις. Από την άλλη το βρωμιούχο λίθιο εμφανίζει υψηλούς λόγους μεταβλητότητας, υψηλή λανθάνουσα θερμότητα και υψηλή ασφάλεια. Ωστόσο όμως το ζεύγος  $LiBr-H_2O$  τείνει να σχηματίζει στερεά μέσα στον κύκλο καθώς το ψυκτικό μέσο (νερό) παγώνει στους  $0^\circ C$  με αποτέλεσμα να μη μπορεί να λειτουργεί ο κύκλος για εφαρμογές που απαιτούν ιδιαίτερα χαμηλές θερμοκρασίες. Επιπλέον το  $LiBr$  δημιουργεί κρυστάλλους σε μέσες συγκεντρώσεις ιδιαίτερα εάν χρησιμοποιείται αερόψυκτος απορροφητής αν και υπάρχει ένας συνδυασμός και άλλων αλάτων ο οποίος περιορίζει στο μέγιστο βαθμό την κρυσταλλοποίηση.

#### 2.4.4 ΗΛΙΑΚΟΣ ΣΥΛΛΕΚΤΗΣ ΩΣ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΠΗΓΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΨΥΚΤΙΚΟ ΚΥΚΛΟ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ

Η χρήση επίπεδων ηλιακών συλλεκτών είναι συνήθης για την παραγωγή θέρμανσης ενός χώρου, ωστόσο ένας καλής ποιότητας επίπεδος συλλέκτης με επιλεκτική επιφάνεια μπορεί να πετύχει θερμοκρασίες ικανές για τη λειτουργία ενός συστήματος ψύξης που στηρίζεται στην απορρόφηση με διάλυμα  $LiBr$ . Μια επιπλέον λύση είναι η χρήση ηλιακών συλλεκτών με σωλήνες κενού οι οποίοι πετυχαίνουν μεγαλύτερες θερμοκρασίες από τους επίπεδους και μπορούν να λειτουργήσουν σε σύστημα απορρόφησης διαλύματος  $NH_3$ .

Μια σχηματική αναπαράσταση παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.25. Η πηγή θερμότητας στο συγκεντρωτή-γεννήτρια προέρχεται από ηλιακό συλλέκτη. Δεδομένου ότι η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο συλλέκτη είναι διακοπτόμενη στο σύστημα είναι χρήσιμη η τοποθέτηση μιας δεξαμενής αποθήκευσης του θερμού νερού η οποία θα τροφοδοτεί το συγκεντρωτή με το ζεστό νερό όταν αυτό δεν θα μπορεί να παραχθεί άμεσα από τον ηλιακό συλλέκτη. Αυτό συμβαίνει κυρίως όταν υπάρχει ανάγκη για ψύξη τις βραδινές ώρες. Πολλές φορές χρησιμοποιείται και μια βοηθητική πηγή θέρμανσης με σκοπό τη θέρμανση του νερού όταν η θερμοκρασία του μέσα στη δεξαμενή αποθήκευσης είναι χαμηλή.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η απαιτούμενη θερμοκρασία στην οποία πρέπει να φθάνει το νερό στο συγκεντρωτή είναι  $70^\circ C-95^\circ C$  για έναν κύκλο απορρόφησης  $LiBr$ . Το ελάχιστο θερμοκρασιακό όριο απαιτείται έτσι να εξατμίσει το νερό από το ασθενές διάλυμα στο συγκεντρωτή ενώ το μέγιστο για να αποφευχθεί η κρυσταλλοποίηση του  $LiBr$  καθώς θα οδηγηθεί στον απορροφητή. Επειδή σε έναν ψυκτικό κύκλο με απορρόφηση η θερμότητα αποβάλλεται από τον απορροφητή και από τον συμπυκνωτή είναι απαραίτητη η χρήση ενός πύργου ψύξης που θα τα τροφοδοτεί το σύστημα με νερό περίπου στους  $29^\circ C$ . Στον απορροφητή απαιτείται μικρότερη





## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:

# ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΓΙΑ ΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ ΚΕΝΟΥ VTC

### 3.1 ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Το ισοζύγιο ενέργειας σε έναν επίπεδο ηλιακό συλλέκτη δίνει την ποσότητα θερμότητας που αποδίδει ο συλλέκτης συναρτήσει του εμβαδού της επιφάνειάς του, την απορροφούμενη από την μαύρη επιφάνεια ηλιακή ακτινοβολία, τον συνολικό συντελεστή θερμικών απωλειών του συλλέκτη και της διαφοράς ανάμεσα στην μέση θερμοκρασία του συλλέκτη και την θερμοκρασία του περιβάλλοντος αέρα [23]:

$$Q_u = A_c \cdot [S - U \cdot (t_m - t_a)]$$

Όπου,

$Q_u$  [W]: η ωφέλιμη θερμότητα που αποδίδεται από τον συλλέκτη

$A_c$  [m<sup>2</sup>]: η επιφάνεια του συλλέκτη

$S$  [kW/m<sup>2</sup>]: η απορροφούμενη ηλιακή ακτινοβολία

$U$  [kW/m<sup>2</sup>·K]: ο ολικός συντελεστής απωλειών προς το περιβάλλον του συλλέκτη

$t_m$  [oC]: η μέση θερμοκρασία του συλλέκτη

$t_a$  [oC]: η θερμοκρασία του περιβάλλοντος

Ο ολικός συντελεστής απωλειών προς το περιβάλλον του συλλέκτη  $U$  αποτελείται από τρεις όρους :

$$U = U_u + U_d + U_s$$

$U_u$  [kW/m<sup>2</sup>·K]: συντελεστής απωλειών προς τα επάνω.

$U_d$  [kW/m<sup>2</sup>·K]: συντελεστής απωλειών προς τα κάτω.

$U_s$  [kW/m<sup>2</sup>·K]: συντελεστής απωλειών προς τα πλάγια.

Η μέση θερμοκρασία του συλλέκτη είναι δύσκολο να υπολογιστεί. Για τον λόγο αυτό εισάγεται ένα νέο μέγεθος, ο Συντελεστής Απομάκρυνσης Θερμότητας από τον συλλέκτη  $F_R$ , ο οποίος είναι ανηγμένο μέγεθος στην θερμοκρασία εισόδου του συλλέκτη :

$$F_R = \frac{m \cdot c_p \cdot (t_{in} - t_{out})}{A_{\text{συλλέκτη}} \cdot [S - U \cdot (t_{in} - t_{\text{αέρα}})]}$$

Το μέγιστο δυνατό θερμικό κέρδος σε ένα ηλιακό συλλέκτη επιτυγχάνεται, όταν όλος ο συλλέκτης βρίσκεται στην θερμοκρασία εισόδου του ρευστού σε αυτόν. Τότε το πραγματικό θερμικό κέρδος είναι :

$$Q = A_{\text{συλλέκτη}} \cdot F_R \cdot [S - U \cdot (t_m - t_{\text{αέρα}})]$$

### 3.1.1 ΚΑΜΠΥΛΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ

Οι ηλιακοί συλλέκτες ελέγχονται ως προς την απόδοσή τους σύμφωνα με τα πρότυπα EN12975-1 του 2001, το EN12975-2 του 2002 όπως και από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή Τυποποίησης CEN (Comité Européen de Normalisation). Οι δοκιμές των ηλιακών συλλεκτών γίνονται τόσο σε ειδικά εργαστήρια – δοκιμαστήρια όσο και σε εξωτερικούς χώρους (πραγματικές συνθήκες), για συνθήκες 1000 W/m<sup>2</sup> και θερμοκρασία αέρα 30 °C. Η απόδοση εξ ορισμού είναι το πηλίκο της απορριφθείσας ενέργειας προσπίπτουσας ενέργειας και εξαρτάται ανάλογα από την ηλιακή ακτινοβολία. Η στιγμιαία απόδοση  $\eta_i$  ενός συλλέκτη δίδεται από τον τύπο

$$\eta_i = \frac{Q_u}{Q_i}$$

όπου,

$Q_u$  [W]: η ωφέλιμη θερμότητα που αποδίδεται από τον συλλέκτη

$Q_i$  [W]: η προσπίπτουσα ακτινοβολούσα ισχύς

Η απόδοση όπως φαίνεται και από τις παραπάνω σχέσεις παραμένει σε υψηλά επίπεδα αν έχουμε αξιοσημείωτη διαφορά ( $t_e - t_i$ ). Αυτό επιτυγχάνεται αν η θερμοκρασία εισόδου νερού είναι χαμηλή.

Θεωρούμε  $Q_i = A \cdot G^*$ , όπου  $G^*$  η προσπίπτουσα ακτινοβολούσα ισχύς σε W/m<sup>2</sup>, η οποία ποικίλει ανάλογα με την επιφάνεια. Η απόδοση υπολογίζεται στην επιφάνεια συσσώρευσης και στο άνοιγμα της επιφάνειας, επομένως είναι απαραίτητη η γνώση των διαστάσεων της επιφάνειας του συλλέκτη κατά τον υπολογισμό. Ανάλογα με τη μεταβολή των συνθηκών λειτουργίας και του περιβάλλοντος η μεταβολή της απόδοσης δίνεται από τον τύπο:

$$\eta = \eta_0 - c_1 \cdot \frac{t_m - t_a}{G^*} - c_2 \cdot \frac{(t_m - t_a)^2}{G^*}$$

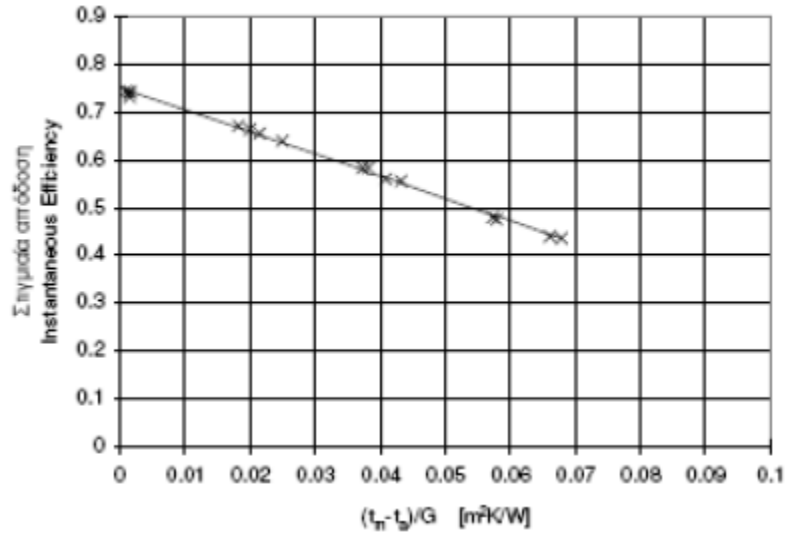
όπου,

$t_m$  [°C]: μέση θερμοκρασία υγρού μεταφοράς της θερμότητας στο συλλέκτη

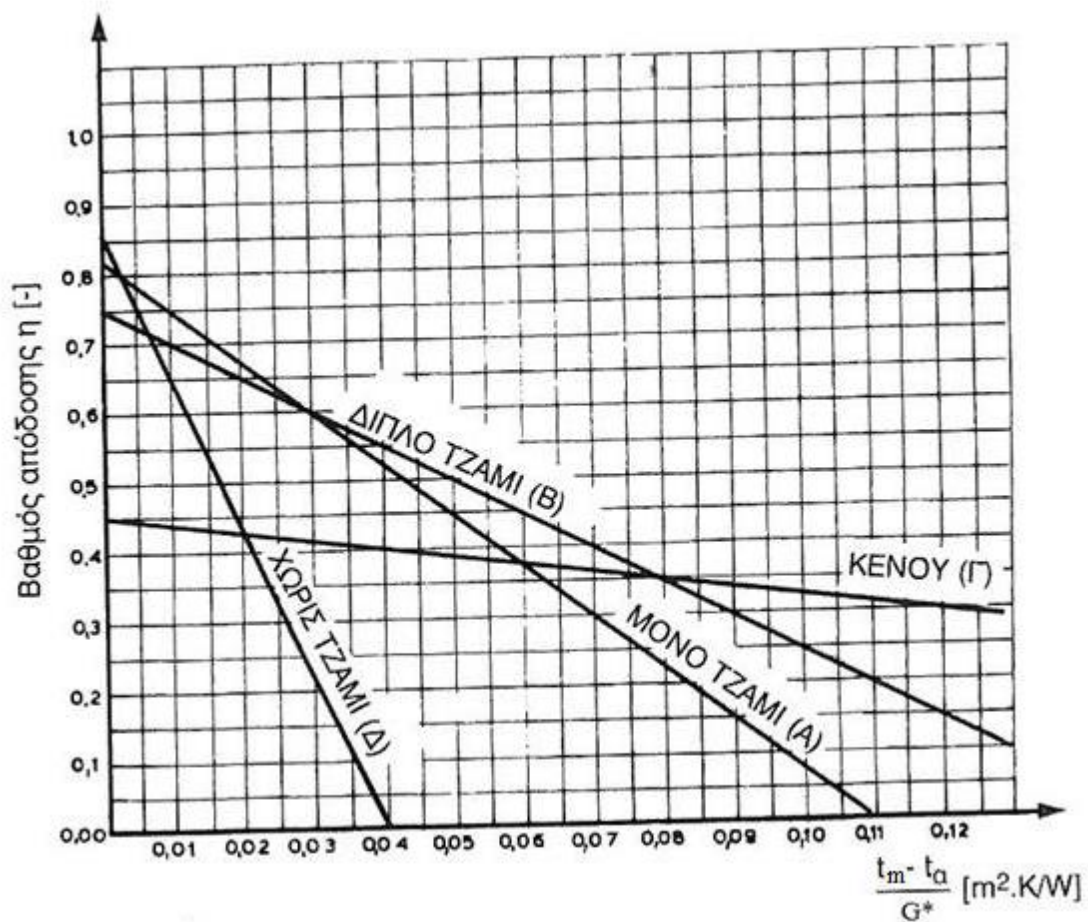
$$t_m = \frac{t_i + t_e}{2}$$

$t_a$  [°C]: θερμοκρασία εξωτερικού χώρου

$\eta_0$ : υπολογισμένη απόδοση σε  $t_m = t_a$



Σχήμα 3.1 Καμπύλη απόδοσης επίπεδου ηλιακού συλλέκτη



Σχήμα 3.2 Καμπύλες απόδοσης διάφορων τύπων επίπεδων συλλεκτών

### 3.2 ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΟΜΟΚΕΝΤΡΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ ΕΙΣΟΔΟΥ – ΕΞΟΔΟΥ (ΓΥΑΛΙ – ΜΕΤΑΛΛΟ)

Ο θερμικός βαθμός απόδοσης του συλλέκτη υπολογίζεται ως το πηλίκο της ωφέλιμης ενέργειας προς την ενέργεια που δέχεται ο συλλέκτης.

$$n_i = \frac{Q_u}{A_C \times I_b}$$

όπου  $A_C = 0.112 \text{ m}^2$

Η ωφέλιμη ενέργεια  $Q_u$  προκύπτει από το ενεργειακό ισοζύγιο ίση με:

$$Q_u = A_C \times F_R \times [S - U_1(T_{fi} - T_a)]$$

όπου

$T_{fi}$ : η θερμοκρασία του νερού στην είσοδο του σωλήνα

$T_a$ : η θερμοκρασία περιβάλλοντος

Ο ολικός συντελεστής θερμικών απωλειών  $U_1$  υπολογίζεται ως

$$U_1 = \left( \frac{1}{h_{rad}} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi \times L_{glass} \times k_{glass}} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi \times L_{pipe} \times k_{pipe}} + \frac{1}{h_{water}} \right)^{-1} + U_e + U_b$$

Εξαιτίας του κυκλικού σχήματος του συλλέκτη, δεν υπάρχουν θερμικές απώλειες στα πλαϊνά τοιχώματα ( $U_e=0$ ) και απώλειες στο πίσω μέρος του συλλέκτη ( $U_b=0$ ).

Ο συντελεστής  $F_R$  υπολογίζεται ως το γινόμενο δύο άλλων συντελεστών:

$$F_R = F'' \times F'$$

$$F' = \frac{1/U_1}{W \left( \frac{1}{U_1[D(W-D)F]} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi Dh_{fi}} \right)}$$

όπου

$D$ : η εξωτερική διάμετρος του μεταλλικού σωλήνα

$W$ : το κενό μεταξύ των σωλήνων

$C_b = 0$  διότι δεν υπάρχει μεταλλικό πιάτο

$$F'' = \frac{\dot{m} \times C_p}{A_c \times U_1 \times F'} [1 - \exp(-\frac{A_c \times U_1 \times F'}{\dot{m} \times C_p})]$$

Η απορροφώμενη ηλιακή ακτινοβολία υπολογίζεται από την σχέση:

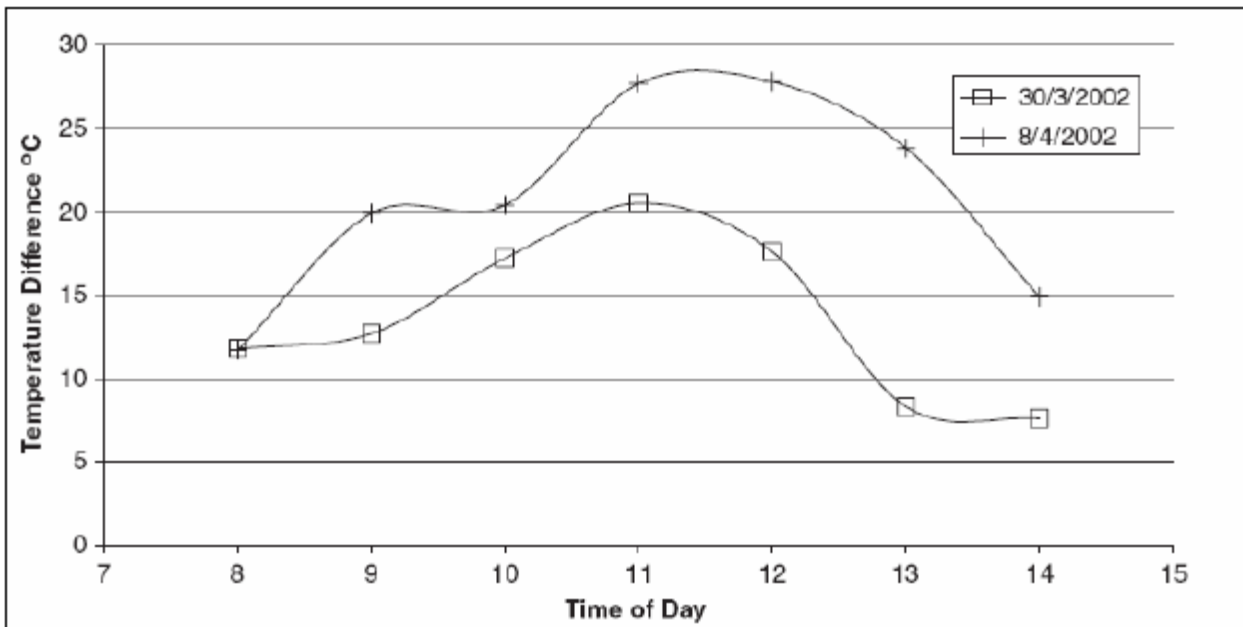
$$S = I_b \times R_b \times (\tau\alpha)_b$$

Με

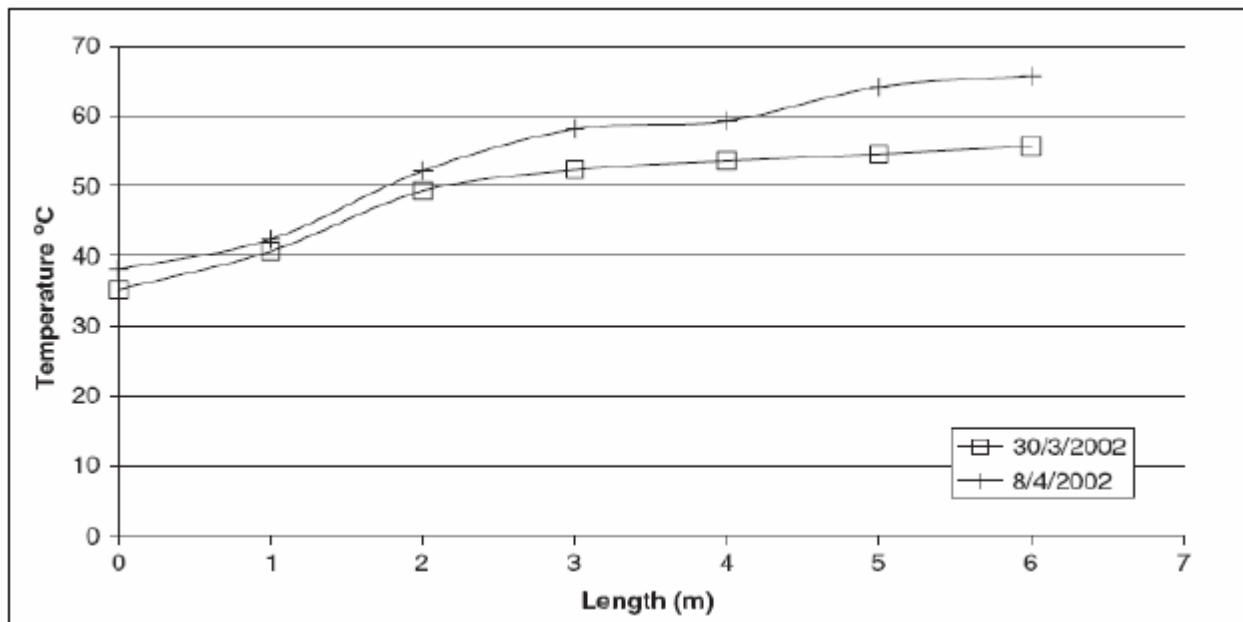
$$R_b = \frac{\cos(\phi - \beta) \times \cos \delta \times \cos \omega + \sin(\phi - \beta) \times \sin \delta}{\cos \phi \times \cos \delta \times \cos \omega + \sin \phi \times \sin \delta}$$

επειδή όμως ο συλλέκτης δεν είναι προσανατολισμένος  $\beta = 0$ .

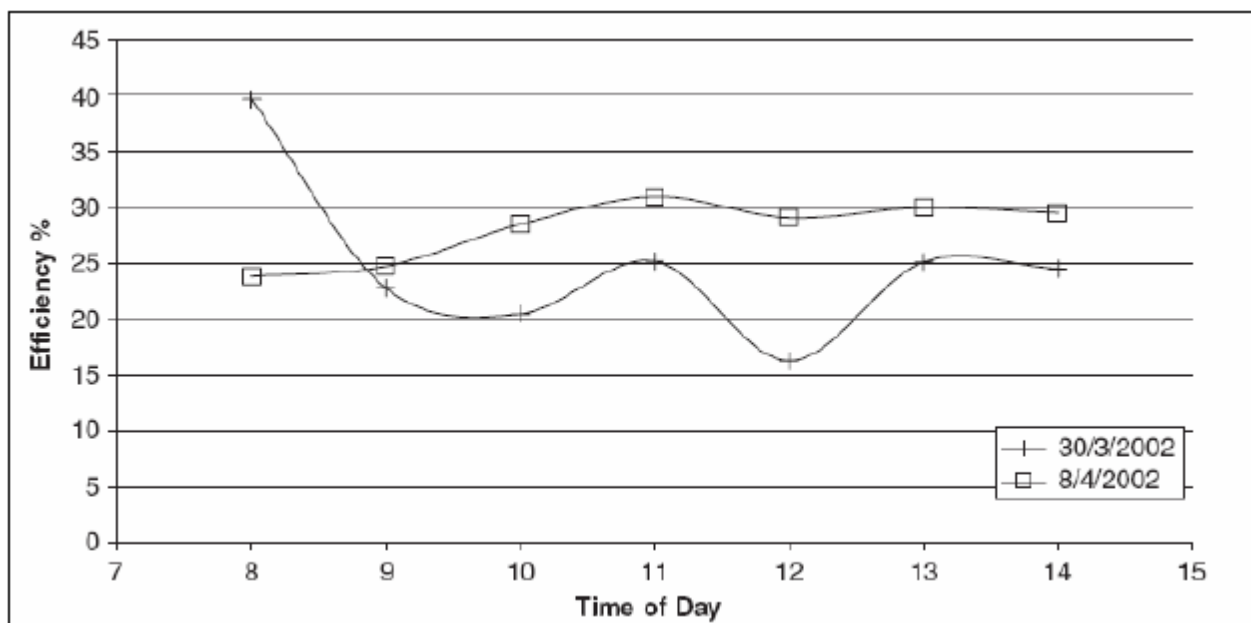
Στα σχήματα 3.3 και 3.4 που ακολουθούν, φαίνονται οι θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ εισόδου και εξόδου του συλλέκτη καθώς επίσης και η θερμοκρασία του νερού κατά το μήκος του συλλέκτη. Από το διάγραμμα 5 παρατηρούμε ότι ο μέγιστος θερμικός βαθμός απόδοσης για τον μήνα Μάρτιο είναι γύρω στο 40%, ενώ για τον Απρίλιο 31%.



