



---

## ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών  
*«Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας»*

---

### **ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

*«Συμβολή στο σχεδιασμό και τη μελέτη για την κατασκευή ηλιακού συλλέκτη με κοίλο κάτοπτρο συγκέντρωσης ακτινοβολίας σε σύστημα δακτυλιοειδή σωλήνα αντιρροής»*

### **Του Μεταπτυχιακού Φοιτητή**

Τσέλιγκα Ευθύμιου Ιωάννη

### **Επιβλέπων**

Δημήτριος Μπούρης,  
Αναπληρωτής Καθηγητής  
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

---

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2017

# ΣΥΝΟΨΗ

Οι όλο και περισσότερο αυξανόμενες ενεργειακές ανάγκες παγκοσμίως σε συνδυασμό με την προστασία του περιβάλλοντος επιτάσσουν την αναζήτηση νέων, λιγότερο ενεργοβόρων και καινοτόμων τεχνολογιών στον τομέα της παραγωγής και διαχείρισης ενέργειας. Προς αυτή την κατεύθυνση η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως κύριο στόχο τη μελέτη και το σχεδιασμό για την κατασκευή ενός ηλιακού συλλέκτη με κοίλο παραβολοειδές κάτοπτρο, το οποίο συγκεντρώνει την ακτινοβολία σε ένα σύστημα δακτυλιοειδούς σωλήνα, από τον οποίο διέρχεται νερό που θερμαίνεται και αποθηκεύεται για διάφορες χρήσεις χωρίς την κατανάλωση μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η Ελλάδα κατέχει την 3<sup>η</sup> θέση πανευρωπαϊκά στη χρήση ηλιακών συλλεκτών. Η χρήση τους κατά κύριο λόγο περιορίζεται στην παραγωγή ζεστού νερού για την κάλυψη των καθημερινών αναγκών σε επίπεδο υγιεινής. Στόχος είναι η κατασκευή μιας διάταξης που θα χρησιμοποιεί την μεγαλύτερη και ανεξάντλητη πηγή ενέργειας του πλανήτη όχι μόνο για την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης αλλά και για την ηλιακή θέρμανση ή ψύξη κατά τους θερινούς μήνες, μειώνοντας έτσι την κατανάλωση ορυκτών καυσίμων και ηλεκτρισμού για την ικανοποίηση αυτών των αναγκών.

Στο πρώτο μέρος της παρούσας διπλωματικής εργασίας αναλύονται διεξοδικά οι υφιστάμενες τεχνολογίες που βασίζονται στη συλλογή της ηλιακής ενέργειας ενώ γίνεται και μια εκτενής αναφορά στις υπάρχουσες τεχνολογίες των ηλιακών συλλεκτών. Στο δεύτερο μέρος γίνεται μια περιγραφή των νόμων μετάδοσης θερμότητας καθώς επίσης και μια ανάλυση της θερμικής συμπεριφοράς των συγκεντρωτικών συλλεκτών με παραβολικό κάτοπτρο. Ενώ τέλος περιγράφονται τα υλικά κατασκευής, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά καθώς και η λειτουργία των κατόπτρων. Τέλος στο τρίτο μέρος παρουσιάζεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την επιλογή του κατάλληλου κατόπτρου, τα αποτελέσματα της μεθόδου και η ανάλυσή τους, καθώς και η διαδικασία για την επιλογή της εργονομικής παραβολής που τελικώς θα κατασκευαστεί.

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Από τη θέση αυτή θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Δημήτριο Μπούρη και Διευθυντή του Εργαστηρίου Τεχνολογικών Καινοτομιών Προστασίας Περιβάλλοντος για την επίβλεψη της διπλωματικής μου εργασίας, καθώς και για την ενθάρρυνση και αμέριστη συμπαράσταση που μου προσέφερε κατά τη διάρκεια της εκπόνησής της. Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον Δρ. Χρήστο Μανόπουλο Ε.ΔΙ.Π. του Τομέα Ρευστών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών για τη συμμετοχή του στην επίβλεψη της παρούσας διπλωματικής εργασίας (βάσει του Ν.4009, άρθρο 29, παρ. 2α όπως τροποποιήθηκε από το Ν.4386, άρθρο 27, παρ. 12α), για τη βοήθεια, τις πολύτιμες συμβουλές, την υποστήριξη και την καθοδήγηση που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