Σχήμα 3.3 Θερμοκρασιακή μεταβολή κατά τη διάρκεια της ημέρας



Σχήμα 3.4 Θερμοκρασία του νερού κατά μήκος του συλλέκτη



Σχήμα 3.5 Βαθμός απόδοσης συλλέκτη κατά τη διάρκεια της μέρας

### 3.3 ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ ΤΥΠΟΥ ΣΙΔΝΕΪ (ΓΥΑΛΙ – ΓΥΑΛΙ)

#### 3.3.1 ΤΥΠΙΚΟΣ ΣΥΛΛΕΚΤΗΣ

Ο θερμικός βαθμός απόδοσης υπολογίζεται, ως γνωστό, από τον λόγο της ισχύος του συλλέκτη προς της ολικά αποδιδόμενη ηλιακή ακτινοβολία.

$$n = \frac{P_{collector}}{P_{solar}}$$

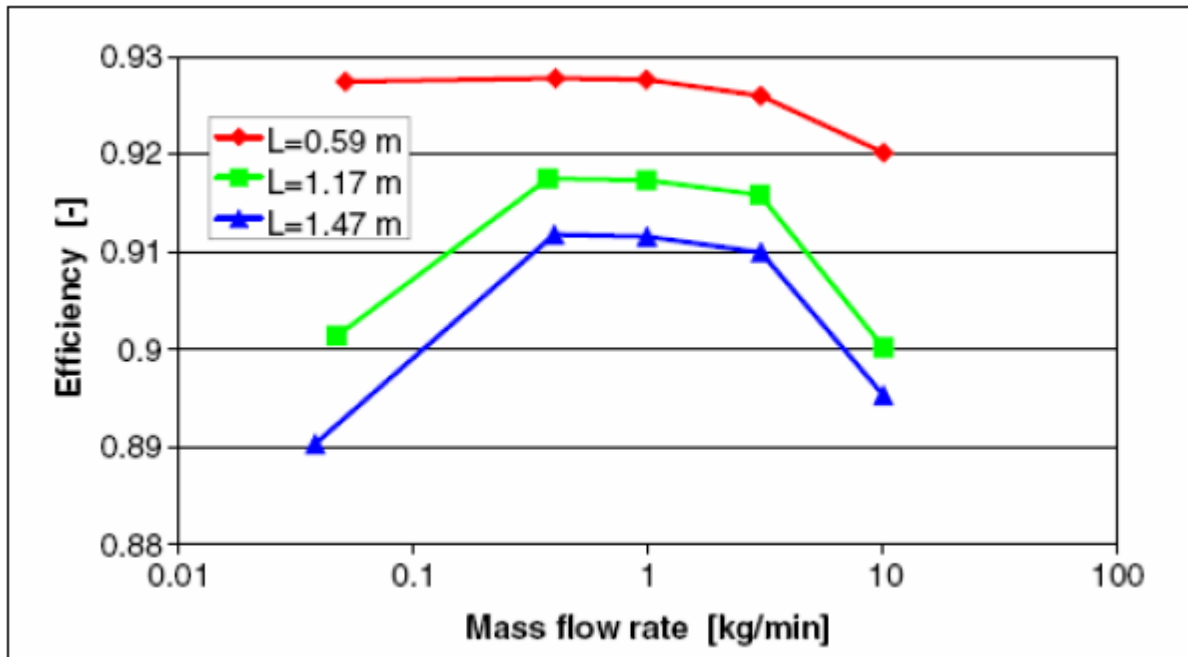
Η ιδιαιτερότητα του συλλέκτη αυτού είναι ότι ο βαθμός απόδοσής του επηρεάζεται από τη ροή του εργαζόμενου μέσου και από το μήκος του κεντρικού σωλήνα. [24]

Πιο αναλυτικά, μετά από πολυάριθμα πειράματα, προέκυψε ότι ο βέλτιστος βαθμός απόδοσης εμφανίζεται για ροή μεταξύ 0.4 – 1 kg/min (σχήμα 3.6). Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι για μεγαλύτερη ροή (3 – 10 kg/min) ένα μεγάλο ποσοστό του ρευστού ρέει κατευθείαν διαμέσω του κεντρικού σωλήνα χωρίς να εισέρχεται στους γυάλινους σωλήνες. Κατά αυτόν τον τρόπο, η μέση θερμοκρασία των γυάλινων σωλήνων αυξάνεται, οπότε και μειώνεται ο βαθμός απόδοσης. Στην περίπτωση μικρότερης ροής ρευστού (0.05 kg/min) αν και το ρευστό ρέει διαμέσω των γυάλινων σωλήνων, η ροή δεν είναι αρκετή για να διατηρήσει τη θερμοκρασία σε χαμηλά επίπεδα.

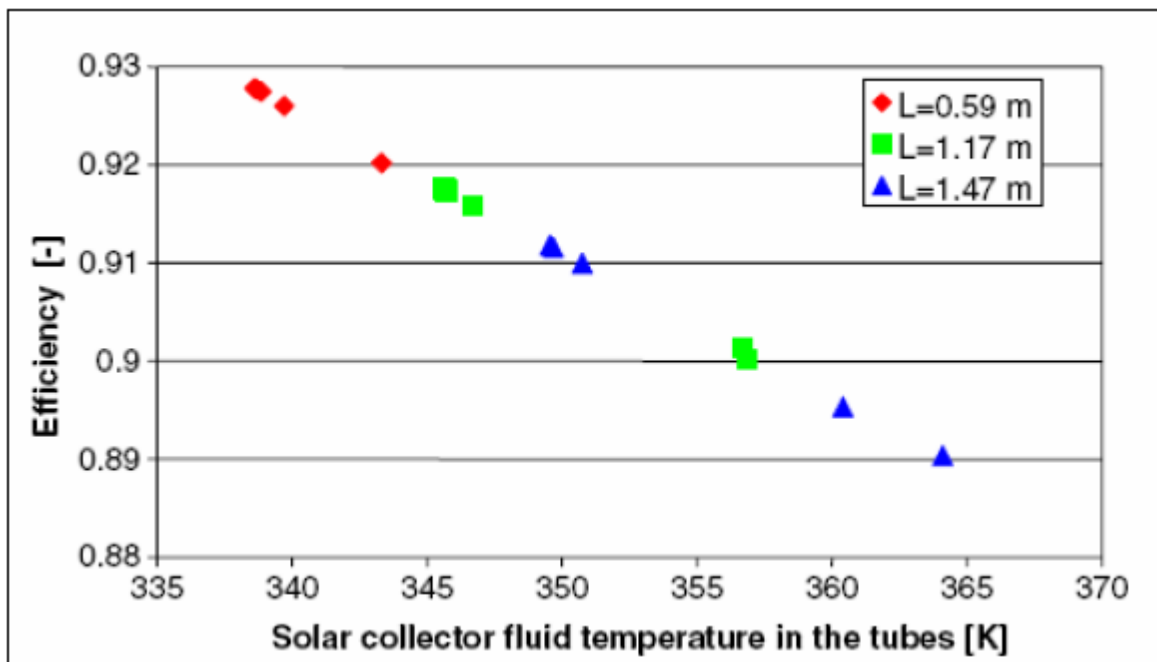
Η αλληλεπίδραση της θερμοκρασίας των γυάλινων σωλήνων και του βαθμού απόδοσης διαφαίνεται καθαρά στο σχήμα 3.7.

Για τον προσδιορισμό των βέλτιστων γεωμετρικών χαρακτηριστικών του συλλέκτη, πραγματοποιήθηκαν πειράματα για τρία διαφορετικά μήκη κεντρικού σωλήνα. Τελικά, καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι ο βέλτιστος βαθμός απόδοσης, παρουσιάστηκε για το μικρότερο μήκος.





Σχήμα 3.6 Βαθμός απόδοσης συλλέκτη σε συνάρτηση με ροή ρευστού



Σχήμα 3.7 Βαθμός απόδοσης συλλέκτη σε συνάρτηση με θερμοκρασία ρευστού στις σωληνώσεις

### 3.3.2 ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΣ ΣΥΛΛΕΚΤΗΣ ΤΥΠΟΥ ΣΙΔΝΕΪ

Η ισχύς του συλλέκτη, η οποία καθορίζει και τον βαθμό απόδοσής του δίνεται ως το άθροισμα των παρακάτω ισχύων:

$$P_u = P_b + P_d + P_{gr} - P_{loss}$$

όπου

$P_b$  : η ισχύς της άμεσα προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας

$P_d$  : η ισχύς από διάχυτη ακτινοβολία

$P_{gr}$  : η ισχύς της ανακλώμενης από το έδαφος ηλιακής ακτινοβολίας

$P_{loss}$  : οι απώλειες ισχύος

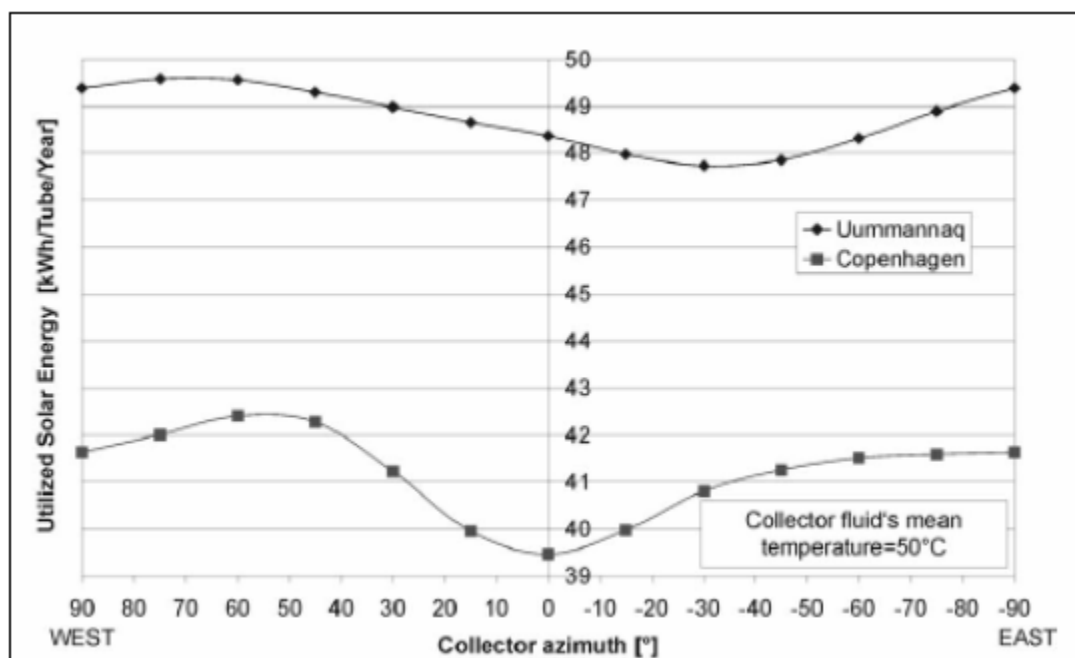
Μετά από πολύπλοκους υπολογισμούς, καταλήξαμε στη σχέση [25]:

$$P_u = \dot{V} \times \rho \times C_p \times (T_{out,hot} - T_{in,cold}) + \frac{C_{p,col} (T_{fm}^t - T_{fm}^{t-\Delta t})}{\Delta t}$$

όπου

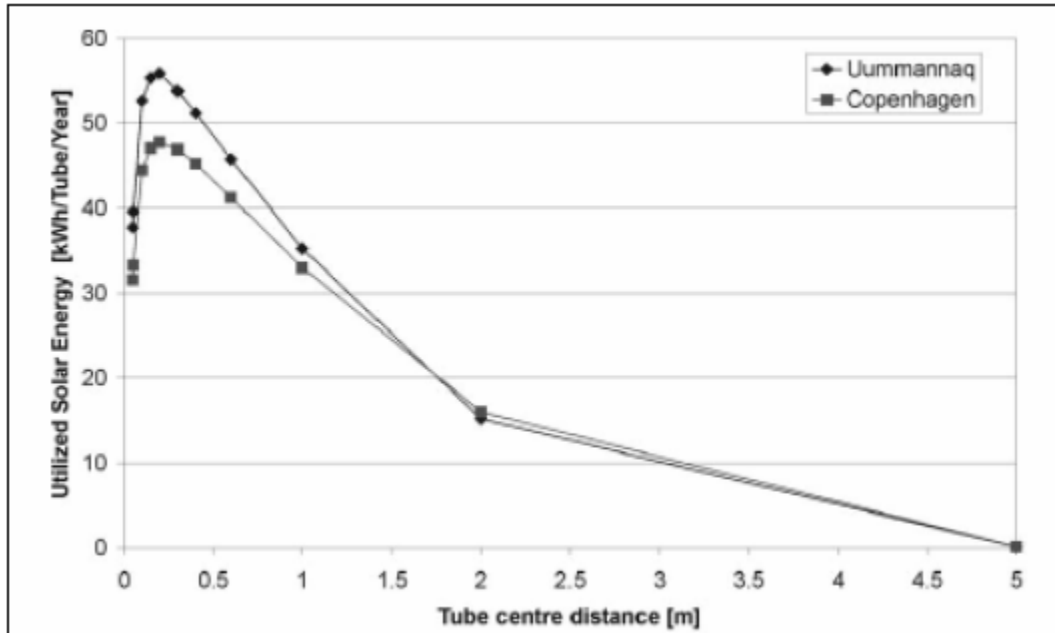
$T_{fm}$  : η μέση θερμοκρασία του ρευστού

Θεωρώντας απόσταση μεταξύ των σωλήνων ίση με 0.067 m και μέση θερμοκρασία ρευστού 50°C, η βέλτιστη γωνία αζιμουθίου προκύπτει γύρω 45 – 60°.



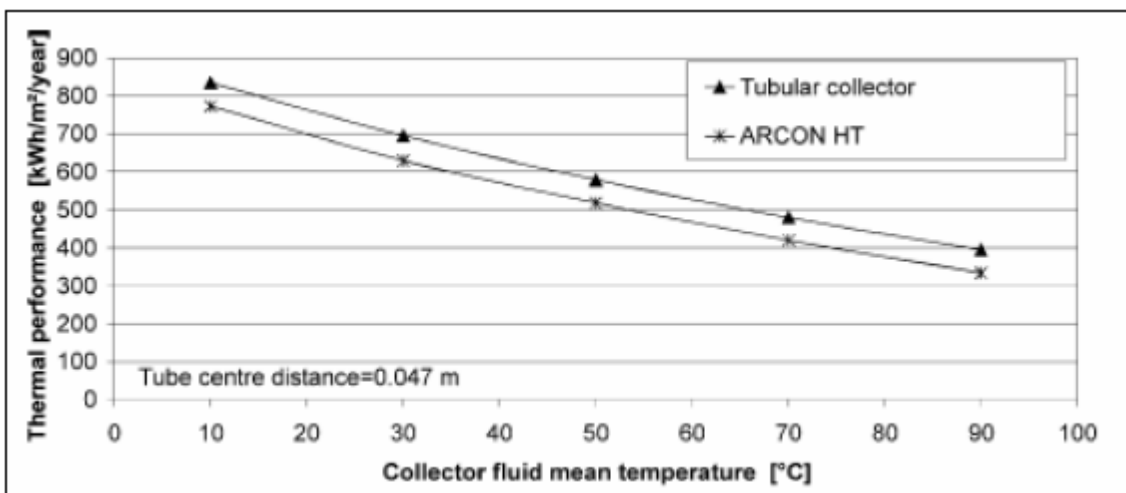
Σχήμα 3.8 Γραφικός προσδιορισμός βέλτιστης γωνίας αζιμουθίου

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η επίδραση της απόστασης μεταξύ των σωλήνων στην ωφέλιμη ηλιακή ενέργεια. Η ενέργεια μειώνεται για αποστάσεις μέχρι και 0.2 m λόγω μειωμένων επισκιασμένων επιφανειών και αυξάνεται για μεγαλύτερες αποστάσεις, εξαιτίας αυξημένων θερμικών απωλειών. Η βέλτιστη απόσταση βρέθηκε ίση με 0.047 – 0.3 m.



Σχήμα 3.9 Ωφέλιμη ηλιακή ακτινοβολία σε συνάρτηση με την απόσταση μεταξύ των σωλήνων

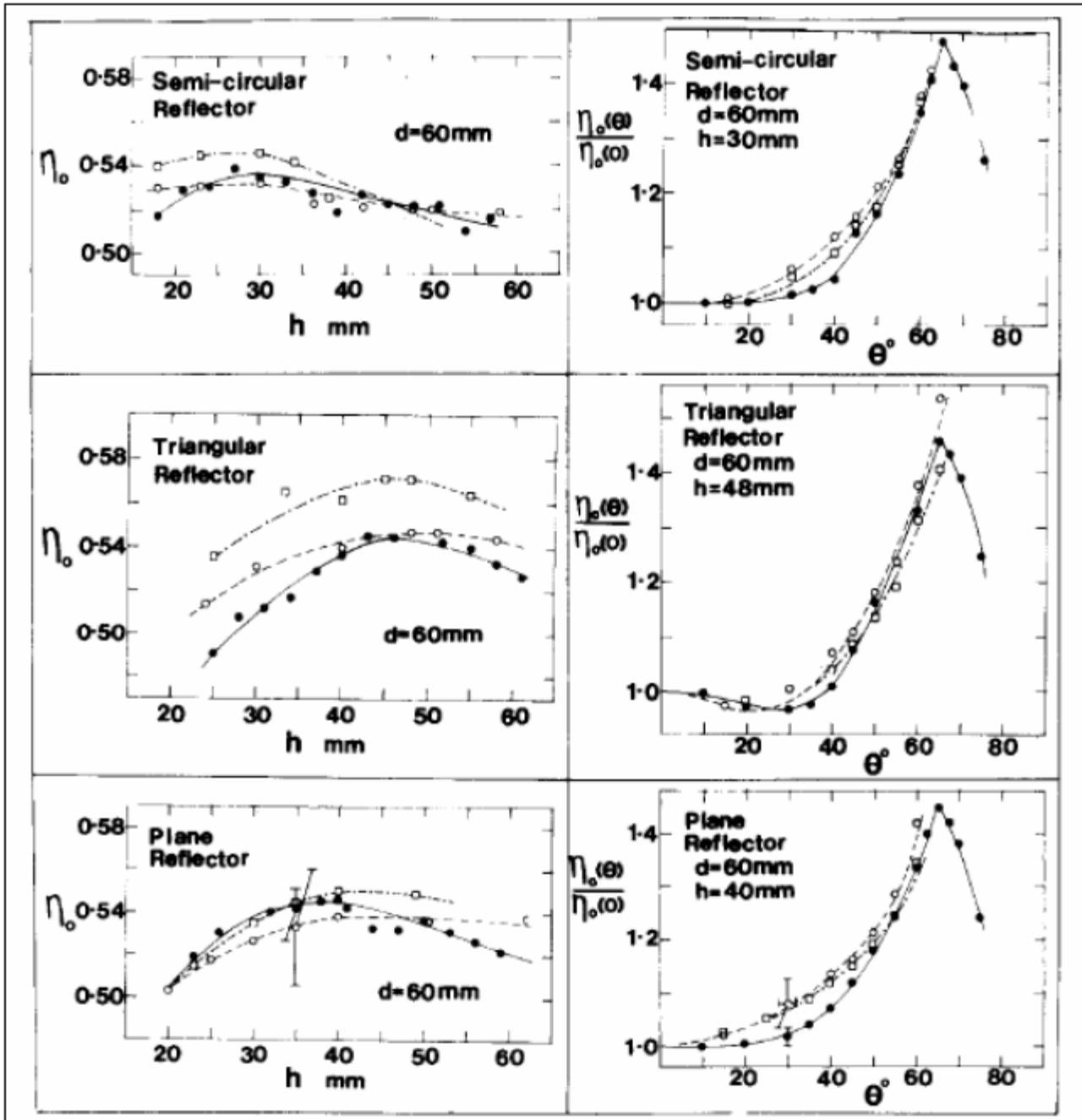
Τέλος, ο θερμικός βαθμός απόδοσης σε σχέση με τη μέση θερμοκρασία του ρευστού είναι:



Σχήμα 3.10 Θερμικός βαθμός απόδοσης σε συνάρτηση με τη μέση θερμοκρασία του ρευστού

### 3.3.3 ΣΥΛΛΕΚΤΗΣ ΤΥΠΟΥ ΣΙΔΝΕΪ ΜΕ ΑΝΑΚΛΑΣΤΗ

Θεωρώντας ότι η απόσταση μεταξύ των κέντρων των συλλεκτών είναι της τάξης των  $d = 60\text{mm}$  και μετά από πειραματικές διαδικασίες καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα όσον αφορά τη συσχέτιση του  $\eta_0$ - $h$  καθώς επίσης και του λόγου  $\eta_0(\theta)/\eta_0(0) - \theta$ . [26]



Σχήμα 3.11 Γραφικές παραστάσεις βαθμών απόδοσης συλλέκτη τύπου Σίδνεϊ με ανακλαστή

Παρατηρούμε ότι οι μέγιστοι βαθμοί απόδοσης εμφανίζονται για  $h = 40, 48$  και  $30$  mm για τον επίπεδο, τριγωνικό και ημικυλινδρικό ανακλαστή αντίστοιχα. Ο βαθμός απόδοσης στις περιπτώσεις αυτές είναι  $\rho_0 = 0.54, 0.55$  και  $0.53$  αντίστοιχα.

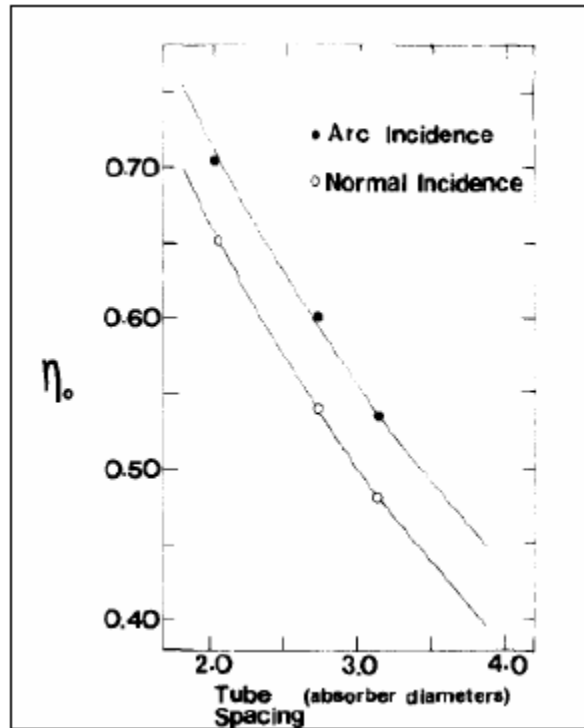
Στον παρακάτω πίνακα, φαίνονται οι τιμές του βαθμού απόδοσης για διάφορες γωνίες κλίσης.

	$\theta = 0^\circ$		$\theta = 30^\circ$		$\theta = 45^\circ$		$\theta = 60^\circ$	
	Flat White	Glossy White	Flat White	Glossy White	Flat White	Glossy White	Flat White	Glossy White
Plane	0.54	0.55	0.58	0.59	0.63	0.63	0.76	0.75
Triangular	0.55	0.57	0.55	0.56	0.61	0.62	0.76	0.75
Semi-Circle	0.53	0.55	0.56	0.57	0.61	0.62	0.73	0.75

Πίνακας 1 Βαθμός απόδοσης συλλέκτη τύπου Σίδνεϊ με ανακλαστή για διάφορες γωνίες κλίσης

Αν και η υπεροχή του τριγωνικού ανακλαστή είναι εμφανής για  $\theta = 0^\circ$ , δεν ισχύει το ίδιο και στις υπόλοιπες περιπτώσεις. Επίσης, παρατηρούμε ότι δεν υπάρχουν σημαντικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των δύο διαφορετικών ειδών μπογιάς (της τάξης του 0.01 %). Συμπερασματικά, ο πιο αποτελεσματικός ανακλαστής επιλέγεται ο επίπεδος, ενώ παράλληλα είναι και η πιο οικονομική λύση λόγω της απλοϊκότητας της κατασκευής του.

Όσον αφορά την απόσταση μεταξύ των σωλήνων  $d$ , παρατηρούμε ότι ο βαθμός απόδοσης βελτιώνεται για  $d < 3.0$  απορροφητικών διαμέτρων.

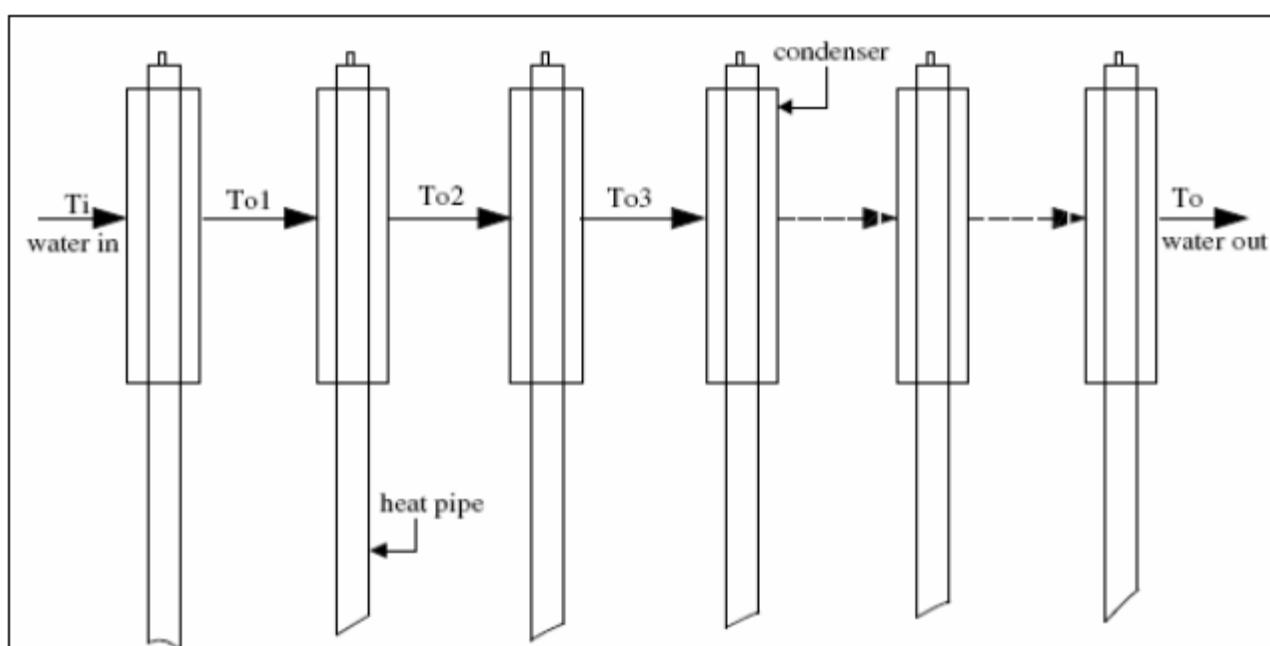


Σχήμα 3.12 Βαθμός απόδοσης συλλέκτη τύπου Σίδνεϊ με ανακλαστή για διάφορες αποστάσεις

## 3.4 ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ

### 3.4.1 ΤΥΠΙΚΟΣ ΣΥΛΛΕΚΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ

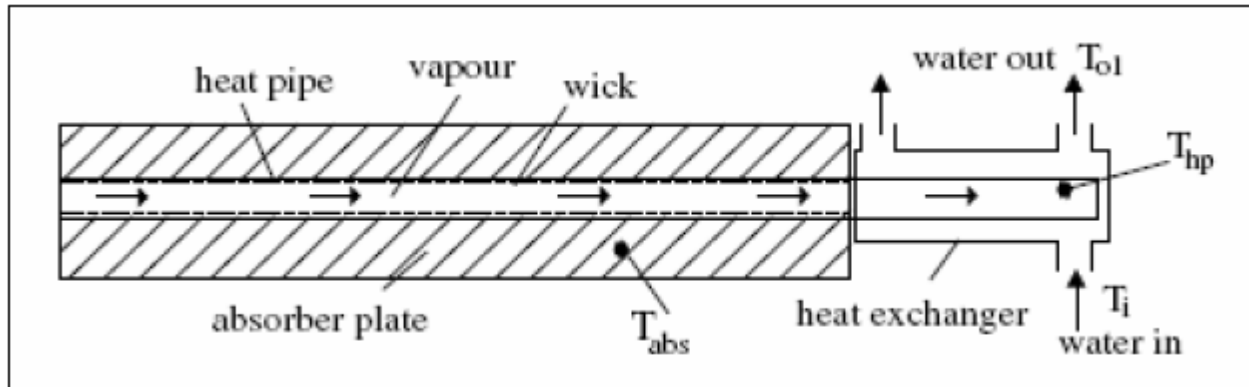
Για έναν συλλέκτη με  $n$  αριθμό θερμικών σωλήνων, το εργαζόμενο σώμα ρέει από τον έναν συμπακνωτή στον άλλον. Με άλλα λόγια, η θερμοκρασία εξόδου από τον πρώτο συμπακνωτή γίνεται η θερμοκρασία είσοδου για τον δεύτερο και ούτω καθεξής.



Σχήμα 3.13 Ροή εργαζόμενου μέσου δια μέσου των συμπακνωτών

Συνεπώς, η θερμότητα που μεταφέρεται από τον εξατμιστή στον συμπακνωτή του πρώτου θερμικού σωλήνα ισούται με:

$$Q_{hp1} = A_{hp} \times (T_{hp1} - T_{c,o1}) \times U_{hp} = A_{c1} \times U_{c,o1} \times (T_{c,o1} - T_i) = Q_{c1}$$



Σχήμα 3.14 Μεταφορά θερμότητας από εξατμιστή στον συμπυκνωτή

Επειδή η επιμέρους μελέτη κάθε συμπυκνωτή και η τελική αντιμετώπισή τους ως ενιαίο σύστημα είναι πολύπλοκη διαδικασία, θεωρούμε ότι κάθε συμπυκνωτής έχει ίδια αποτελεσματικότητα, ίση με:

$$E = \frac{T_o - T_i}{T_{hp} - T_i}$$

Η τελική θερμοκρασία εξόδου από τον τελευταίο συμπυκνωτή είναι:

$$T_o = T_i + E \times (T_{hp} - T_i) \left( \frac{P}{1 + P} \right) \quad (1)$$

Όπου

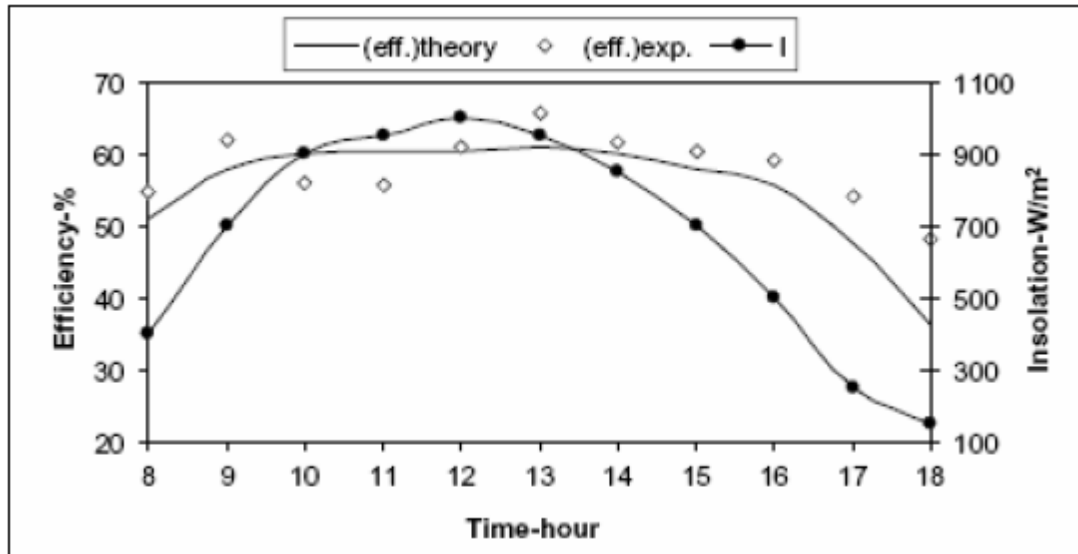
$$P = \frac{A_{hp1} \times U_{hp}}{A_C \times U_{c,o1}}$$

Από τη γνωστή σχέση για τον βαθμό απόδοσης

$$n = \frac{\dot{m} \times C_p \times (T_o - T_i)}{A \times I}$$

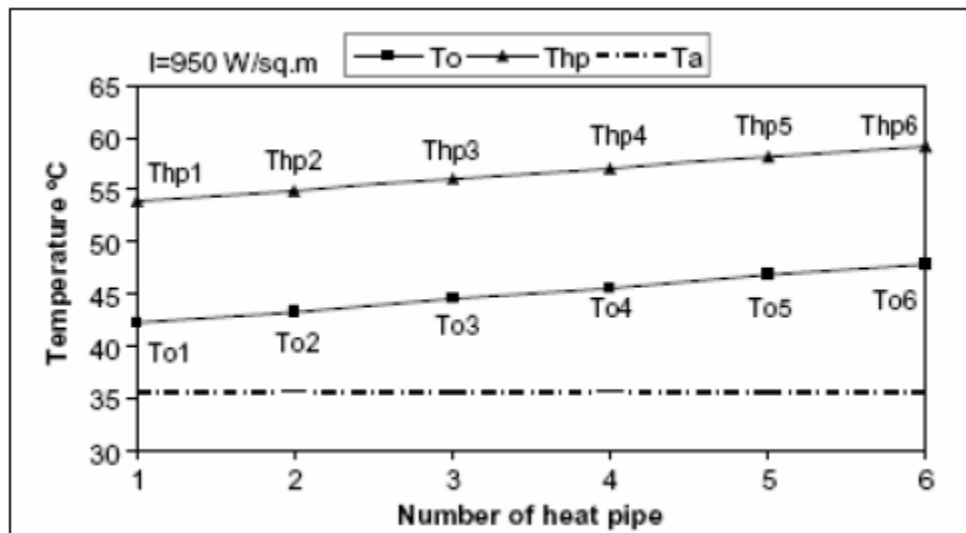
και με θερμοκρασία εξόδου που προκύπτει από τη σχέση (1), καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι ο μέγιστος βαθμός απόδοσης του συλλέκτη είναι γύρω στο 60%



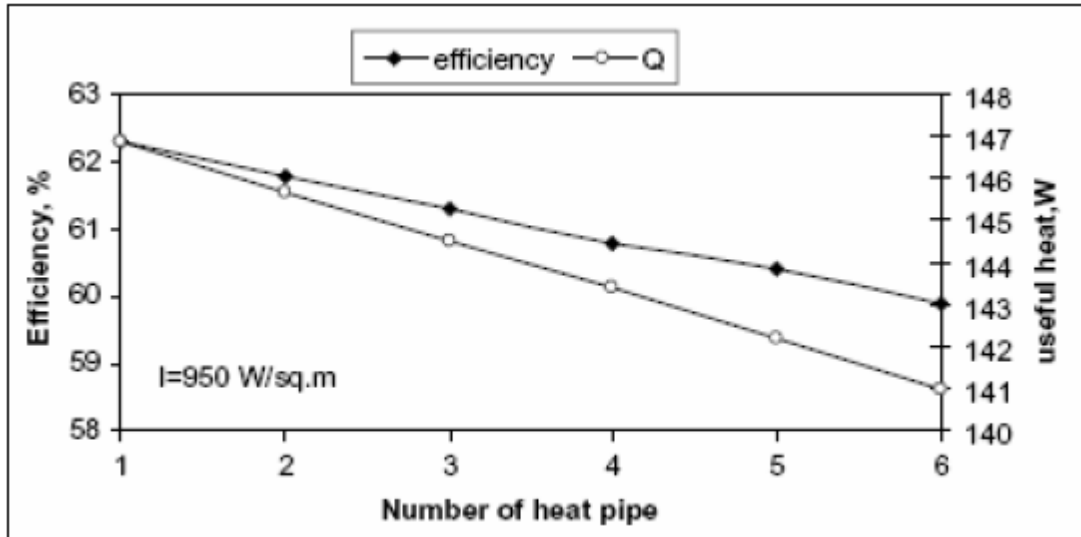


Σχήμα 3.15 Θεωρητικός και πειραματικός βαθμός απόδοσης του συλλέκτη

Είναι φανερό ότι η αύξηση των αριθμών των θερμικών σωλήνων επιφέρει μείωση του βαθμού απόδοσης, γεγονός που εξηγείται από την ολοένα αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου σε κάθε συμπυκνωτή (σχήμα 6).

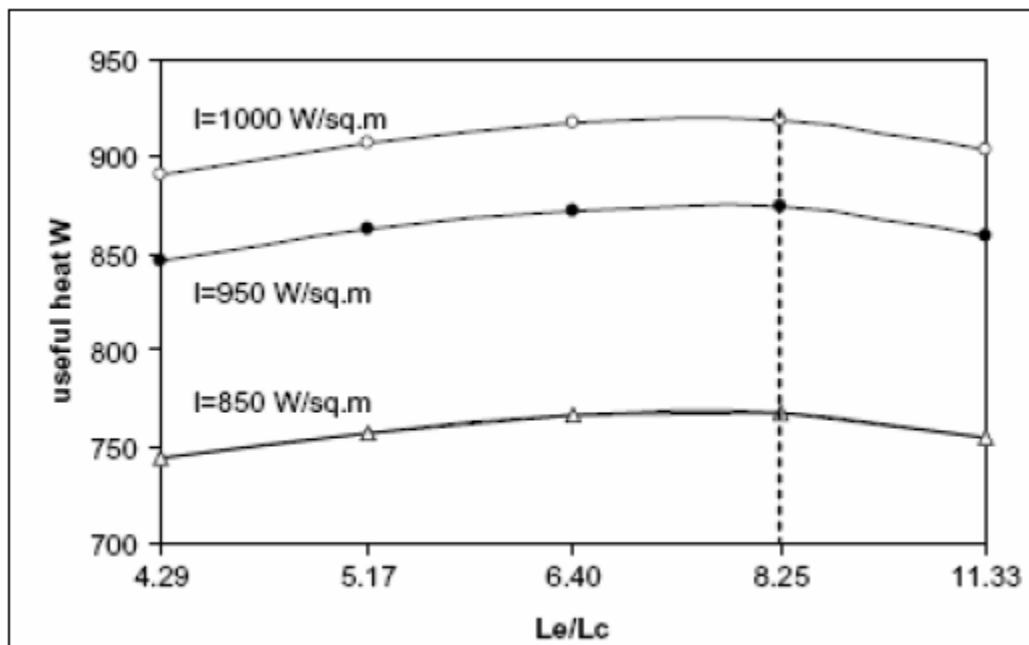


Σχήμα 3.16 Θερμοκρασία εισόδου του ρευστού στον συμπυκνωτή σε συνάρτηση με τον αριθμό των σωλήνων



Σχήμα 3.17 Βαθμός απόδοσης του συλλέκτη σε συνάρτηση με τον αριθμό των σωλήνων

Τέλος, η βέλτιστη αναλογία μήκους εξατμιστή προς μήκους συμπυκνωτή είναι 8.25, ενώ περαιτέρω αύξηση του λόγου αυτού έχει αρνητικές συνέπειες διότι αυξάνοντας την απορροφητική επιφάνεια, αυξάνονται και οι θερμικές απώλειες. [27]



Σχήμα 3.18 Γραφικός προσδιορισμός βέλτιστου λόγου μήκους εξατμιστή προς μήκους συμπυκνωτή

### 3.4.2 ΘΕΡΜΙΚΟΣ ΣΩΛΗΝΑΣ ΛΕΠΤΗΣ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ

Η ανάλυση που ακολουθεί λαμβάνει χώρα σε τρία επιμέρους τμήματα του συλλέκτη: στο καπάκι, το οποίο και παρέχει τη μόνωση του συλλέκτη, στον εξατμιστή και στον συμπυκνωτή. [28]

- Ισολογισμός θερμότητας στο καπάκι

$$Q_{inc} = Q_{abs} + Q_{ref} + Q_{tra}$$

$$Q_{abs} = Q_{tc,ab} + Q_{tc,a}$$

- Ισολογισμός θερμότητας στον εξατμιστή

$$Q_{ab} = Q_{tra} - Q_{ab,tc} - Q_{dw,a}$$

- Ισολογισμός θερμότητας στον συμπυκνωτή

$$Q_{con} = Q_{con,1} + Q_{con,2} + \dots + Q_{con,n} = C_{p,cl} \times \dot{m}_{cl} \times (t_n - t_o)$$

Δείκτες	Επεξήγηση
inc	Προσπίπτουσα ακτινοβολία
abs	Απορροφώμενη
ref	Ανακλώμενη
tra	Μεταδιδόμενη
tc	Για το καπάκι
ab	Απορροφητή
A	Περιβάλλοντος
dw	Κατακόρυφου τοίχου
cl	Ψυκτικού μέσου (εργαζόμενου)
o	Εξωτερική
con	Συναγωγής

Πίνακας 2 Επεξήγηση δεικτών

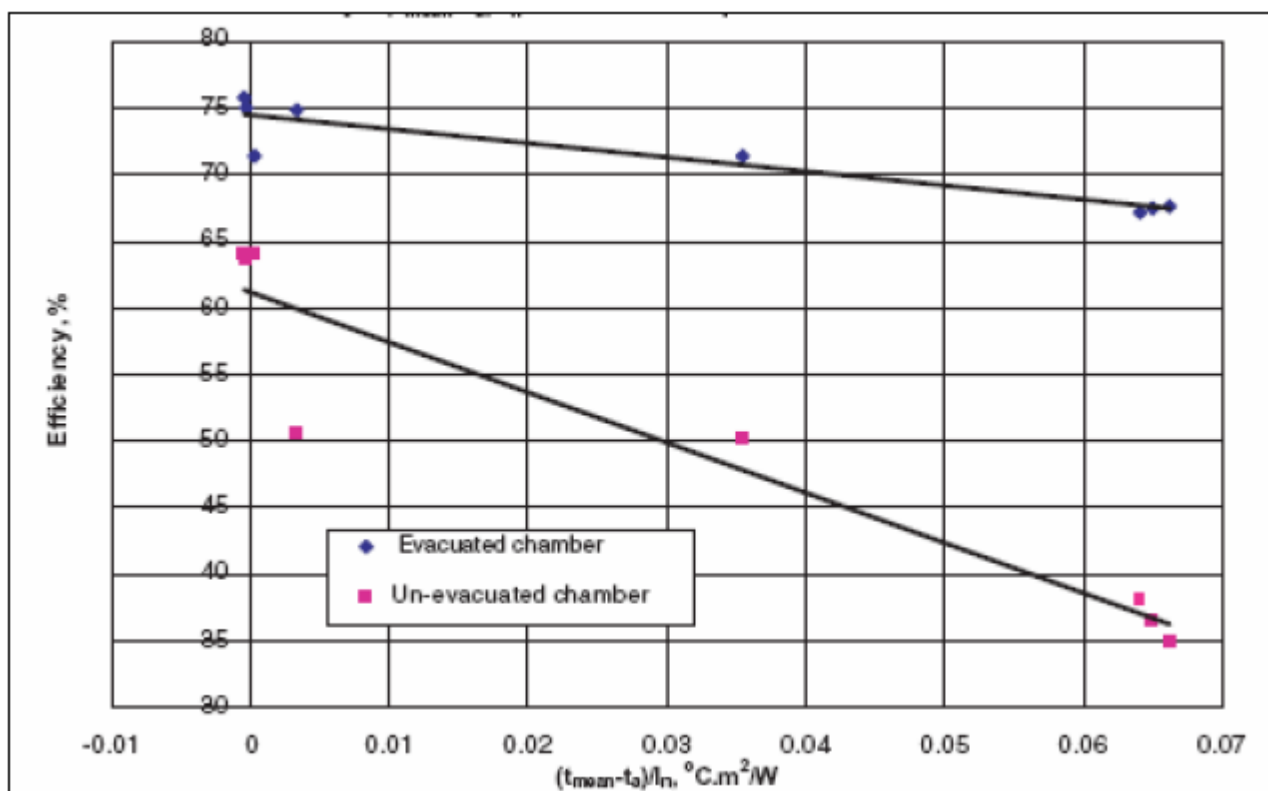
Με τη βοήθεια υπολογιστικού προγράμματος, λύνουμε το παραπάνω σύστημα και καταλήγουμε στην γραφική παράσταση του βαθμού απόδοσης του συλλέκτη σε

$$\frac{t_{mean} - t_a}{I_n}$$

σχέση με το λόγο των θερμοκρασιών

όπου

$$t_{mean} = \frac{(t_o + t_n)}{2}$$



Σχήμα 3.19 Βαθμός απόδοσης μονωμένου και μη μονωμένου συλλέκτη

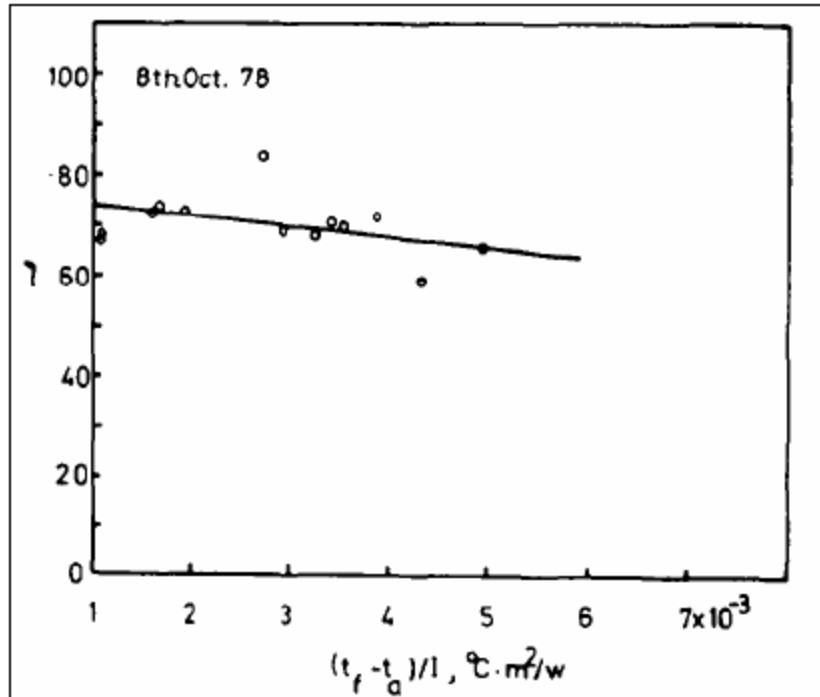
Από το παραπάνω διάγραμμα, γίνεται ολοφάνερη η ανάγκη χρήσης καπακίου για μόνωση του συλλέκτη. Για μη μονωμένο συλλέκτη, ο βαθμός απόδοσης βρίσκεται μεταξύ 38 – 62%, ενώ για μονωμένο μεταξύ 68 – 75%. Και στις δυο όμως περιπτώσεις, η αύξηση του λόγου

$$\frac{t_{mean} - t_a}{I_n}$$

οδήγησε σε μείωση του βαθμού απόδοσης και μάλιστα με γραμμικό τρόπο.[29]

### 3.4.3 ΟΜΟΑΞΟΝΙΚΟΣ ΘΕΡΜΙΚΟΣ ΣΩΛΗΝΑΣ

Για την πληρότητα της μελέτης, παραθέτουμε την γραφική παράσταση του βαθμού απόδοσης του συλλέκτη σε σχέση με το λόγο  $t_f - t_a / I$ .