<b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ</b>	<b>Σελ.</b>
Περίληψη –Abstract.....	3-4
1. Εισαγωγή.....	5
1.1 Η ενέργεια του ήλιου.....	5
1.1.1 Ο ήλιος.....	5
1.1.2 Η ηλιακή ενέργεια.....	5
1.2 Συστήματα εκμετάλλευσης της ηλιακής ακτινοβολίας.....	7
1.2.1 Ενεργητικά συστήματα .....	7
1.2.2 Παθητικά συστήματα .....	8
1.2.3 Φωτοβολταϊκά στοιχεία .....	9
1.3 Εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας στην Ελλάδα.....	10
1.3.1 Το ενεργειακό πρόβλημα.....	10
1.3.2 Το ηλιακό δυναμικό της Ελλάδας .....	10
1.4 Ηλιακοί συλλέκτες.....	12
1.4.1 Κάλυψη αναγκών ζεστού νερού χρήσης .....	12
1.4.2 Είδη ηλιακών συλλεκτών .....	12
1.4.2.1 Γενικά στοιχεία .....	12
1.4.2.2 Επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες.....	13
1.4.2.3 Επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες χωρίς κάλυμμα.....	17
1.4.2.4 Ηλιακοί συλλέκτες κενού .....	18
1.5 Χαρακτηριστικά του συλλέκτη κενού που θα μελετηθεί.....	23
1.6 Συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας .....	24
1.6.1 Συγκεντρωτικοί ηλιακοί συλλέκτες.....	24
1.6.2 Παραβολικά σωληνοειδή κάτοπτρα.....	28
1.7 Σκοπός διπλωματικής εργασίας .....	31
2. Μελέτη του συστήματος.....	32
2.1 Μεταφορά θερμότητας .....	32
2.1.1 Μεταφορά θερμότητας με αγωγή .....	32
2.1.2 Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή .....	33
2.1.3 Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία.....	34
2.1.4 Μεταφορά θερμότητας σε αγωγό κυκλικής διατομής .....	34
2.2 Μεταφορά θερμότητας σε επίπεδο συλλέκτη.....	35
2.3 Μετάδοση θερμότητας σε συστήματα με παραβολικά κάτοπτρα.....	37
2.4 Μετάδοση θερμότητας σε συλλέκτη κενού με δύο σωλήνες αντιρροής .....	41
2.4.1 Περιγραφή.....	41
2.4.2 Το ισοδύναμο πρόβλημα.....	44
2.5 Γεωμετρία παραβολικού κατόπτρου.....	47
2.6 Δείκτες απόδοσης και απωλειών σε ένα παραβολικό συλλέκτη .....	50
2.6.1 Δείκτης απόδοσης.....	50
2.6.2 Απώλειες ακτινοβολίας παραβολικού συλλέκτη.....	51
2.7 Χαρακτηριστικά κάτοπτρων.....	54
2.8 Ηλιακή γεωμετρία.....	58
2.8.1 Μεταβολή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας λόγω απόστασης .....	58
2.8.2 Μεταβολή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της ημέρας .....	58
2.8.3 Μεταβολή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια του έτους..	59

2.8.4 Η ωριαία γωνία .....	60
2.8.5 Γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας.....	61
2.9 Μηχανισμοί παρακολούθησης της κίνησης του ηλίου.....	61
2.9.1 Βασικές αρχές λειτουργίας .....	61
2.9.2 Κατασκευαστικά στοιχεία ενός συστήματος δύο αξόνων.....	62
2.9.3 Βασική αρχή λειτουργίας του συστήματος .....	62
2.9.4 Τα επιμέρους συστήματα του μηχανισμού.....	63
2.9.4.1 Το ηλεκτρολογικό τμήμα του μηχανισμού.....	63
2.9.4.2 Το ηλεκτρονικό τμήμα του μηχανισμού.....	65
3. Προσδιορισμός γεωμετρικών χαρακτηριστικών του κατόπτρου.....	68
3.1 Συνδυασμός εξισώσεων για τον προσδιορισμό των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του κατόπτρου .....	68
3.1.1 Αριθμητικός υπολογισμός απωλειών συλλέκτη.....	80
3.2 Επεξεργασία και ανάλυση αποτελεσμάτων.....	84
4. Συμπεράσματα .....	106
Παράρτημα Ι.....	108
Βιβλιογραφία.....	114
.	