Σχήμα 3.20 Βαθμός απόδοσης συλλέκτη

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:

### ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ ΚΕΝΟΥ VTC ΚΑΙ ETC

#### 4.1 ΘΕΡΜΙΚΑ ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Η εγκατάσταση ηλιακών θερμικών συστημάτων είναι πλέον πολύ διαδεδομένη, με την Κίνα να κατέχει το 70% των εγκαταστημένων συστημάτων, ενώ η Ευρώπη το 12 % σύμφωνα με τα στοιχεία της Διεθνούς Υπηρεσίας Ενέργειας. Η βασική χρήση των εγκατεστημένων συστημάτων είναι η παραγωγή ζεστού νερού χρήσης. Τα τελευταία δεκαπέντε χρόνια όμως, παρατηρείται στην Ευρώπη η εγκατάσταση μικτών συστημάτων (combi), που παράγουν ζεστό νερό χρήσης αλλά και νερό για τη θέρμανση χώρων. Τα συστήματα που αξιοποιούν τον ήλιο εξασφαλίζοντας τη συνδυασμένη θέρμανση κτιρίων και παραγωγή ζεστού νερού χρήσης ονομάζονται θερμικά ηλιακά συστήματα. Για τα συστήματα αυτά, επίσης, έχει επικρατήσει το όνομα συστήματα combi.

Περιλαμβάνουν βοηθητική συμβατική πηγή ενέργειας όταν η ηλιοφάνεια δεν είναι επαρκής. Δηλ. λειτουργούν συνεισφέροντας στη θέρμανση που παράγεται με τη χρήση άλλων καυσίμων.

##### 4.1.1 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Τα ηλιακά συστήματα θερμαίνουν το νερό χρήσης και το νερό που κυκλοφορεί στο σύστημα θέρμανσης, απορροφώντας διάχυτο ηλιακό φως. Συλλέγουν ηλιακή ενέργεια ακόμη και σε συννεφιασμένες ημέρες και μετατρέπουν τα 2/3 της ηλιακής ακτινοβολίας σε ωφέλιμη ενέργεια. Είναι συστήματα που εκμεταλλεύονται τη θερμική ενέργεια που παράγεται από τους ηλιακούς συλλέκτες. Οι ηλιακοί συλλέκτες παρέχουν θερμοκρασίες 40-150° C, ανάλογα με τον τύπο τους και η λειτουργία τους βασίζεται στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Το ζεστό νερό που συλλέγεται, μεταφέρεται σε θερμοδοχεία, ώστε να διατηρείται σε σταθερή θερμοκρασία. Το σύστημα φροντίζει κατά προτεραιότητα για την πλήρη κάλυψη των αναγκών σε ζεστό νερό χρήσης και στη συνέχεια, εάν υπάρχει περίσσεια ενέργεια, ζεσταίνει το νερό θέρμανσης χώρου. Στην περίπτωση που δεν επαρκεί το ζεστό νερό για τη θέρμανση του χώρου, τότε τίθεται σε λειτουργία το συμβατικό σύστημα θέρμανσης.

Η ιδιαιτερότητά τους βρίσκεται στο ότι λειτουργούν συνεισφέροντας στη θέρμανση που παράγεται με τη χρήση άλλων καυσίμων και όχι καταργώντας την. Μπορούν να συνδυαστούν με οποιαδήποτε συμβατική πηγή ενέργειας (fancoils, ενδοδαπέδια θέρμανση, καυστήρες πετρελαίου ή φυσικού αερίου) ή ανανεώσιμη πηγή ενέργειας (αντλίες θερμότητας, καυστήρες βιομάζας), ενώ ενσωματώνονται και σε υφιστάμενο σύστημα, αρκεί να υπάρχει διαθέσιμος χώρος. Το εργαζόμενο μέσο στους συλλέκτες

θερμαίνεται σε θερμοκρασίες 50-60ο C, θερμοκρασίες που μπορούν να επιτευχθούν ακόμα και με ελάχιστη ηλιοφάνεια.

#### 4.1.1.1 ΜΕΡΗ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Το ηλιακό σύστημα αποτελείται από:

1. Τους ηλιακούς συλλέκτες. (τοποθετούνται στο δώμα ή τη στέγη του κτιρίου με νότιο προσανατολισμό και κλίση, σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο, ίση με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου εγκατάστασης. Μικρή απόκλιση της τάξης των 15° για τον προσανατολισμό και 5° για την κλίση δεν μειώνουν σοβαρά την απόδοσή τους).

*Ο ηλιακός συλλέκτης με σωλήνες κενού, χρησιμοποιείται για θερμοκρασίες > 93ο C.*

- Τα πλεονεκτήματα των ηλιακών συλλεκτών κενού είναι τα εξής:
- Μπορεί να συνδυαστεί και με άλλες μορφές ενέργειας και να παρ έχει θέρμανση σε χώρους.
- Εξοικονομείται μέχρι και 80% ηλεκτρική ενέργεια ή πετρέλαιο για τη θέρμανση του νερού τόσο σε κατοικίες, όσο και βιοτεχνίες, ξενοδοχεία και πισίνες.
- Οι συλλέκτες αυτού του είδους αντέχουν σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες και σε ακραίες καιρικές συνθήκες.
- Λειτουργούν αποδοτικά σε όποιο σημείο και αν τοποθετηθούν και σε όλες τις κλίσεις.
- Έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής και μέσα σε δύο λεπτά αρχίζουν να λειτουργούν όταν επικρατούν συνθήκες κανονικής ηλιοφάνειας.
- Έχει άριστη αισθητική για αρχιτεκτονικές εφαρμογές.

Τα μειονεκτήματα των ηλιακών συλλεκτών κενού είναι τα εξής:

- Υψηλό κόστος
- Πολύπλοκη διαδικασία κατασκευής
- Ευαίσθητοι
- Μεγαλύτερη απόδοση σε ψυχρά κλίματα

*Εφαρμογές:*

- Δεν συνιστάται σε κατοικίες, αφού το καλοκαίρι η θερμοκρασία στο εσωτερικό του ξεπερνά τους 300°C
- Κυρίως χρησιμοποιείται σε εφαρμογές, όπου απαιτούνται θερμοκρασίες νερού μεγαλύτερες των 80°C (ηλιακός κλιματισμός, βιομηχανία).

*Λειτουργία:*

Μια εγκατάσταση παραγωγής ζεστού νερού με ηλιακούς συλλέκτες μπορεί να είναι ανοιχτού ή κλειστού κυκλώματος. Η εγκατάσταση ανοιχτού κυκλώματος δεν είναι διαδεδομένη στη χώρα μας.

Στην εγκατάσταση κλειστού κυκλώματος το νερό χρήσης δεν ρέει μέσα στο συλλέκτη, αλλά βρίσκεται αποθηκευμένο στο μπόιλερ, ενώ η μεταφορά θερμικής ενέργειας από το συλλέκτη στο μπόιλερ γίνεται με τη βοήθεια ενός άλλου ειδικού υγρού,

30.000 φορές θερμοευαίσθητο από τον υδράργυρο και που δεν χρειάζεται συμπλήρωμα ή αντικατάσταση ποτέ, πλήρως διαχωρισμένο από το νερό χρήσης.

Με απλά λόγια, η λειτουργία του ηλιακού συλλέκτη με σωλήνες κενού έχει ως εξής: όταν προσπίπτει η ηλιακή ακτινοβολία ένα μέρος του θερμικού αυτού υγρού εξαερώνεται. Ο ατμός μετακινείται προς τα πάνω, φτάνει στον ανταλλακτήρα και μεταδίδει θερμότητα στο νερό που βρίσκεται στον οριζόντιο σωλήνα του συλλέκτη.

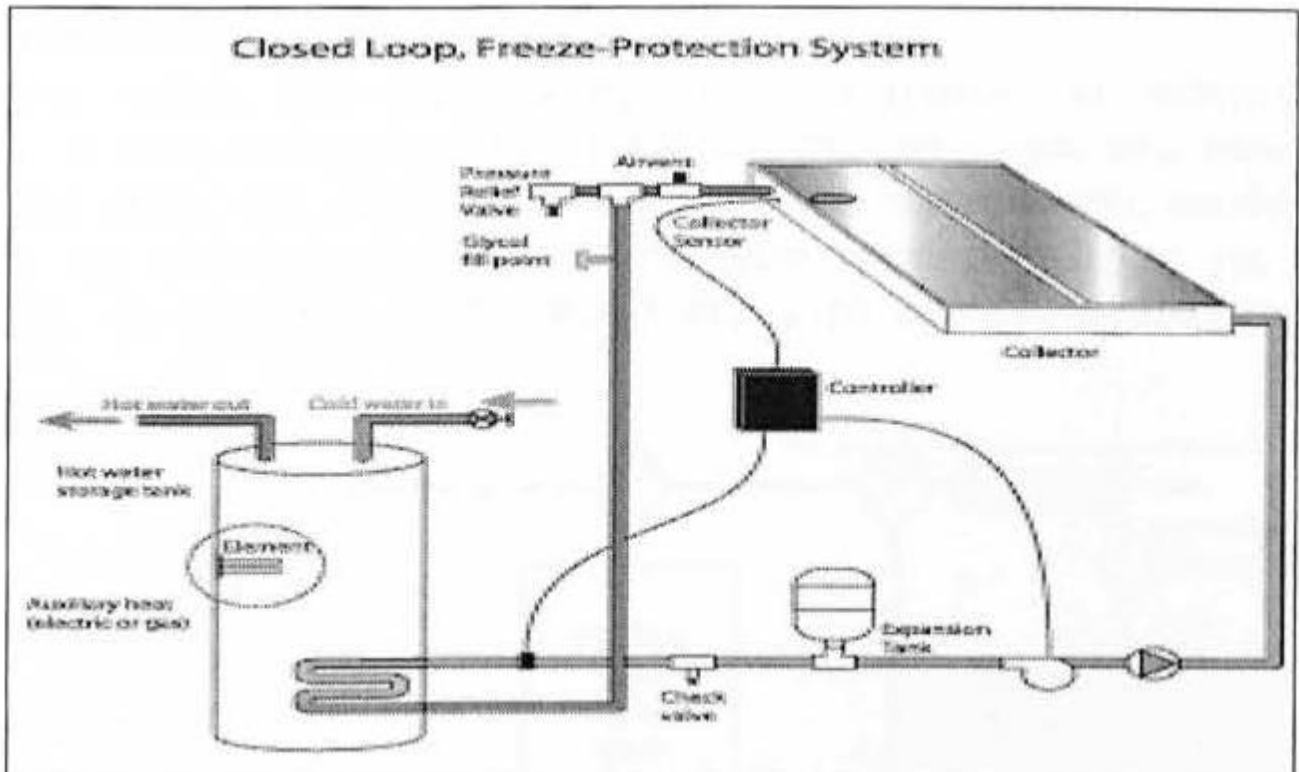
2. Δύο δεξαμενές νερού (boiler): μία για το ζεστό νερό χρήσης και μία για το νερό θέρμανσης χώρου. Σήμερα είναι πιο διαδεδομένο να χρησιμοποιούμε μια δεξαμενή νερού (boiler tank in tank). Η δεξαμενή ονομάζεται και θερμοδοχείο. Το θερμοδοχείο αποτελεί την «καρδιά» του ηλιακού συστήματος και πρέπει να είναι καλά μονωμένο και να βοηθά στη διαστρωμάτωση της θερμοκρασίας του νερού στο εσωτερικό του. Η χωρητικότητά του εξαρτάται από το μέγεθος του συλλέκτη και φυσικά από τις απαιτήσεις του ιδιοκτήτη.

Πολλές φορές ο εναλλάκτης θερμότητας δεν είναι με τη μορφή σερπαντίνας, αλλά η δεξαμενή έχει διπλό τοίχωμα όπου κυκλοφορεί το θερμικό υγρό που μεταδίδει στο νερό τη θερμότητα.

Όταν το θερμοδοχείο είναι συναρμολογημένο επάνω στη βάση του συλλέκτη και βρίσκεται ψηλότερα απ' αυτόν, με αποτέλεσμα η ροή του ειδικού υγρού στο κλειστό κύκλωμα να γίνεται με φυσικό τρόπο, τότε λέμε ότι έχουμε κλειστό κύκλωμα με φυσική ροή. Το σύστημα αυτό είναι εύκολο ως προς την τοποθέτηση, απαιτεί λιγότερη συντήρηση και είναι οικονομικότερο.

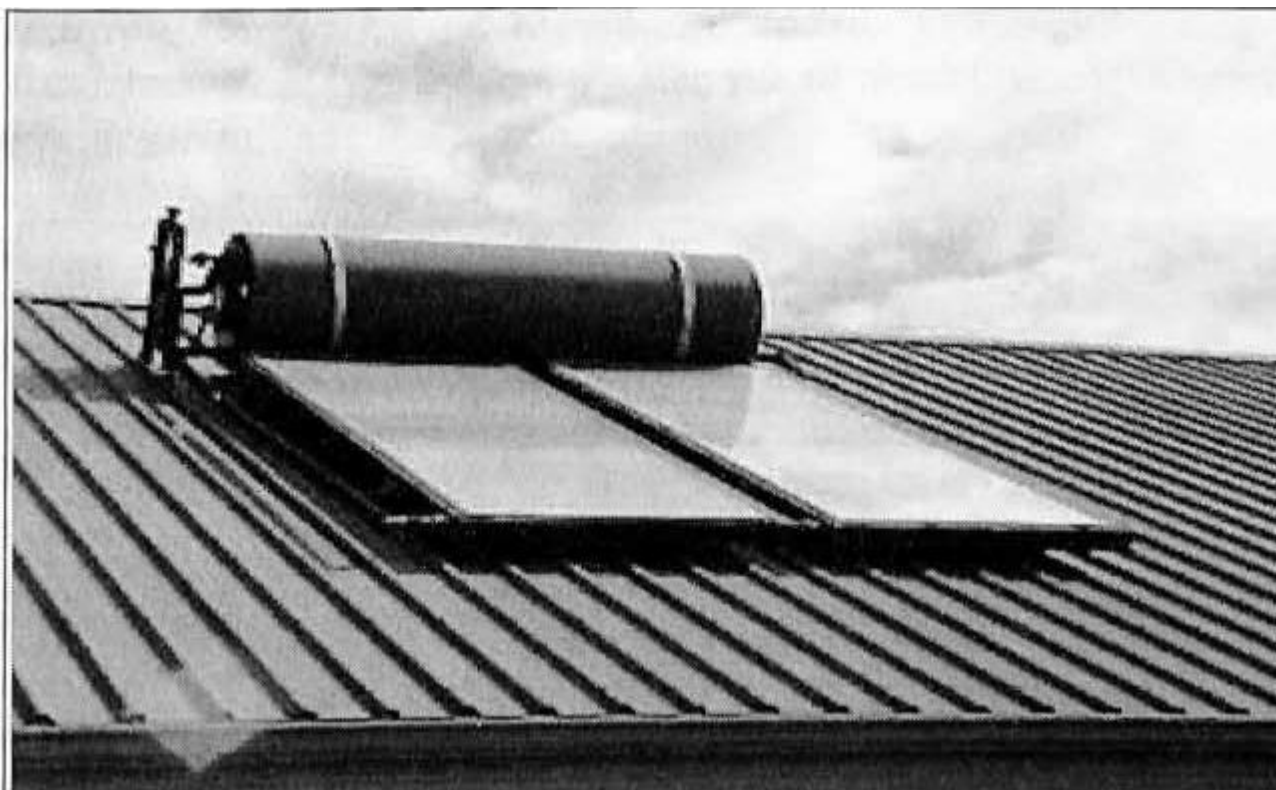
Τα συστήματα με εξαναγκασμένη κυκλοφορία από την άλλη, αν και ακριβότερα, μας επιτρέπουν την τοποθέτηση του μπόιλερ στο υπόγειο, πράγμα που είναι καλό τόσο για λόγους αισθητικής (δεν υπάρχει αντί-αισθητικό μπόιλερ στην οροφή του κτιρίου) και αφετέρου μας επιτρέπουν την εύκολη σύνδεσή του με το υπάρχον δίκτυο θέρμανσης και τον απόλυτο έλεγχο της εγκατάστασης από τον ελεγκτή θέρμανσης.





Σχήμα 4.1 Αναπαράσταση συστήματος θέρμανσης

Πέντε τύποι συστημάτων ηλιακής ενέργειας μπορούν να χρησιμοποιούνται για τη θέρμανση κατοικιών και την παροχή ζεστού νερού: ο θερμοσίφωνας, το ICS (Integrated Collector Storage), η άμεση κυκλοφορία, η έμμεση και η αέρια. Οι δύο πρώτοι τύποι ονομάζονται παθητικά συστήματα καθώς καμία αντλία δε δουλεύει, ενώ οι άλλες ονομάζονται ενεργά συστήματα επειδή μια αντλία ή ένας ανεμιστήρας χρησιμοποιείται για να κυκλοφορεί το ρευστό.

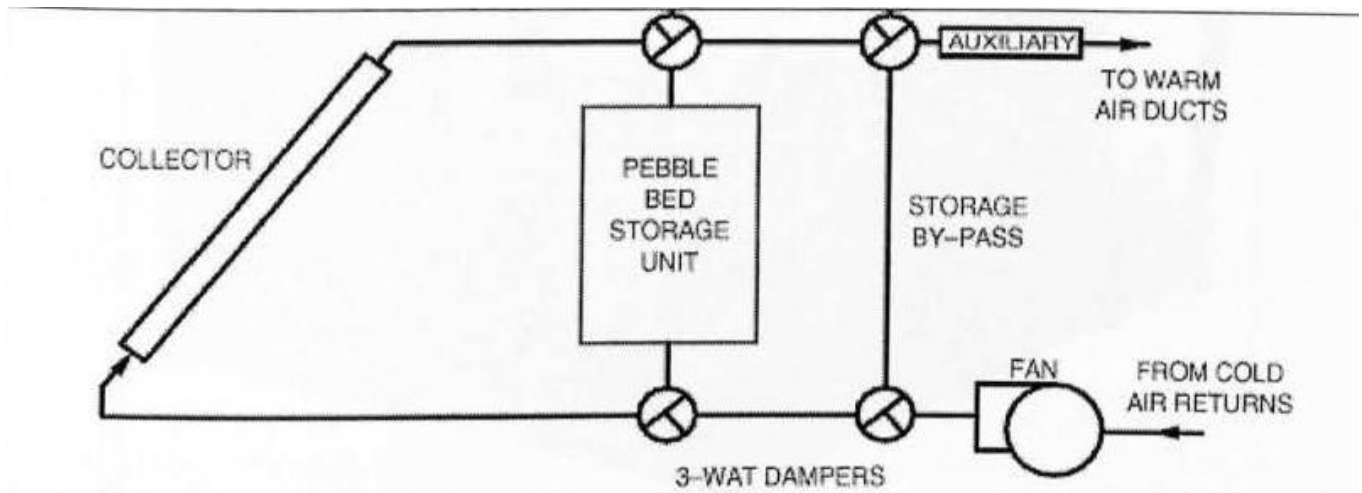


Σχήμα 4.2 Επίπεδος συλλέκτης σε βιομηχανία

Όλα αυτά τα συστήματα προσφέρουν σημαντικά οικονομικά οφέλη με το χρόνο αποπληρωμής να εξαρτάται από τον τύπο του καυσίμου που αντικαθιστά και κυμαίνεται μεταξύ των 4 ετών (για την ηλεκτρική ενέργεια) και 7 ετών (για πετρέλαιο ντίζελ). Αυτοί οι χρόνοι αποπληρωμής εξαρτώνται από διάφορους οικονομικούς δείκτες, όπως είναι τα ποσοστά πληθωρισμού και οι τιμές καυσίμων που ισχύουν στη χώρα.

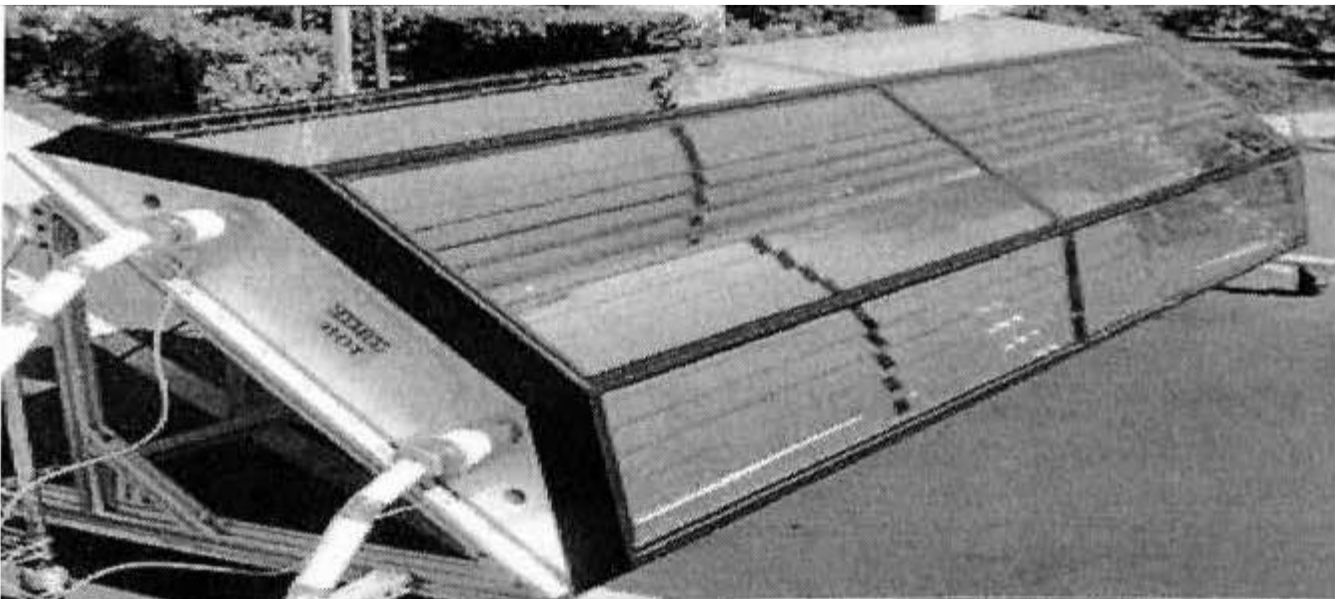
## 4.2 ΗΛΙΑΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΓΙΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΚΑΙ ΨΥΞΗ

Υπάρχουν επίσης δύο κύριες κατηγορίες συστημάτων, τα παθητικά και τα ενεργητικά. Ο όρος παθητικό σύστημα εφαρμόζεται για κτίρια που περιλαμβάνουν αναπόσπαστο μέρος των στοιχείων του κτιρίου, για απορρόφηση, αποθήκευση και διοχέτευση της ηλιακής ενέργειας και έτσι μειώνονται οι ανάγκες για βοηθητική ενέργεια για τη θέρμανση. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούνται ηλιακοί συλλέκτες.



Σχήμα 4.3 Ηλιακό σύστημα για θέρμανση και ψύξη χώρων

Ο όρος ενεργητικά συστήματα χώρων χρησιμοποιείται για συλλέκτες που χρησιμοποιούνται για τη θέρμανση ενός υγρού, για την αποθήκευση της ηλιακής ενέργειας ώστε να χρησιμοποιηθεί όταν χρειαστεί και τη διανομή της ηλιακής ενέργειας για τη θέρμανση του χώρου με ελεγχόμενο τρόπο. Ένα ολοκληρωμένο σύστημα περιλαμβάνει επιπλέον ανεμιστήρες ή αντλίες για τη μεταφορά της ενέργειας, η οποία αποθηκεύεται ή χρησιμοποιείται άμεσα.



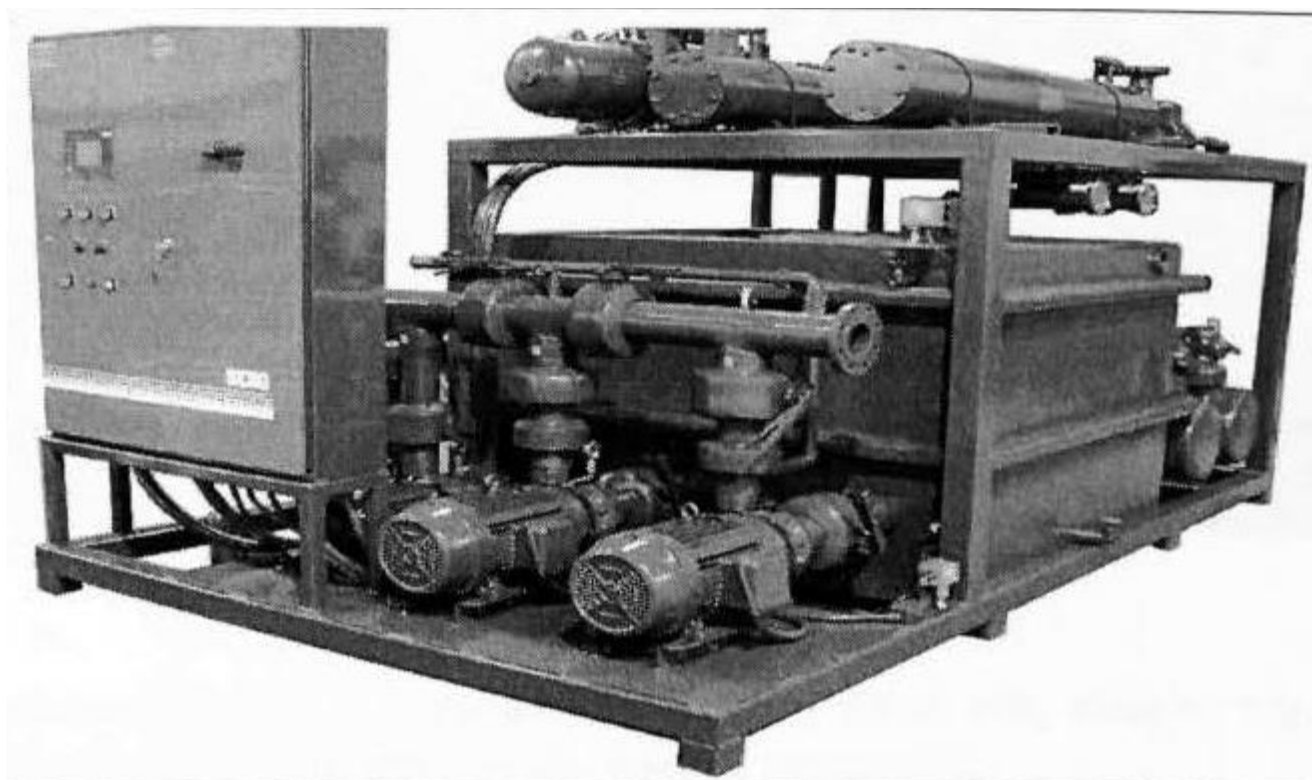
Σχήμα 4.4 Ενεργητικό σύστημα για θέρμανση χώρου

### 4.3 ΗΛΙΑΚΗ ΨΥΞΗ

Η ηλιακή ψύξη περιλαμβάνει δυο βασικές διεργασίες: την παροχή ψύξης για τη συντήρηση τροφίμων και φαρμάκων και για την παροχή ψύξης του χώρου. Τα συστήματα ηλιακής ψύξης συνήθως παρέχουν πολύ χαμηλότερες θερμοκρασίες από ότι τα κλιματιστικά. Οι αρχές λειτουργίας έχουν περιγραφεί στο Κεφάλαιο 2.

### 4.4 ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ

Αρκετές μελέτες έχουν γίνει σχετικά με τη ζήτηση βιομηχανικής θερμότητας και αποτελούν μια από τις ευνοϊκότερες συνθήκες για την ανάπτυξη της ηλιακής ενέργειας.



Σχήμα 4.5 Σύστημα βιομηχανικής θέρμανσης

Οι πιο σημαντικές βιομηχανικές διαδικασίες που χρησιμοποιούν τη θερμότητα είναι: η αποστείρωση, η παστερίωση, η ξήρανση, η υδρόλυση, η απόσταξη, η εξάτμιση, το πλύσιμο και ο καθαρισμός, καθώς και ο πολυμερισμός. Το κόστος των συλλεκτών στην περίπτωση αυτή μπορεί να είναι μεγάλο, όμως το συγκριτικό κόστος των συλλεκτών ως προς τα καύσιμα που αντικαθιστούν είναι χαμηλό.

## 4.5 ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ

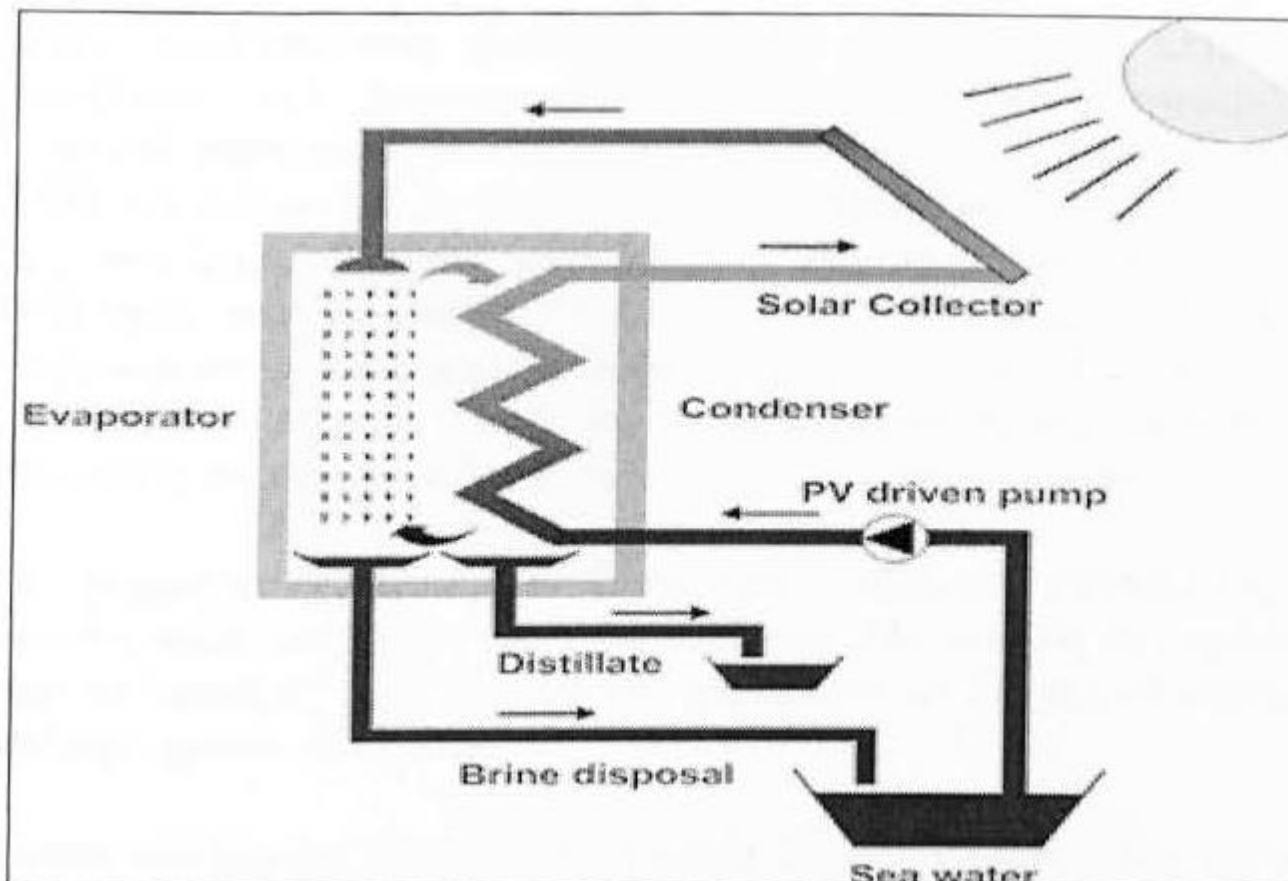
Το νερό είναι μία από τις πιο άφθονες πηγές στη γη, και καλύπτει τα τρία τέταρτα της επιφάνειας του πλανήτη. Περίπου το 97% του νερού της Γης είναι αλμυρό νερό και βρίσκεται στους ωκεανούς, το υπόλοιπο 3% του συνόλου του νερού είναι στις λίμνες και στα ποτάμια, και καλύπτουν τις περισσότερες ανάγκες των ανθρώπων και των ζώων. Ωστόσο, η ταχεία ανάπτυξη του πληθυσμού και της βιομηχανίας, αλλά και η μόλυνση των λιμνών και των ποταμών, έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργείται ζήτημα με την παροχή πόσιμου νερού. Η μόνη λύση που παρέχεται είναι το άφθονο νερό των ωκεανών, το οποίο απαιτεί αφαλάτωση για να είναι σε κατάσταση να χρησιμοποιηθεί από το κοινό.

Η αφαλάτωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί με τη χρήση ενός πλήθους τεχνικών, οι οποίες μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο βασικές κατηγορίες:

1. Διαδικασίες αλλαγής φάσεων ή θερμικές διεργασίες και
2. Διαδικασίες με μεμβράνη ή μονοφασικές διαδικασίες.

Οι διεργασίες αφαλάτωσης απαιτούν μεγάλες ποσότητες ενέργειας για να επιτευχθεί ο διαχωρισμός. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό αφού είναι ένα επαναλαμβανόμενο κόστος, το οποίο λίγες χώρες μπορούν να αντέξουν, καθώς δεν διαθέτει ούτε τις απαραίτητες ποσότητες αποθεμάτων σε καύσιμα, ούτε τα απαραίτητα χρήματα. Ένα ακόμη πρόβλημα που δημιουργείται με τη διαδικασία της αφαλάτωσης είναι ότι μολύνει το περιβάλλον. Ευτυχώς όμως αρκετές χώρες χρησιμοποιούν εναλλακτικές μορφές ενέργειας για τη διαδικασία αυτή.

Η ηλιακή ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη διαδικασία της αφαλάτωσης, προσφέροντας θερμότητα είτε στη διαδικασία αλλαγής φάσεων, είτε στη διαδικασία που χρησιμοποιούνται μεμβράνες. Τα ηλιακά συστήματα αφαλάτωσης ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες: στα άμεσα και έμμεσα. Τα άμεσα συστήματα χρησιμοποιούν την ηλιακή ενέργεια άμεσα για τη διαδικασία της αφαλάτωσης, ενώ τα έμμεσα συστήματα χρησιμοποιούν δυο υποσυστήματα, όπου το ένα χρησιμοποιείται για την συλλογή της ηλιακής ενέργειας και το δεύτερο για τη διαδικασία της αφαλάτωσης. Η συμβατική διαδικασία αφαλάτωσης είναι παρόμοια με την ηλιακή αφαλάτωση αφού χρησιμοποιείται ο ίδιος εξοπλισμός. Η μόνη διαφορά που παρατηρείται είναι ότι στα συμβατικά συστήματα αφαλάτωσης χρησιμοποιείται λέβητας, για τη μετατροπή ενέργειας σε θερμική ή ηλεκτρικό δίκτυο για την παροχή ηλεκτρική ενέργειας, ενώ στα ηλιακά συστήματα χρησιμοποιείται άμεσα η ηλιακή ακτινοβολία.



Σχήμα 4.6 Σκαρίφημα συστήματος αφαλάτωσης

## 4.6 ΗΛΙΑΚΟΙ ΦΟΥΡΝΟΙ

Οι ηλιακοί φούρνοι είναι κατασκευασμένοι από υψηλή συγκέντρωση και, συνεπώς, είναι συλλέκτες υψηλής θερμοκρασίας. Οι ηλιακοί φούρνοι χρησιμοποιούνται κυρίως για τη χημική μετατροπή των υλικών με την απευθείας έκθεση τους σε συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια.[30]

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5:**

### **ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ      ΑΝΑΛΥΣΗ      ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ ΚΕΝΟΥ**

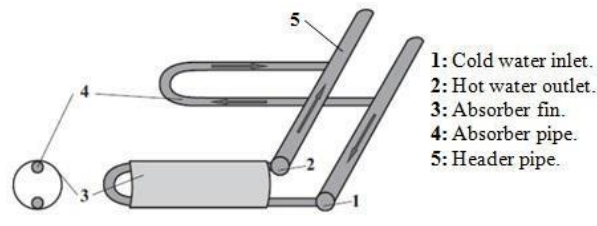
### **ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ**

### **ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ**

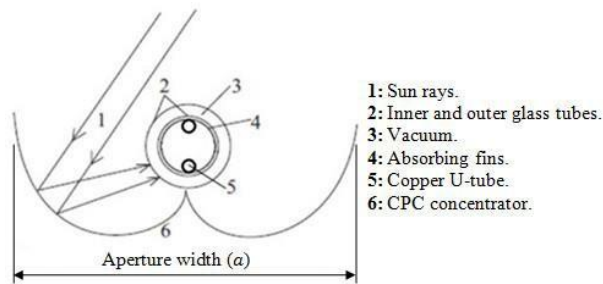
#### **5.1 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ VTC**

##### **5.1.1 ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ**

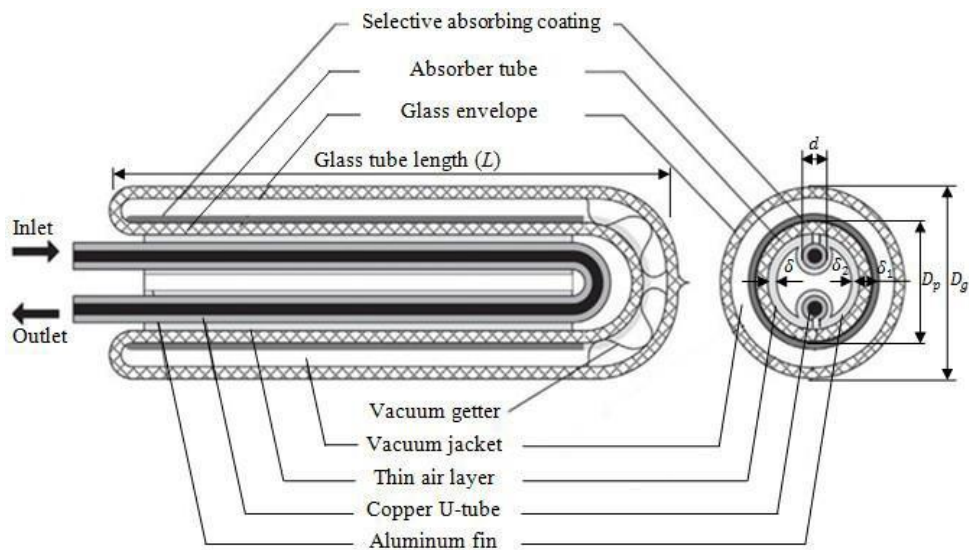
Ο συλλέκτης αποτελείται από ένα χάλκινο σχήματος-U σωλήνα μέσα σε ένα γυάλινο σωλήνα με κενό αέρος. Ο χάλκινος σωλήνας περιβάλλεται από ένα κυλινδρικό πτερύγιο αλουμινίου πιεσμένο πάνω του, που στόχο έχει να ενισχύσει τη μετάδοση θερμότητας μεταξύ της εσωτερικής επιφάνειας του γυάλινου απορροφητή και του χάλκινου σωλήνα U. Η ροή του ρευστού στον συλλέκτη απεικονίζεται στο Σχήμα 5.1. Το εργαζόμενο ρευστό εισέρχεται στο σωλήνα εισόδου του συλλέκτη, κατανέμεται ομοιόμορφα στους σωλήνες U, απορροφά θερμότητα και στο τέλος επιστρέφει στον αγωγό εξαγωγής [3]. Το Σχήμα 5.2 δείχνει ένα σχέδιο του συλλέκτη κενού με το παραβολικό ανακλαστήρα CPC. Μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας προσπίπτει απευθείας στην επιφάνεια του απορροφητήρα, ενώ το υπόλοιπο ανακλάται από το CPC στον γυάλινο σωλήνα απορρόφησης. Η εξωτερική επιφάνεια του γυάλινου κυλίνδρου μεταδίδει τις ακτίνες στον εσωτερικό γυάλινο σωλήνα, ο οποίος οδηγεί την ενέργεια στο πτερύγιο του απορροφητήρα, στη συνέχεια η θερμότητα άγεται από το πτερύγιο στον σωλήνα U του χαλκού και τελικά απορροφάται από το εργαζόμενο μέσο, το οποίο είναι νερό σε αυτή την περίπτωση. Αναλυτική απεικόνιση του σωλήνα κενού και της διατομής του δίδονται στο σχήμα 5.3. Στον Πίνακα 1 δίνονται τα δεδομένα των παραμέτρων του αναλυτικού μοντέλου που εξετάζονται στην παρούσα μελέτη για τον κυλινδρικό γυάλινο ηλιακό συλλέκτη κενού.



Σχήμα 5.1



Σχήμα 5.2



Σχήμα 5.3



Absorbing coating	Absorptivity [-]	0.94
	Emissivity [-]	0.06
Outer glass envelope and absorber glass tube	Outer diameter of glass envelope [m]	0.058
	Outer diameter of absorber tube [m]	0.047
	Glass tube length [m]	1.56
	Aperture width [m]	0.1105
	Thickness of glass [m]	0.0016
	Thermal conductivity of glass [W/(m K)]	1.2
	Transmittance of glass [-]	0.92
Aluminum fin	Thickness [m]	0.0008
	Thermal conductivity [W/(m K)]	220
Copper U-tube	Outer diameter [m]	0.0063
	Thickness [m]	0.0005
	Thermal conductivity [W/(m K)]	370
Header section	Outer diameter of the header pipe [m]	0.016
	Outer diameter of the insulation [m]	0.085
Number of glass tubes		20

Πίνακας 1

### 5.1.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Η απορροφούμενη ηλιακή ενέργεια,  $S$ , είναι ίση με την προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια μειωμένη κατά τις οπτικές απώλειες και είναι:

$$S = \eta_o \cdot G_t \cdot A_{ap} \quad (0)$$

Όπου  $\eta_o$  είναι ο οπτικός βαθμός απόδοσης και  $G_t$  είναι η στιγμιαία προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στο επίπεδο του συλλέκτη. Η σχέση για την περιοχή του διαφράγματος είναι σε περίπτωση συλλέκτη με CPC  $A_{ap} = \alpha \cdot L$  ή  $A_{ap} = D_g \cdot L$  στην περίπτωση χωρίς CPC. Επιπλέον, η καθαρή ροή θερμότητας που μεταφέρεται στο εργαζόμενο μέσο είναι ίση με τη διαφορά μεταξύ  $S$  και των θερμικών απωλειών λόγω ακτινοβολίας, αγωγής και συναγωγής. Διεξάγεται μονοδιάστατη ανάλυση για το πτερύγιο μιας μονάδας του γυάλινου κυλινδρικού ηλιακού συλλέκτη κενού. Η ανάλυση επεκτείνεται και στον υπολογισμό της μεταβολής πληθώρας παραμέτρων στην ακτινική και διαμήκη κατεύθυνση. Γίνονται οι ακόλουθες παραδοχές:

(α) η θερμική αντίσταση του εξωτερικού πάχους του γυάλινου σωλήνα είναι αμελητέα

(β) θεωρείται ότι έχει επιτευχθεί τέλειο κενό μεταξύ των δύο γυάλινων σωλήνων, επομένως η αγωγιμότητα του αερίου αγνοείται

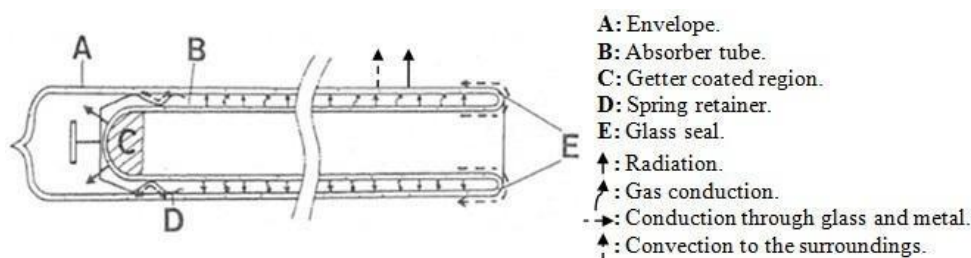
(γ) η ροή θερμότητας κατά μήκος της περιφερειακής κατεύθυνσης θεωρείται σταθερή, αν και στην πράξη η ροή θερμότητας δεν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη

(δ) θεωρείται ένα στρώμα αέρα πάχους 0,5 mm μεταξύ του πτερυγίου αλουμινίου και του γυάλινου σωλήνα (απορροφητής) για να προσαρμόσει το ακανόνιστο διάστημα επαφής

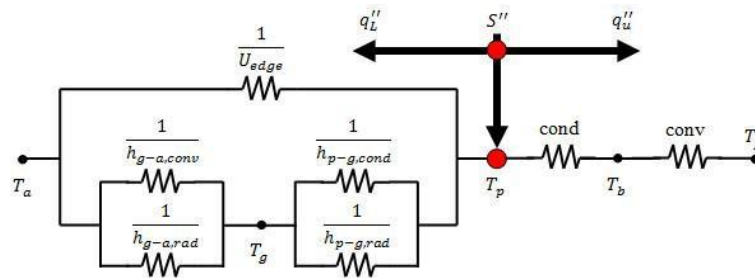
(ε) θεωρούνται σταθερές συνθήκες και κανονικές γωνίες πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας.

Προκειμένου να αναπτυχθεί ένα ολοκληρωμένο και κατανοητό μαθηματικό μοντέλο του συλλέκτη, διεξάγεται λεπτομερής θερμική ανάλυση. Το Σχήμα 5.4 δείχνει τους μηχανισμούς της μεταφοράς της θερμικής ενέργειας από τον (εξωτερικό) σωλήνα απορρόφησης στο γυάλινο περίβλημα και από το περίβλημα στο περιβάλλον. Το σχήμα 5.5 δίνει το ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα που περιγράφει συνολικά τη ροή θερμότητας στο συλλέκτη. Οι θερμικές απώλειες προκύπτουν λόγω αγωγιμότητας από τους μονωμένους σωλήνες κεφαλής της εγκατάστασης, όταν η μέση θερμοκρασία του υγρού ( $T_f$ ) είναι μεγαλύτερη του περιβάλλοντος ( $T_a$ ) και λόγω αγωγιμότητας και ακτινοβολίας από τον σωλήνα απορρόφησης, όταν η μέση θερμοκρασία της επιλεκτικής απορροφητικής επιφάνειας ( $T_p$ ) είναι μεγαλύτερη από το περιβάλλον. Οι απώλειες θερμότητας από τον απορροφητή στη συνέχεια μεταφέρονται στο περιβάλλον με αγωγή και με ακτινοβολία. Όλες οι απώλειες αναφέρονται στον απορροφητή. Από το σχήμα 5 μπορεί να βρεθεί ότι η απορροφούμενη ηλιακή ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας ( $q_u''$ ) είναι το άθροισμα της καθαρής ροής θερμότητας που αποκτά το εργαζόμενο ρευστό και των θερμικών απωλειών ανά μονάδα επιφάνειας του απορροφητή ( $q_l''$ ).

$$S'' = q_u'' + q_l''$$



Σχήμα 5.4



Σχήμα 5.4

### 5.1.3 ΣΥΝΟΛΙΚΕΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Οι θερμικές απώλειες ανά μονάδα επιφάνειας του απορροφητή και ο συνολικός συντελεστής απώλειας ( $U_L$ ) μπορούν να οριστούν, αντίστοιχα, από τις σχέσεις:

$$q_L'' = U_L (T_p - T_a) \quad (3)$$

$$U_L = U_{top} + U_{edge} \quad (4)$$

Ο συντελεστής θερμικής απώλειας των άκρων του σωλήνα κεφαλής μπορεί να δοθεί από τη σχέση:

$$U_{edge} = 2\pi\lambda_{ins} / [l \cdot \ln(d_{ins,ext}/d_{ins,int})],$$

όπου  $\lambda_{ins}$  είναι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας της μόνωσης του σωλήνα κεφαλής,  $l$  είναι το μήκος του σωλήνα κεφαλής στον ένα σωλήνα  $U$  και  $d_{ins,int}$ ,  $d_{ins,ext}$  οι εσωτερικές και εξωτερικές διαμέτροι της μόνωσης αντίστοιχα. Ο συντελεστής απωλειών κορυφής από τον σωλήνα απορρόφησης στο περιβάλλον, μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$U_{top} = \left[ 1 / (h_{p-g,cond} + h_{p-g,rad}) + 1 / (h_{g-a,conv} + h_{g-a,rad}) \right]^{-1} \quad (5)$$

$h_{g-a,conv}$  είναι ο συντελεστής συναγωγής από τον εξωτερική επιφάνεια του γυάλινου σωλήνα στο περιβάλλον.

$h_{p-g,rad}$  είναι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας λόγω ακτινοβολίας μεταξύ του απορροφητή και του γυάλινου σωλήνα

$h_{p-g,cond}$  είναι ο συντελεστής αγωγής στον μεταλλικό μηχανισμό που συγκρατεί απορροφητή και γυάλινο σωλήνα (η υπολογιζόμενη τιμή του είναι  $1,8 \text{ W / (mK)}$ )

$h_{g-a,rad}$  είναι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας λόγω ακτινοβολίας μεταξύ του εξωτερικού γυάλινου σωλήνα και του περιβάλλοντος χώρου.