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διπλωματική εργασία έχει ως κύριο στόχο τη μελέτη, το σχεδιασμό και την κατασκευή ενός ηλιακού συλλέκτη με κοίλο παραβολοειδές, σωληνοειδές κάτοπτρο το οποίο συγκεντρώνει την ακτινοβολία σε ένα σύστημα δακτυλιοειδή σωλήνα με γυάλινο περίβλημα ως σημείο εστίασης, από τον οποίο διέρχεται νερό και προς τις δύο κατευθύνσεις ροής μέσω του εσωτερικού και εξωτερικού αυλού αντίστοιχα. Το γυάλινο περίβλημα (Borocilicate glass) στο σύστημα του δακτυλιοειδή σωλήνα δίνει τη δυνατότητα δημιουργίας κενού για καλύτερη μόνωση, ενώ περιέχεται ειδικός απορροφητής από αλουμίνιο για την καλύτερη απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Το νερό μπορεί να ζεσταίνεται άμεσα και να χρησιμοποιείται ή να αποθηκεύεται σε συλλέκτη ζεστού νερού χρήσης (υδροφυλάκιο Z.N.X.). Η όλη διάταξη περιλαμβάνει σύστημα περιστρεφόμενης βάσης ώστε να αυξάνεται κατά το βέλτιστο η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία.

# **ABSTRACT**

The principal objective of this thesis is the study and design for the construction of a solar collector with a concave paraboloidal tubular reflector which concentrates the radiation into an annular tube assembly, as a focal point, being in a glass casing. Heating is achieved by passing water in both flow directions first through the inner and after through the outer lumen of the annulus. The Borosilicate glass casing of the annular tube system enables vacuum for better insulation and contains special aluminum absorber folders attached on the annulus for better absorption of solar radiation. The water can be heated directly and used or stored in a hot water boiler. The whole device includes a rotating base system optimizing the incident solar radiation.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1Η ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΤΟΥ ΗΛΙΟΥ

### 1.1.1 Ο ΗΛΙΟΣ

Ο ήλιος είναι ένας ατομικός αντιδραστήρας που μετατρέπει τη μάζα σε ενέργεια η απόσταση του από τη γη είναι περίπου  $149,6 \cdot 10^6$  km. Στην επιφάνειά του ήλιου γίνονται πολύ ισχυρές πυρηνικές αντιδράσεις. Κάθε δευτερόλεπτο, 657 εκατομμύρια τόνοι υδρογόνου μετατρέπονται σε 653 εκατομμύρια τόνους αερίου Ηλίου. Τα 4 εκατομμύρια τόνοι που λείπουν, διαχέονται στο διάστημα ως ηλιακή ενέργεια. Η ηλιακή ενέργεια μεταφέρεται μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας από τον ήλιο, ο οποίος βρίσκεται σε μια μέση απόσταση  $149,6 \cdot 10^6$  km

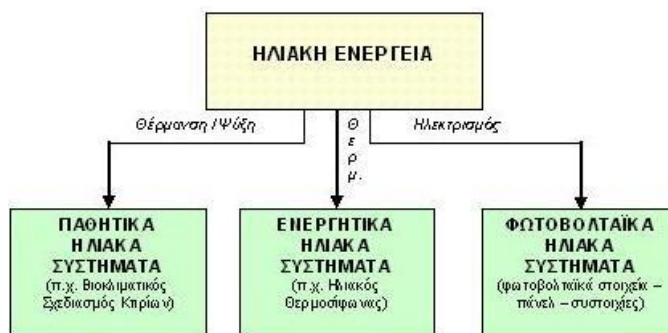
### 1.1.2 Η ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Με τον όρο ηλιακή ενέργεια, χαρακτηρίζεται το σύνολο των διαφόρων μορφών ενέργειας που προέρχονται από τον Ήλιο. Η ενέργεια αυτή ακτινοβολείται στο διάστημα σαν φως, θερμότητα, υπεριώδεις ακτίνες, ακτίνες X και ραδιοκύματα και είναι η ευκρινέστερη μορφή ενέργειας που προσφέρει η φύση. Οι ποσότητες ηλιακής ενέργειας που παρέχονται είναι τεράστιες. Το κυρίαρχο χαρακτηριστικό της ηλιακής ενέργειας είναι ο ανεξάντλητος χαρακτήρας της και ως τούτου δεν υπάρχουν περιορισμοί χώρου και χρόνου για την εκμετάλλευσή της. Η διάκριση της ηλιακής ακτινοβολίας γίνεται στην άμεση και έμμεση ηλιακή ακτινοβολία. Άμεση είναι η ακτινοβολία που προσπίπτει σε κάθε επιφάνεια, ευρισκόμενη εντός της ατμόσφαιρας και προέρχεται κατ' ευθείαν από τον ήλιο. Η ακτινοβολία έχει κάποια διεύθυνση με την οποία προσπίπτει στις επιφάνειες και αυτό σημαίνει ότι αυτές θα πρέπει να προσανατολίζονται κατάλληλα για να δεχθούν το μεγαλύτερο μέρος της. Έμμεση είναι η ακτινοβολία που προσπίπτει σε μία επιφάνεια, ευρισκόμενη εντός της ατμόσφαιρας, αφού προηγουμένως η κατεύθυνσή της έχει υποστεί αλλαγές από ανάκλαση και διασπορά στην ατμόσφαιρα. Η διάχυτη ακτινοβολία δεν έχει κάποια διεύθυνση με την οποία προσπίπτει στις επιφάνειες.