Το ενεργειακό ισοζύγιο δίνει:

$$U_{top} (T_p - T_a) = (h_{p-g,cond} + h_{p-g,rad}) (T_p - T_g) = (h_{g-a,conv} + h_{g-a,rad}) (T_g - T_a) \quad (6)$$

Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας λόγω ακτινοβολίας μεταξύ του ομόκεντρου απορροφητή και των εξωτερικών γυάλινων σωλήνων μπορεί να δοθεί από την εξίσωση (7), [32].

$$h_{p-g,rad} = \frac{\sigma \varepsilon_p}{1 + \frac{\varepsilon_p D_p}{\varepsilon_g D_g} (1 - \varepsilon_g)} (T_p^2 + T_g^2) (T_p + T_g) \quad (7)$$

όπου:  $\varepsilon_p$  είναι ο συντελεστής εκπομπής της επιλεκτικής απορροφητικής επικάλυψης,  $\varepsilon_g$  είναι ο συντελεστής εκπομπής της εσωτερικής επιφάνειας του εξωτερικού γυάλινου σωλήνα και  $\sigma$  η σταθερά Stefan Boltzmann.  $D_p$  είναι η εξωτερική διάμετρος του σωλήνα απορρόφησης και  $D_g$  είναι η εσωτερική διάμετρος του εξωτερικού γυάλινου σωλήνα. Θεωρώντας τον εξωτερικό γυάλινο σωλήνα ως μικρό κυρτό αντικείμενο που περιβάλλεται από κάτι πολύ μεγαλύτερο (τον ουρανό), ο συντελεστής ακτινοβολίας προς τον ουρανό  $h_{g-a,rad}$  μπορεί να γραφτεί ως

$$h_{g-a,rad} = \sigma \varepsilon_g (T_g^2 + T_{sky}^2) (T_g + T_{sky}) \quad (8)$$

Η θερμοκρασία του ουρανού δίνεται από τον τύπο  $T_{sky} = T_a - 6$  [31]

Ο συντελεστής συναγωγής είναι  $h_{g-a,conv} = Nu_a \lambda_a / D_g$ , όπου ο αριθμός Nusselt ( $Nu_a$ ) δίνεται από την εξίσωση (9) [3]

$$Nu_a = \begin{cases} 0,4 + 0,54Re_a^{0,52}, & 0,1 < Re_a \leq 1.000 \\ 0,3Re_a^{0,6}, & 1.000 < Re_a < 50.000 \end{cases} \quad (9)$$

όπου  $Re_a = u_a D_g / \nu_a$ , είναι ο αριθμός Reynolds της ταχύτητας του ανέμου ( $u_a$ ), με βάση τη διάμετρο του εξωτερικού γυάλινου σωλήνα. Οι ιδιότητες του αέρα υπολογίζονται στην θερμοκρασία του αέρα περιβάλλοντος ( $T_a$ ).

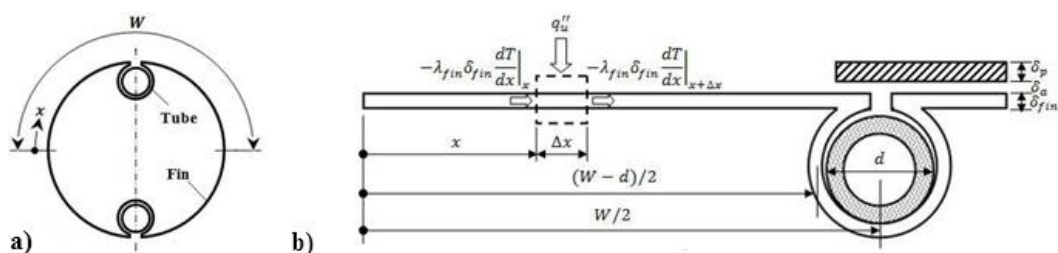
### 5.1.4 ΚΑΘΑΡΗ ΩΦΕΛΙΜΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Θεωρούμε τη διαμόρφωση του πτερυγίου και του σωλήνα όπως φαίνεται στο σχήμα 5.6-a, b. Η περίμετρος του μισού πτερυγίου  $W = \pi[D_p - 2(\delta_p + \delta_a)]/2$ ,  $d$  είναι η διάμετρος του σωλήνα και το πάχος του σωλήνα απορρόφησης, του στρώματος αέρα, του πτερυγίου αλουμινίου είναι  $\delta_p, \delta_a, \delta_{fin}$  αντίστοιχα. Για μήκος του πτερυγίου  $(W-d)/2$ , γίνεται ενεργειακός ισολογισμός σε μια στοιχώδη περιοχή (εμβადόν), πλάτους  $\Delta x$  και μήκους κατά την κατεύθυνση της ροής που δίνει την εξίσωση (10) [32].

Η επίλυση της εξίσωσης (10) γίνεται αριθμητικά χρησιμοποιώντας τις παρακάτω δύο οριακές συνθήκες:

$$dT/dx|_{x=0} = 0 \quad \text{και} \quad T|_{x=(W-d)/2} = T_b$$

( $T_b$  θερμοκρασία βάσης πτερυγίου), με αποτέλεσμα την εξίσωση (11) [3].



Σχήμα 5.6

$$-\lambda_{fin} \delta_{fin} \left( \frac{dT}{dx} \right)_x - \left[ -\lambda_{fin} \delta_{fin} \left( \frac{dT}{dx} \right)_{x+\Delta x} \right] + q_u'' \Delta x = 0 \quad (10)$$

όπου  $\lambda_{fin}$  είναι η θερμική αγωγιμότητα του πτερυγίου αλουμινίου.

$$T(x) = \frac{\cosh(mx)}{\cosh[m(W-d)/2]} \left( T_b - T_a - \frac{S''}{U_L} \right) + T_a + \frac{S''}{U_L} \quad (11)$$

$$\text{όπου } m = \sqrt{U_L / [\lambda_{fin} \delta_{fin} (1 + U_L / C_B)]}$$

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (11) και εφαρμόζοντας το νόμο του Fourier στη βάση του πτερυγίου τόσο για τη δεξιά όσο και για την αριστερή πλευρά γύρω από το σωλήνα, η ροή θερμότητας ανά μονάδα μήκους του σωλήνα δίνεται από:

$$q'_{fin} = \frac{(W-d)F[S'' - U_L(T_b - T_a)]}{1 + U_L/C_b} \quad (12)$$

$C_b = [\delta_p/\lambda_g + \delta_a/\lambda_a]^{-1}$  είναι η συνδυασμένη αγωγιμότητα για γυαλί (θερμική αγωγιμότητα  $\lambda_g$ ) και αέρα (θερμική αγωγιμότητα του  $\lambda_a$ ) και

$$F = \tanh[m(w-d/2)]/[m(w-d/2)].$$

Η ροή της θερμότητας που απορροφάται πάνω από την περιοχή του σωλήνα ανά μονάδα μήκους δίνεται από την εξίσωση. (13). Η καθαρή ωφέλιμη ποσότητα θερμότητας ανά μονάδα μήκους για τον συλλέκτη δίνεται από την εξίσωση. (14), το οποίο είναι το άθροισμα των εξισώσεων (12) και (13). Αυτή η ενέργεια πρέπει να μεταφέρεται στο εργαζόμενο μέσο (μέση τιμή της θερμοκρασίας  $T_f$ ), Εξ. (15).

$$q'_{tube} = \frac{d[S'' - U_L(T_b - T_a)]}{1 + U_L/C_b} \quad (13)$$

$$q'_u = q'_{fin} + q'_{tube} = \frac{[(W-d)F + d][S'' - U_L(T_b - T_a)]}{1 + U_L/C_b} \quad (14)$$

$$q'_u = \frac{T_b - T_f}{\left[ 1 / (\pi d_1 h_{f,conv}) + 1 / C_B \right]} \quad (15)$$

$h_{f,conv}$  είναι ο συντελεστής συναγωγής για τη ροή εντός του χάλκινου σωλήνα  $U$ .  $C_B$  είναι η συναγωγιμότητα στην επαφή του πτερυγίου με τον σωλήνα. Η διαδικασία υπολογισμού του  $C_B$  είναι αρκετά σύνθετη λόγω της μη κανονικότητας της απόστασης μεταξύ των στοιχείων που έρχονται σε επαφή. Στο παρόν μοντέλο, η τιμή του  $C_B$  υπολογίζεται βάσει τριών θερμικών αντιστάσεων, της αντίστασης της επιφάνειας αλουμινίου, της αντίστασης του πάχους του χάλκινου σωλήνα και της αντίστασης λόγω της επαφής αυτών ( $R'$ )

$$C_B = \left[ \frac{\ln(d_2/d)}{2\pi\lambda_{fin}} + R' + \frac{\ln(d/d_1)}{2\pi\lambda_{tube}} \right]^{-1} \quad (16)$$

Η θερμική αντίσταση επαφής  $R'$  λαμβάνεται από [33] υποθέτοντας μέτρια τραχύτητα για την επιφάνεια επαφής.  $\lambda_{ins}$  είναι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του χάλκινου σωλήνα,  $d_1$  και  $d$  είναι η εσωτερική και η εξωτερική διάμετρος του σωλήνα χαλκού αντίστοιχα και  $d_2$  είναι η εξωτερική διάμετρος του πτερυγίου που περιβάλλει τον σωλήνα. Η τιμή του  $C_B$  υπολογίζεται ότι είναι  $90,39 \text{ W / (mK)}$ . Το καθαρό ωφέλιμο ποσό θερμότητας στον συλλέκτη προκύπτει από την επίλυση των εξισώσεων (14) και (15) για  $T_b$

$$q'_u = WF' \left[ S'' - U_L (T_f - T_a) \right] \quad (17)$$

$F'$  είναι ο παράγοντας απόδοσης του συλλέκτη, που δίνεται από την εξίσωση (18). Για τον υπολογισμό της  $T_p$  χρησιμοποιείται η εξίσωση (19). Ο συντελεστής θερμικής συναγωγιμότητας είναι  $h_{f,conv} = Nu_f \lambda_f / d_1$ , όπου ο αριθμός Nusselt ( $Nu_f$ ) δίνεται από την εξίσωση (20) [34].

$$F' = \frac{1}{WU_L} \left[ \frac{1 + U_L/C_b}{U_L [d + (W - d)F]} + \frac{1}{C_B} + \frac{1}{\pi d_1 h_{f,conv}} \right]^{-1} \quad (18)$$

$$q'_u = \frac{(T_p - T_f)}{\left[ \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi d_1 h_{f,conv}} + \frac{1}{C_B} \right]} \quad (19)$$

$$Nu_f = \begin{cases} 1,86 \left( \frac{Re_f Pr_f}{L/d_1} \right)^{1/3} \left( \frac{\mu_f}{\mu_1} \right)^{0,14}, & Re_f \leq 2300 \\ \frac{(f/8)(Re_f-1000)Pr_f}{1+12,7(f/8)^{1/2}(Pr_f^{2/3}-1)}, & Re_f > 2300 \end{cases} \quad (20)$$

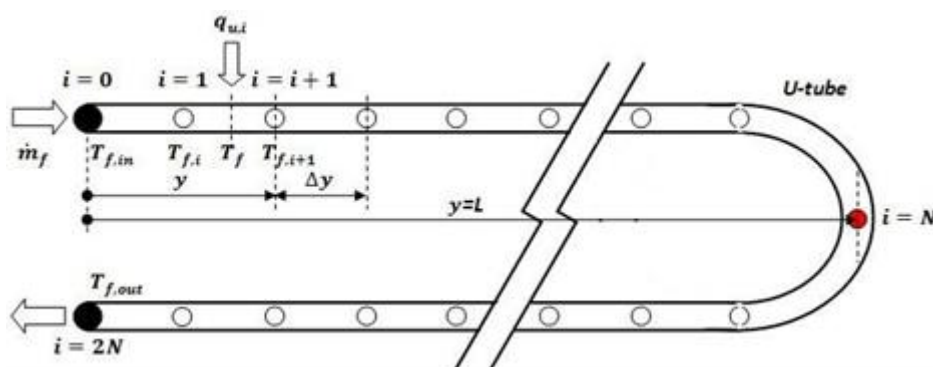
με  $f = [0,79 \ln(Re_f) - 1,64]^{-2}$ ,  $Re_f = 4\dot{m}_f / (\pi d_1 \mu_f)$  είναι ο αριθμός Reynolds του υγρού με βάση τη διάμετρο του εσωτερικού σωλήνα  $d_1$  και  $Pr_f$  είναι ο αριθμός Prandtl.  $\dot{m}_f$  είναι η παροχή μάζας του εργαζόμενου μέσου για καθένα από τους σωλήνες U. Οι ιδιότητες του ρευστού υπολογίζονται βάσει της μέσης θερμοκρασίας του υγρού ( $T_f$ ).



### 5.1.5 ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ

Το μήκος του γυάλινου σωλήνα ( $L$ ) διαιρείται σε έναν καθορισμένο, ίσο, αριθμό υποδιαστημάτων ( $N$ ) καθένα μήκους ( $\Delta y$ ) έτσι ώστε ο συνολικός αριθμός των υποδιαστημάτων κατά μήκος ( $y$ ) του σωλήνα  $U$  να είναι  $2N$ , βλέπε Σχήμα 7. Η θερμοκρασία εισόδου ( $T_{f,i}$ ) σε οποιοδήποτε τμήμα ( $i$ ) του σωλήνα  $U$  λαμβάνεται ως δεδομένη και υπολογίζεται η τιμή της θερμοκρασίας στην έξοδο του τμήματος αυτού ( $T_{f,i+1}$ ),  $T_f = (T_{f,i} + T_{f,i+1})/2$  να είναι η μέση θερμοκρασία του ρευστού για κάθε τμήμα και εφαρμόζοντας ισολογισμό ενέργειας για κάθε υποδιάστημα, προκύπτει η εξίσωση (21) που προσδιορίζει την ροή θερμότητας για κάθε τμήμα.  $C_{p,f}$  είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα του υγρού.

$$q_{u,i} = W(\Delta y)F' [S'' - U_L(T_f - T_a)] = \dot{m}_f C_{p,f} (T_{f,i+1} + T_{f,i}) \quad (21)$$



Σχήμα 5.7

## 5.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία για την υλοποίηση του παραπάνω θεωρητικού μοντέλου αναπτύχθηκε υπολογιστικός κώδικας σε περιβάλλον MATLAB προσαρμοσμένος απόλυτα στα θερμο-φυσικά και μαθηματικά δεδομένα του κυλινδρικού ηλιακού συλλέκτη κενού (VTC) που παρατέθηκαν προηγουμένως και αποτελούν τα δεδομένα εισόδου.

Στην έξοδο του κώδικα παίρνουμε τα εξής 3 διαγράμματα:

1.  $T_{f,in} - \gamma$  (θερμοκρασία του ρευστού στην είσοδο του συλλέκτη συναρτήσει του μήκους του συλλέκτη)
2.  $T_p - \gamma$  (θερμοκρασία της απορροφητικής επιφάνειας του συλλέκτη συναρτήσει του μήκους του συλλέκτη)
3.  $q_u - \gamma$  (ανηγμένη θερμική ισχύς συναρτήσει του μήκους του συλλέκτη)

Ως βασική περίπτωση μελετήθηκε ένας συλλέκτης με τα εξής δεδομένα εισόδου και την περίπτωση με χρήση παραβολικού κατόπτρου CPC ( $\eta_o=0,784$ ) :

- $T_a = 20^\circ\text{C}$
- $T_{f,in} = 40^\circ\text{C}$
- $\dot{m}_{f,c} = 0,07 \text{ kg/s}$
- $u_a = 3 \text{ m/s}$
- $G_t = 1000 \text{ W/m}^2$
- $T_g \cong 21^\circ\text{C}$

(Τα δευτερεύοντα τεχνικά στοιχεία δίνονται στην παράγραφο της μοντελοποίησης)

Στη συνέχεια διερευνήθηκε η συμπεριφορά του συλλέκτη στα πλαίσια 4 υπολογιστικών σεναρίων (case studies). Στα σενάρια αυτά ορίστηκαν ως παράμετροι λειτουργίας τα παρακάτω μεγέθη:

$T_{f,in}$  – η θερμοκρασία εισόδου του εργαζόμενου μέσου

$T_{atm}$  – η θερμοκρασία περιβάλλοντος

$G_t$  – η στιγμιαία προσπίπτουσα ακτινοβολία στο επίπεδο του συλλέκτη

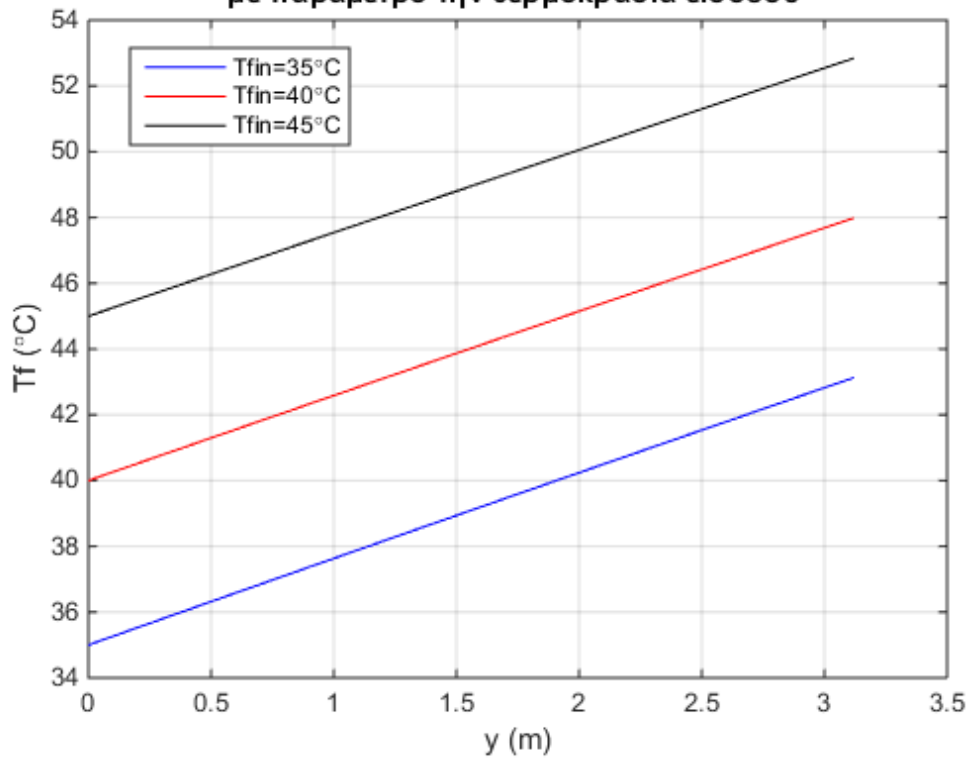
$\dot{m}_f$  – η παροχή μάζας ρευστού στον συλλέκτη

Στον πίνακα που ακολουθεί δίνονται οι σαφείς τιμές όλων των παραμέτρων κατά σενάριο.

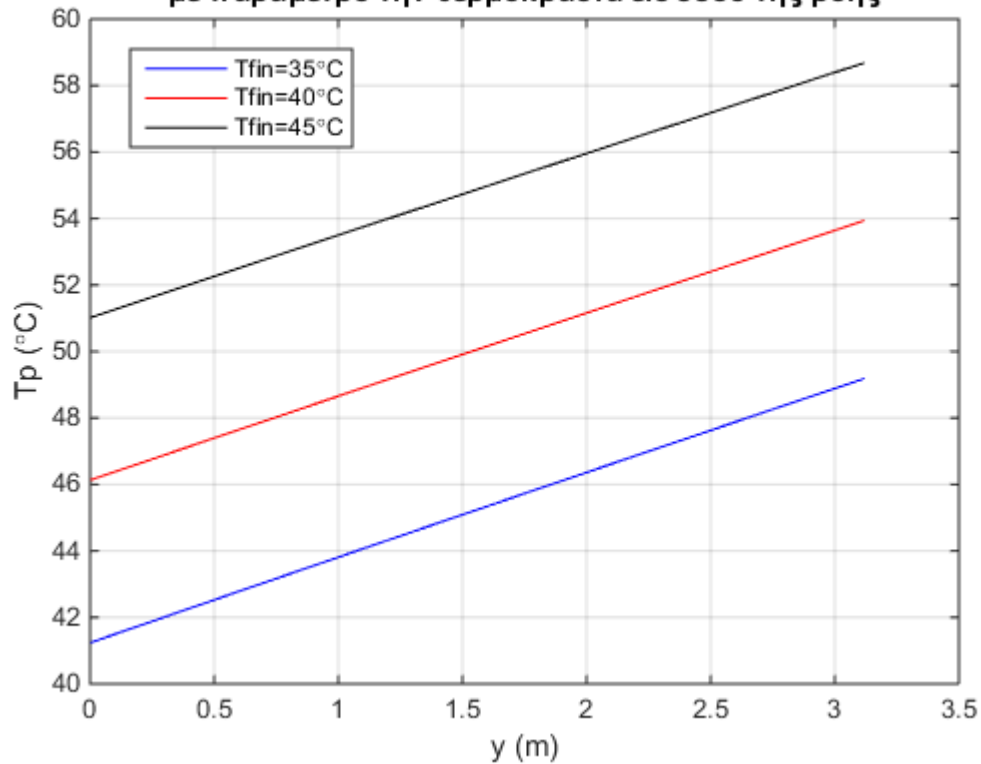
		<b>mf</b>	<b>Gt</b>	<b>Ta</b>	<b>Tfin</b>
case 1	1	0,070	1000	20	35
	2	0,070	1000	20	40
	3	0,070	1000	20	45
case 2	4	0,070	1000	15	40
	5	0,070	1000	25	40
	6	0,070	1000	30	40
	7	0,070	1000	35	40
case 3	8	0,070	700	20	40
	9	0,070	800	20	40
	10	0,070	900	20	40
case 4	11	0,040	1000	20	40
	12	0,060	1000	20	40
	13	0,080	1000	20	40
	14	0,100	1000	20	40

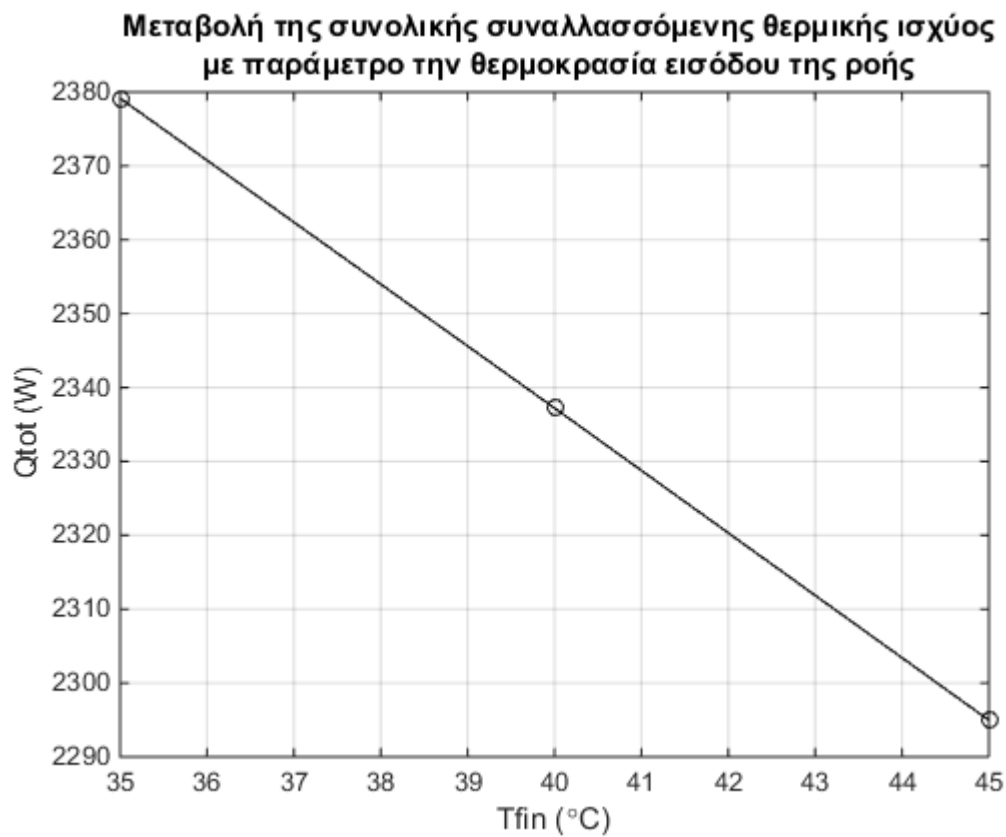
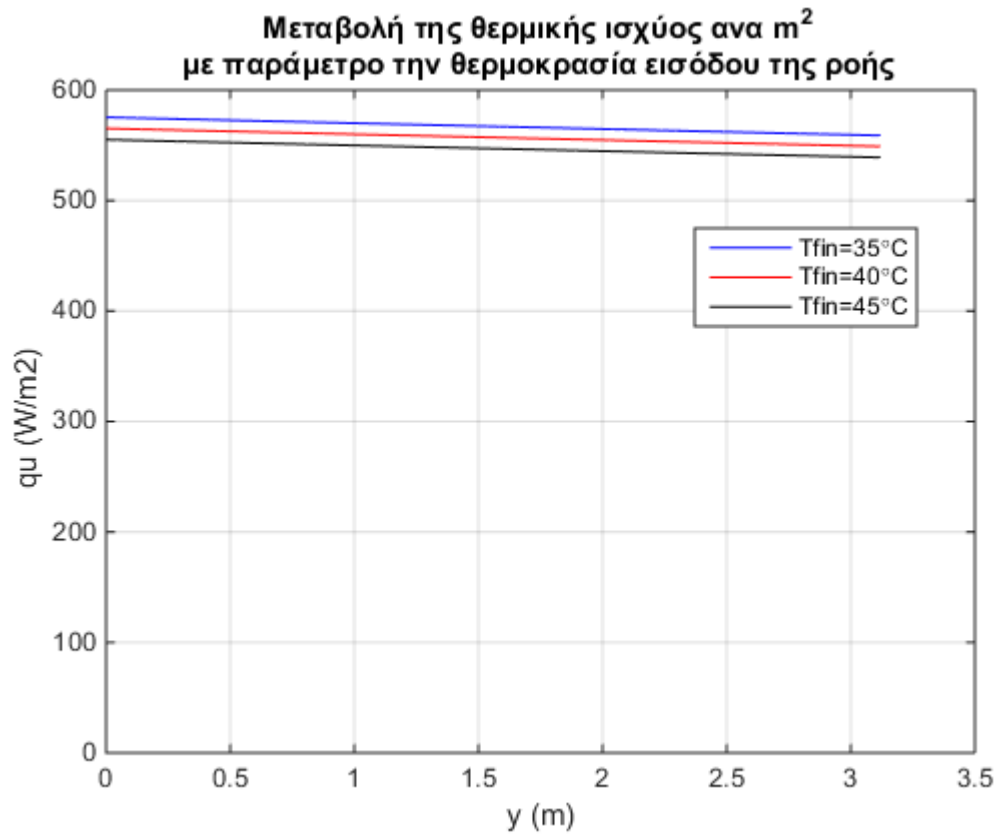
Ακολουθούν 4 διαγράμματα για το κάθε ένα σενάριο. Τα τρία βασικά που έχουν προαναφερθεί, συν ένα ακόμη ποιοτικό διάγραμμα που στόχο έχει να δείξει τη μεταβολή του συνολικού ωφέλιμου φορτίου κατά σενάριο - σε μία γραφική αναπαράσταση.

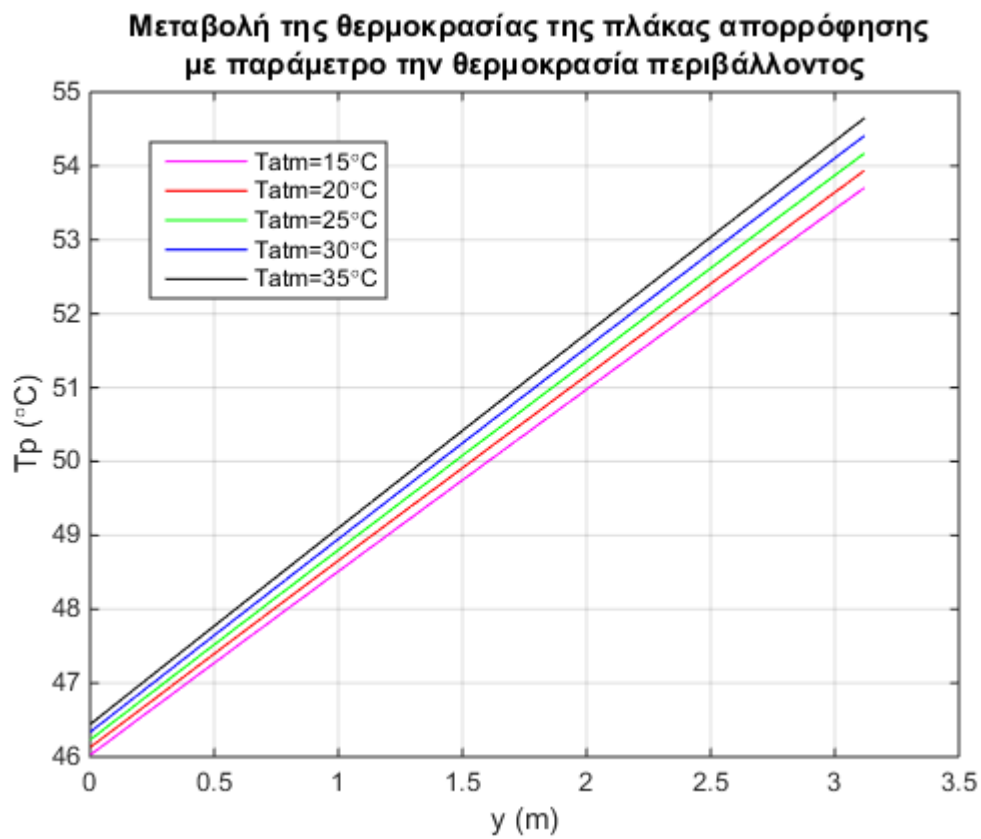
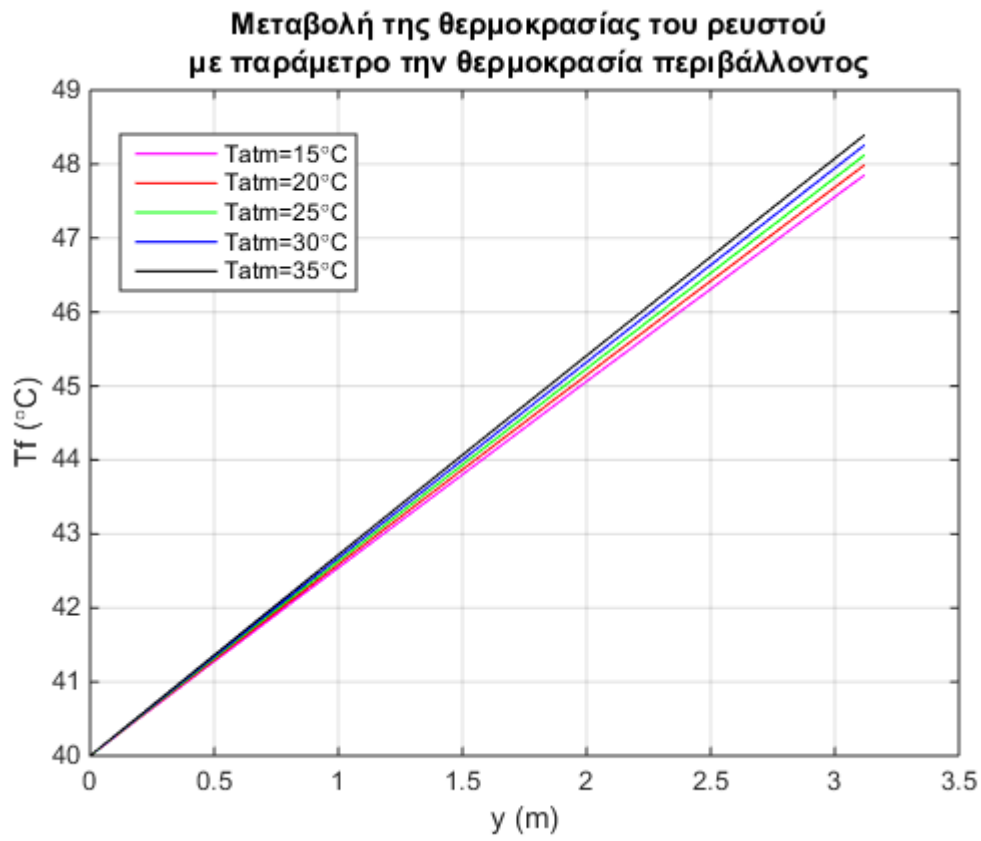
**Μεταβολή της Θερμοκρασίας της ροής  
με παράμετρο την θερμοκρασία εισόδου**

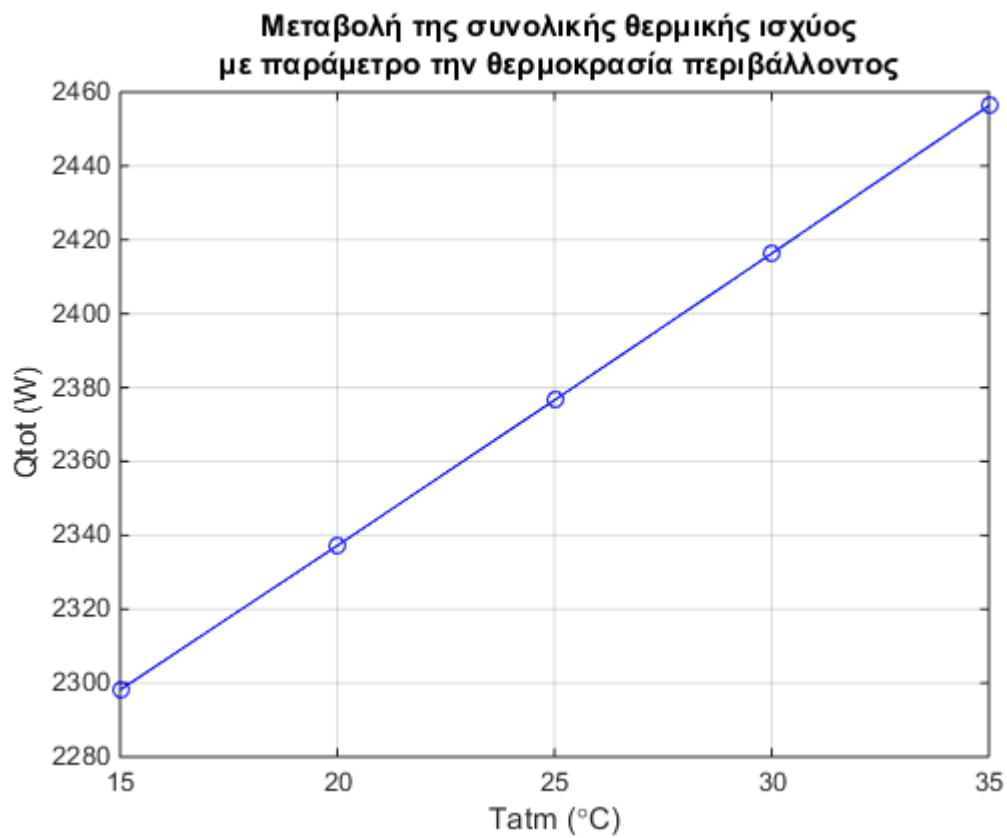
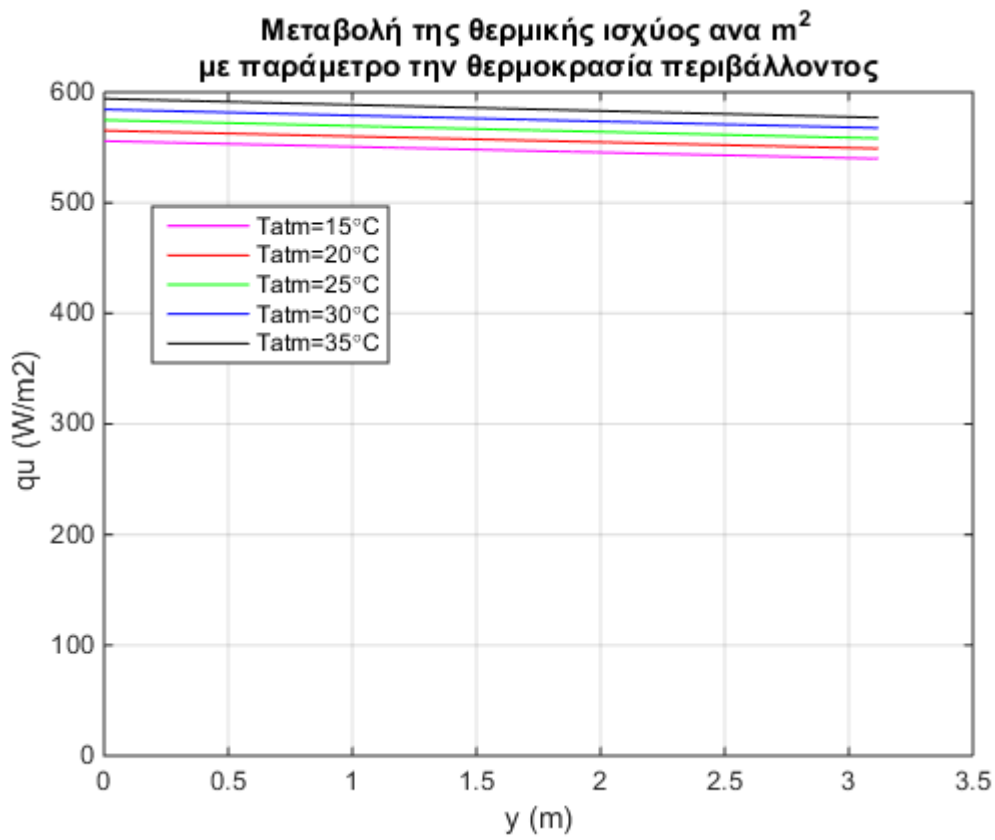


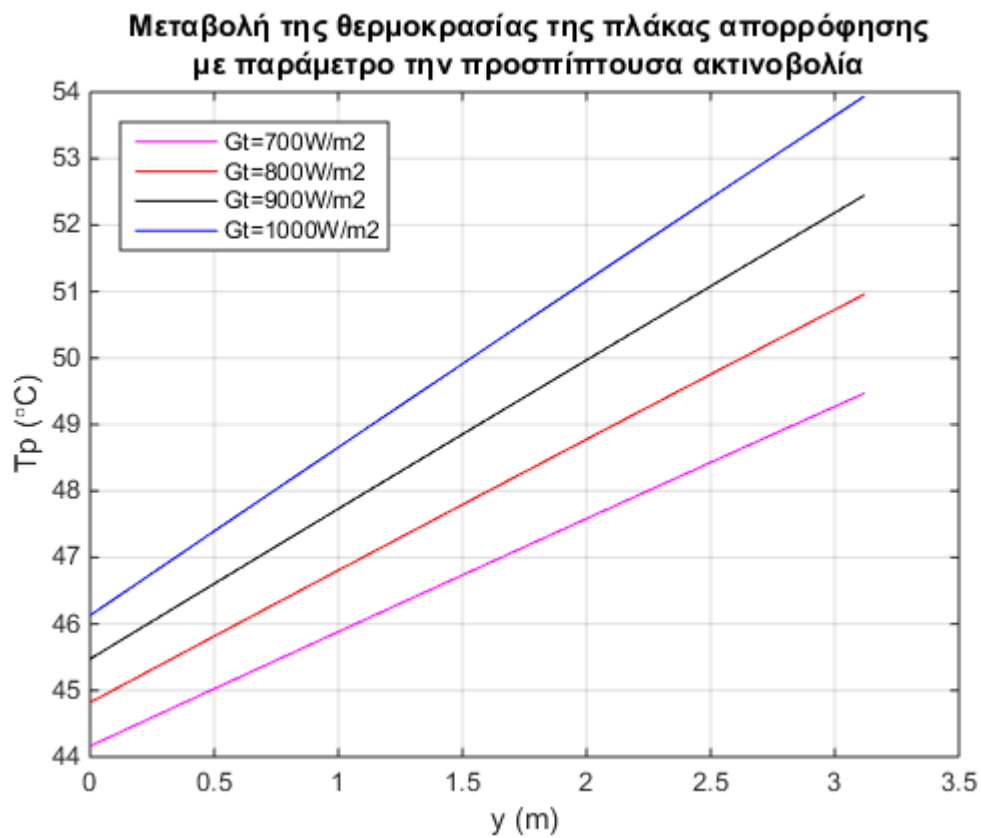
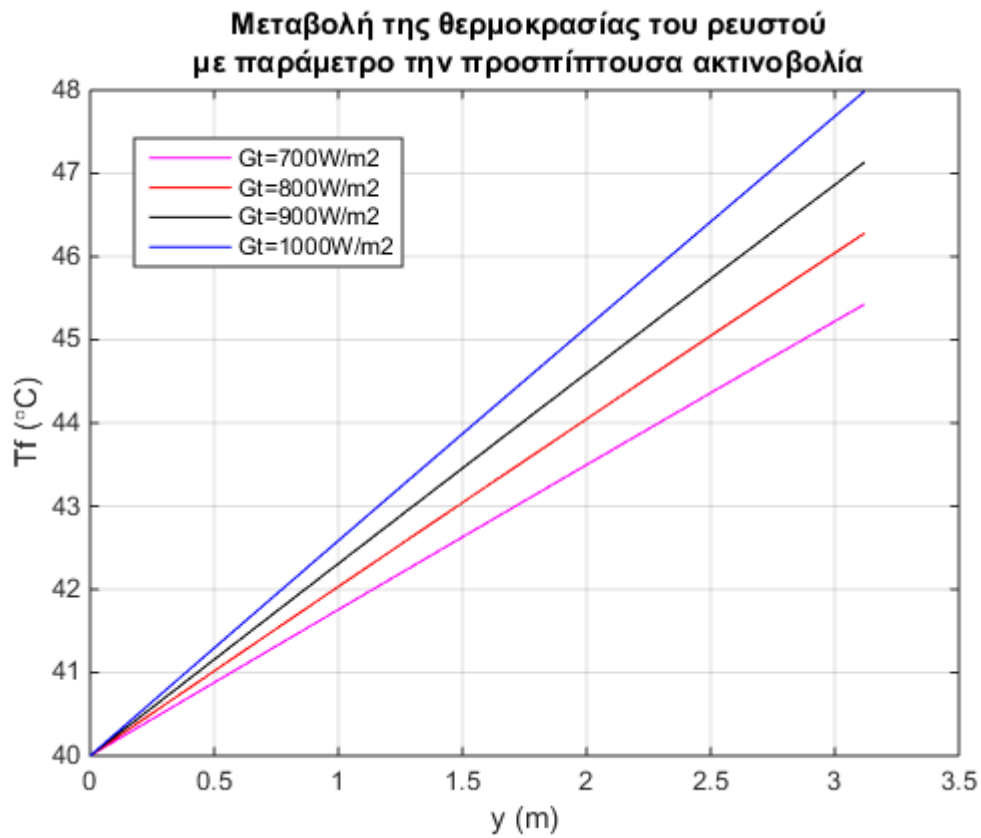
**Μεταβολή της θερμοκρασίας της πλάκας απορρόφησης  
με παράμετρο την θερμοκρασία εισόδου της ροής**



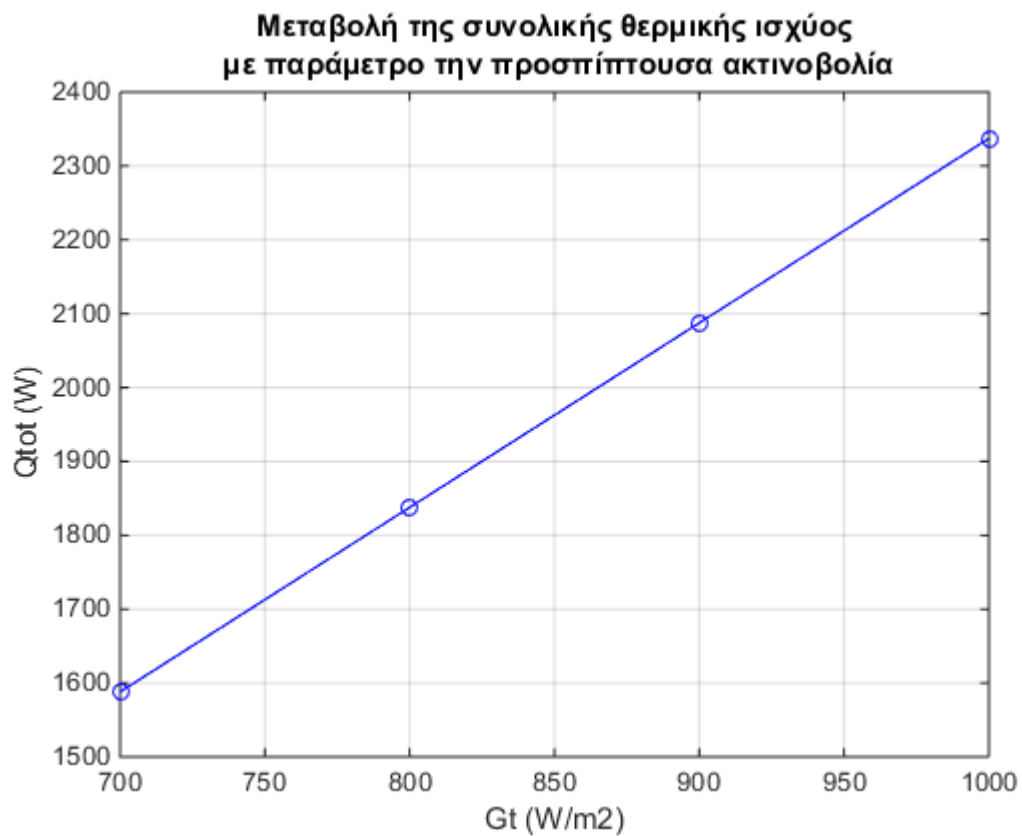
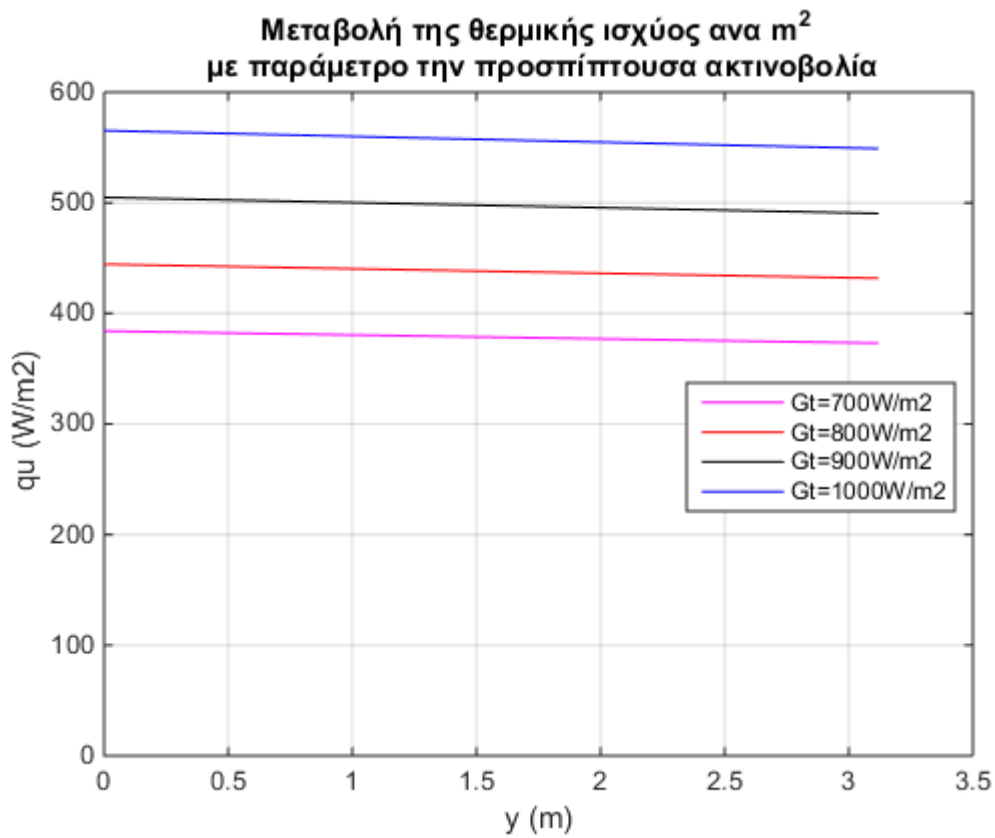


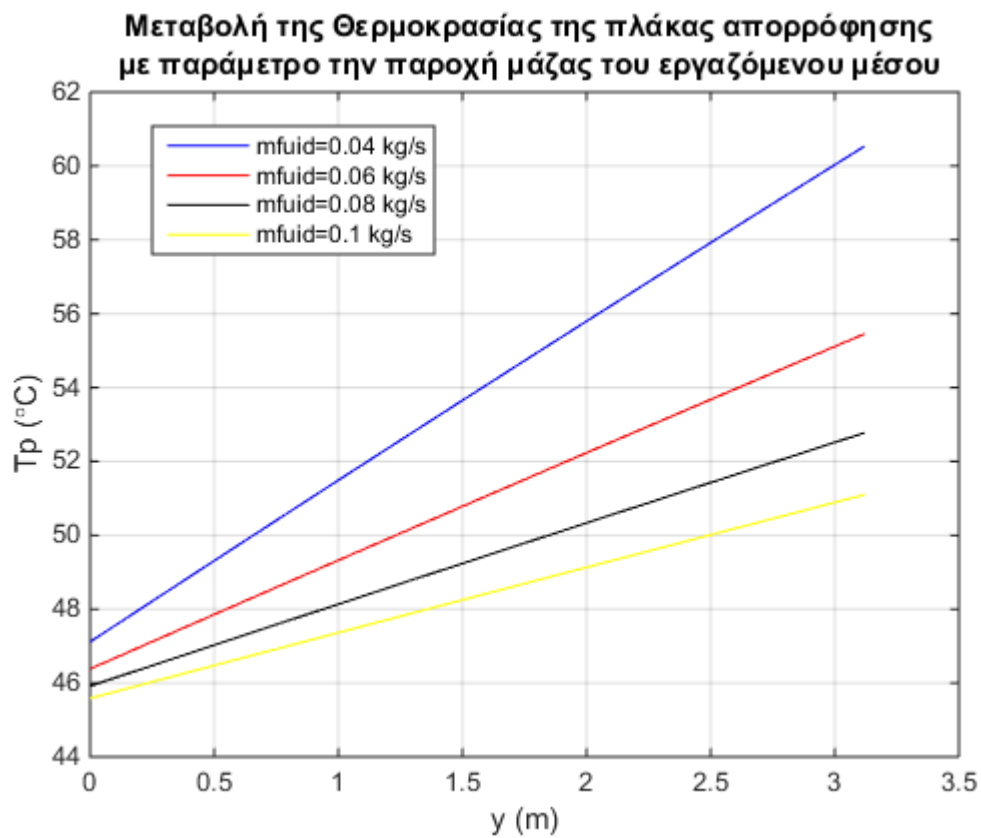
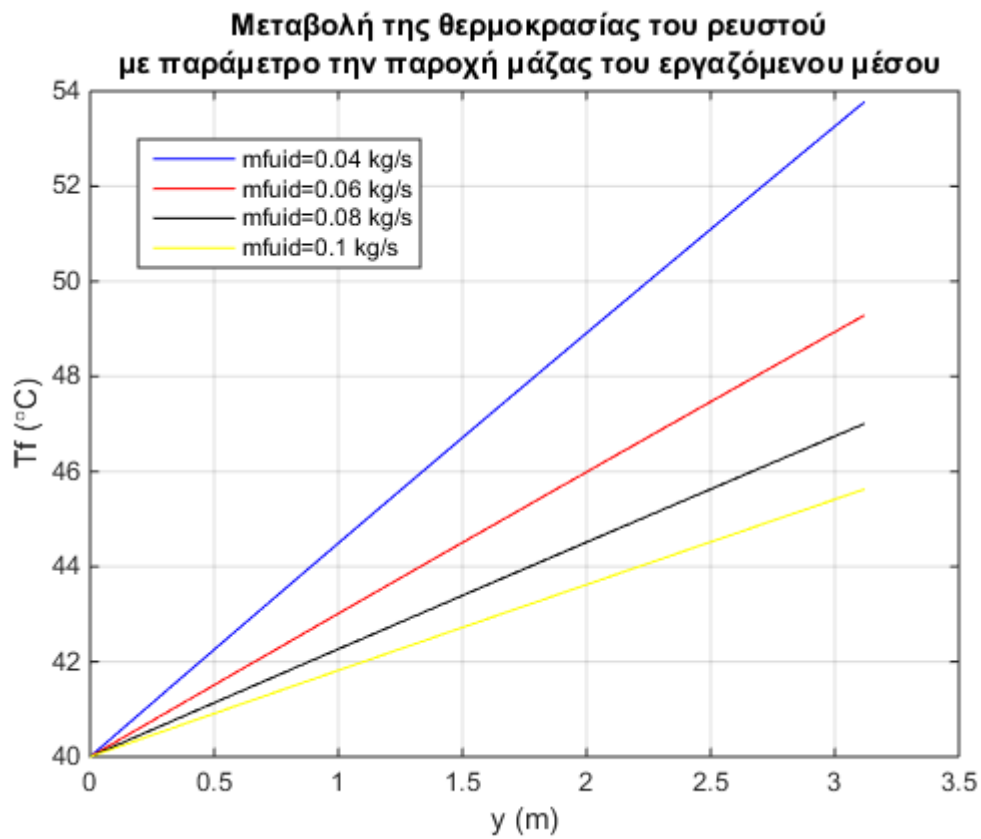


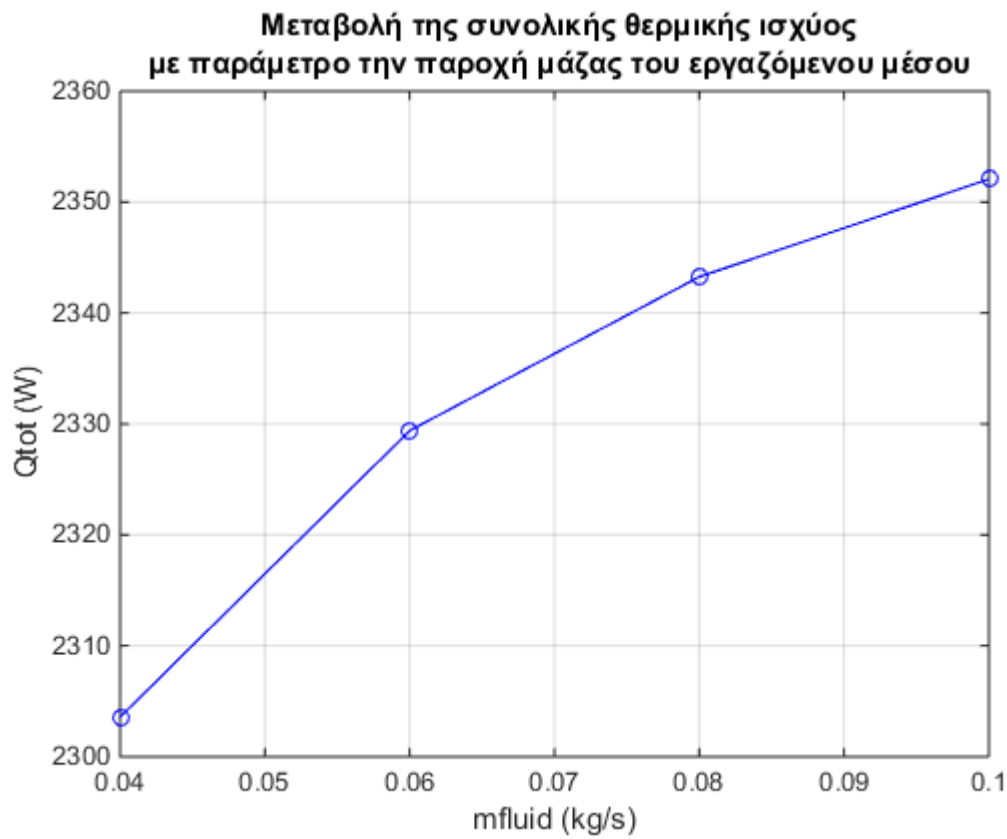
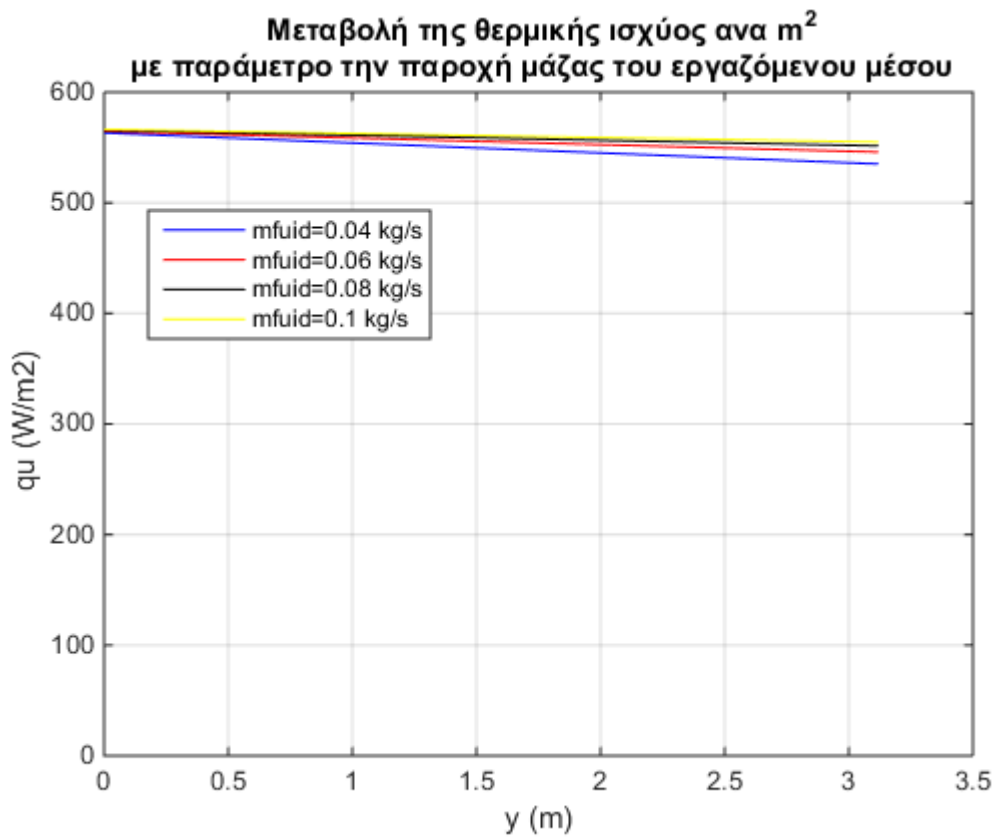












## 5.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

Προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση των διαφόρων παραμέτρων του προβλήματος στην λειτουργία του συλλέκτη, και ειδικότερα στο συναλλασσόμενο ωφέλιμο φορτίο, αλλά και για την καλύτερη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και την εξαγωγή ασφαλέστερων συμπερασμάτων, κρίθηκε σκόπιμο να διεξαχθεί η σχετική ανάλυση ευαισθησίας. Στο σημείο αυτό έγινε χρήση του λογισμικού EXCEL (εντολή regression), στο οποίο δόθηκαν τα δεδομένα του πίνακα.

Ανεξάρτητες Μεταβλητές						Εξαρτημένη Μεταβλητή
		mf	Gt	T <sub>a</sub>	T <sub>fin</sub>	Q <sub>tot</sub>
case 1	1	0,070	1000	20	35	2379,15
	2	0,070	1000	20	40	2337,22
	3	0,070	1000	20	45	2294,95
case 2	4	0,070	1000	15	40	2298,13
	5	0,070	1000	25	40	2376,61
	6	0,070	1000	30	40	2416,30
	7	0,070	1000	35	40	2456,31
case 3	8	0,070	700	20	40	1587,97
	9	0,070	800	20	40	1837,76
	10	0,070	900	20	40	2087,51
case 4	11	0,040	1000	20	40	2303,58
	12	0,060	1000	20	40	2329,41
	13	0,080	1000	20	40	2343,26
	14	0,100	1000	20	40	2352,07
<b>ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ</b>		<b>0,012</b>	<b>93,76145</b>	<b>5,04</b>	<b>1,96</b>	<b>244,49</b>

Οι ανεξάρτητες μεταβλητές που εμπλέκονται στην παλινδρόμηση είναι:

- η παροχή μαζας του εργαζόμενου μέσου ( $m_f$ )
- η θερμοκρασία είσοδου του ρευστού ( $T_{fin}$ )
- η προσπίτουσα στιγμιαία ηλιακή ακτινοβολία στο επίπεδο του συλλέκτη ( $G_t$ )
- η θερμοκρασία του περιβάλλοντος ( $T_a$ ).

Από τη στιγμή που τα μεγέθη αυτά εκφράζονται σε διαφορετικές μονάδες, οι αντίστοιχες τιμές των συντελεστών παλινδρόμησης (RC) δεν είναι αντιπροσωπευτικές της πραγματικής βαρύτητας της κάθε παραμέτρου στην μεταβολή της συναλλασσόμενης θερμοτήτα.

Συνεπώς, για να προσδιοριστεί η βαρύτητα του κάθε όρου, είναι απαραίτητος ο υπολογισμός των αντίστοιχων σταθμισμένων συντελεστών παλινδρόμησης (SRC)

Ο συντελεστής αυτός υπολογίζεται από ως:

$$\frac{(\text{συντελεστής παλινδρόμησης του [i]}) \times (\text{τυπική απόκλιση του [i]})}{\text{τυπική απόκλιση } Q_{tot}}$$

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν για τους σταθμισμένους συντελεστές παλινδρόμησης υποδεικνύουν την ευαισθησία της εξαρτώμενης μεταβλητής σε κάθε ανεξάρτητη παράμετρο καθώς και την ανεξάρτητη μεταβλητή με την μεγαλύτερη επιρροή στη θεωρούμενη εξαρτημένη μεταβλητή.

Τα αποτελέσματα αυτής της διαδικασίας παρουσιάζονται στους πίνακες που ακολουθούν

<b>ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ</b>					
	<i>βαθμοί ελευθερίας</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Σημαντικότητα F</i>
<b>Παλινδρόμηση</b>	4	776951,595	194237,899	12624,371	7,40165E-17
<b>Υπόλοιπο</b>	9	138,474	15,386		
<b>Σύνολο</b>	13	777090,068			

	<i>Συντελεστές</i>	<i>Τυπικό σφάλμα</i>	<i>t</i>	<i>τιμή-P</i>	<i>Κατώτερο 95%</i>	<i>Υψηλότερο 95%</i>	<i>Κατώτερο 95,0%</i>	<i>Υψηλότερο 95,0%</i>
<b>Τεταγμένη επί την αρχή</b>	-33,4794	25,7365	-1,3009	0,2256	-91,6993	24,7405	-91,6993	24,7405
<b>mf</b>	796,6850	87,7096	9,0832	0,0000	598,2721	995,0979	598,2721	995,0979
<b>Gt</b>	2,4885	0,0118	211,1853	0,0000	2,4618	2,5151	2,4618	2,5151
<b>Ta</b>	8,0578	0,2192	36,7656	0,0000	7,5620	8,5536	7,5620	8,5536
<b>Tfin</b>	-8,4199	0,5547	-15,1785	0,0000	-9,6747	-7,1650	-9,6747	-7,1650

<b>Ανεξάρτητες μεταβλητές</b>	<b>Τυπική Απόκλιση</b>	<b>Σταθμισμένος Συντελεστής Παλινδρόμησης</b>
<b>mf</b>	0,01240	0,04042
<b>Gt</b>	93,76145	0,95432
<b>Ta</b>	5,04104	0,16614
<b>Tfin</b>	1,96116	0,06754

Όπως φαίνεται στον τελευταίο πίνακα, η στιγμιαία προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία είναι ο σημαντικότερος παράγοντας που επηρεάζει την συναλλασσόμενη θερμότητα ενώ την μικρότερη επίδραση έχει η παροχή μάζας του εργαζόμενου μέσου.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6:

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής μελετήθηκε ένας ηλιακός συλλέκτης κενού με προσαρμοσμένο κάτοπτρο για βελτιστοποίηση της απόδοσής του και αναπτύχθηκε ένα υπολογιστικό μοντέλο και αντίστοιχος κώδικας σε περιβάλλον Matlab για την περιγραφή και την αξιολόγηση της λειτουργίας του.

Συνοψίζοντας λοιπόν, από τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης του συλλέκτη που παρουσιάστηκαν σε μορφή διαγραμμάτων προηγουμένως, εξάγονται τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Αρχικά, μπορεί να παρατηρηθεί σε όλα τα διαγράμματα ότι οι μεταβολές των θερμοκρασιών κατά μήκος του συλλέκτη είναι σχεδόν γραμμικές με αύξουσα τάση, τόσο για τη θερμοκρασία της ροής ( $T_f$ ) όσο και για αυτή της πλάκας απορρόφησης ( $T_p$ ), ενώ το συναλλασσόμενο ποσό θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας μειώνεται κατά μήκος της ροής ( $q_u$ ).
- Εξετάζοντας τις μεταβολές που προέκυψαν με παράμετρο τη θερμοκρασία εισόδου της ροής στο συλλέκτη ( $T_{f,in}$ ), παρατηρούμε ότι η συγκεκριμένη ποσότητα δεν επιδρά σημαντικά στο ρυθμό μεταβολής των θερμοκρασιών ο οποίος παραμένει ουσιαστικά σταθερός. Η αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου της ροής συνεπάγεται μείωση του ολικού συναλλασσόμενου ποσού θερμότητας ( $Q_{tot}$ ) ως αποτέλεσμα της μειωμένης διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ της ροής και της πλάκας απορρόφησης ( $T_p - T_f$ ).
- Στην περίπτωση της μεταβολής της θερμοκρασίας περιβάλλοντος ( $T_a$ ) παρατηρούμε ότι ο ρυθμός αύξησης των θερμοκρασιών αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος όπως άλλωστε και το συνολικό ποσό θερμότητας που συναλλάσσεται.
- Από τα αντίστοιχα διαγράμματα όπως αναμενόταν, η έντονη επίδραση της προσπίπτουσας ηλιακής σε όλες τις μεταβολές ( $G_t$ ). Συγκεκριμένα παρατηρείται σημαντική αύξηση τόσο του ρυθμού αύξησης των θερμοκρασιών της ροής και της πλάκας όσο και του συναλλασσόμενου ποσού θερμότητας.

- Η αύξηση της παροχής μάζας του εργαζόμενου μέσου ( $m_f$ ) οδηγεί σε μείωση της αύξησης των θερμοκρασιών ενώ δεν επιδρά ουσιαστικά στο συναλλασσόμενο πόσο θερμότητας.
- Τέλος, από τα αποτελέσματα της ανάλυση ευαισθησίας που παρουσιάστηκαν εκτενώς στην αντίστοιχη παράγραφο προκύπτει ότι η στιγμιαία προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία ( $G_t$ ) αποτελεί τον σημαντικότερο παράγοντα που επηρεάζει την συναλλασσόμενη θερμότητα ενώ αντίστοιχα την μικρότερη επίδραση σε αυτό έχει η παροχή μάζας του εργαζόμενου μέσου ( $m_f$ ).



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ

- [1] Δημήτρης Αλ. Κατσαπρακάκης, “Ηλιακή Ενέργεια - Ηλιακοί συλλέκτες”, Εργαστήριο Αιολικής Ενέργειας, Τ.Ε.Ι Κρήτης, Ιούνιος 2012
- [2] “Non Imaging Optics in Solar Energy”, Joseph O’ Gallagher
- [3] “Solar Engineering of thermal processes”, John A. Duffie, William A. Beckman 2013
- [4] “Comparison of solar concentrators”, Ari Rabl
- [5] “Ηλιακή ενέργεια”, Αντωνόπουλος
- [6] “Κατασκευή και περιβατική αξιολόγηση πρότυπου επίπεδου, ηλιακού συλλέκτη βρασμού”, Ζωγράφος Γεώργιος
- [7] Soteris A. Kalogirou, “Solar thermal collectors and applications”, Progress in Energy and Combustion Science, Volume 30, Issue 3, Pages 231-295, 2004
- [8] E. Azad, “Theoretical and experimental investigation of heat pipe solar, collector”, Experimental Thermal and Fluid Science, Volume 32, Issue 8, Pages 1666-1672, September 2008.
- [9] Γ. Μαρτινόπουλος, Γ. Τσιλιγκιρίδης, “Ηλιακά Θερμικά συστήματα στην Ελλάδα - Περιβαλλοντικά Οφέλη”, Πρακτικά 8ου Εθνικού Συνεδρίου για τις Ήπιες Μορφές Ενέργειας, σελ. 99-106 Θεσσαλονίκη 2006
- [10] M. Akyurt, “Development of heat pipes for solar water heaters”, Solar Energy, Volume 32, Pages 625-631, 1984
- [11] Ανδρέας Μοσχάτος, “Συνιστώσες της ηλιακής θερμικής διαδικασίας, ηλιακοί συλλέκτες”, ΤΕΕ, 1992
- [12] “Heat Transfer”, Cengel
- [13] “Ένωση βιομηχανιών ηλιακής ενέργειας - Σεμινάριο θερμικών ηλιακών συστημάτων, είδη συλλεκτών”, Χριστοδουλάκη Ρόζα
- [14] “Επισκόπηση ηλιακών συλλεκτών”, Ντάσκα Παναγιώτα
- [15] “The performance of a cylindrical solar water heater” Hussain-Madani University of Bahrain
- [16] “Vertical evacuated tubular-collectors utilizing solar radiation from all directions” Louise Jivan Shah, Simon Furbo, Technical University of Denmark

- [17] “Ένωση βιομηχανιών ηλιακής ενέργειας Σεμινάριο θερμικών ηλιακών συστημάτων, είδη συλλεκτών” , Χριστοδουλάκη Ρόζα
- [18] “Optimisation of evacuated tubular solar collector arrays with diffuse reflectors”, S.P. Chow, G.L. Harding, Yin Zhiqiang, University Of Sidney, Australia
- [19] “Theoretical and experimental investigation of heat pipe solar collector”, E. Azad, Iranian Research Organization, Tehran, Iran
- [20] “An experimental study of a co-axial heat pipe solar collector”, E. Azad, F. Moztafzadeh Materials and Energy Research Center”, Tehran, Iran
- [21] “The use of CPC collectors for detoxification of contaminated water: Design, construction and preliminary results” J.I. Ajona, A.Vidal
- [22] “Κατασκευή και πειραματική αξιολόγηση πρότυπου επίπεδου ηλιακού συλλέκτη βρασμού” , Γεώργιος Ζωγράφος
- [23] “Εξοικονόμηση Ενέργειας με Εφαρμογή Ηλιοθερμικών Συστημάτων” , Χρήστος Ι. Τσαρτσάλης
- [24] “Theoretical flow for investigations of an all glass evacuated tubular collector” Louise Jivan Shah, Simon Furbo, Technical University of Denmark
- [25] “Vertical evacuated tubular-collectors utilizing solar radiation from all directions”, Louise Jivan Shah, Simon Furbo, Technical University of Denmark
- [26] “Optimisation of evacuated tubular solar collector arrays with diffuse reflectors” S.P. Chow, G.L. Harding, Yin Zhiqiang, University Of Sidney, Australia
- [27] “Theoretical and experimental investigation of heat pipe solar collector”, E. Azad, Iranian Research Organization, Tehran, Iran
- [28] “Developing a theoretical model to investigate thermal performance of a thin membrane heat-pipe solar collector”, S.B.Riffat, X. Zhao, P.S. Doherty the University of Nottingham, UK
- [29] “Η Τεχνολογία των ηλιοθερμικών συστημάτων σήμερα”, Βασιλική Νεοφωτίστου
- [30] “Σύγχρονες εξελίξεις – Ανάλυση αγοράς στον εγχώριο τομέα ηλιακών”, Μέντζα Λαμπρινή, Φωτόπουλος Γεώργιος
- [31] “Thermal analysis of a linear Fresnel lens solar collector with black body cavity receiver”, Soriga & Neaga 2012
- [32] “Thermal performance analysis of the glass evacuated tube solar collector with U-tube”, Ma & co 2010 (σελ.1959-1967)

[33] “Experimental Techniques for Thermal Contact Resistance Measurements”, Fletcher 1993 (σελ.195-206)

[34] “Fundamentals of Heat and Mass Transfer”, Incropera & co. 2007