Όσον αφορά την εκμετάλλευση της ηλιακής άμεσης ενέργειας, θα μπορούσαμε να πούμε ότι χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες εφαρμογών: τα παθητικά ηλιακά συστήματα, τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα ή Ηλιοθερμικά συστήματα, και τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Τα παθητικά και τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα εκμεταλλεύονται τη θερμότητα που εκπέμπεται μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ τα φωτοβολταϊκά

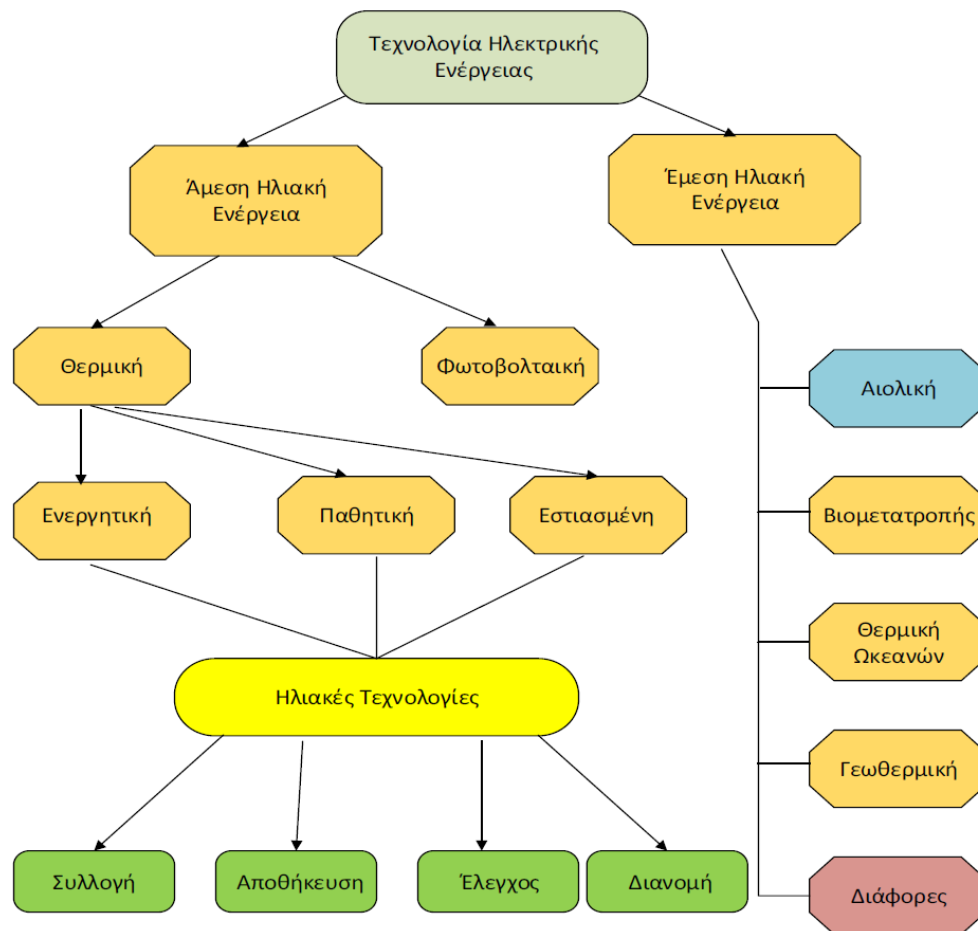


συστήματα στηρίζονται στη μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρικό ρεύμα μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου.



Εικόνα 1.1: Διάκριση ηλιακών συστημάτων

Η εκμετάλλευση της έμμεσης ηλιακής ακτινοβολίας γίνεται με την παραγωγή αιολικής ενέργειας (οφείλεται σε διαφορές θερμοκρασίας από τόπο σε τόπο), υδραυλικής ενέργειας (μέσω του φαινομένου της εξάτμισης) και βιομάζας (μέσω της διαδικασίας της φωτοσύνθεσης).



Εικόνα 1.2 Άμεση και έμμεση ηλιακή ακτινοβολία

## 1.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΚΜΕΤΑΛΕΥΣΗΣ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

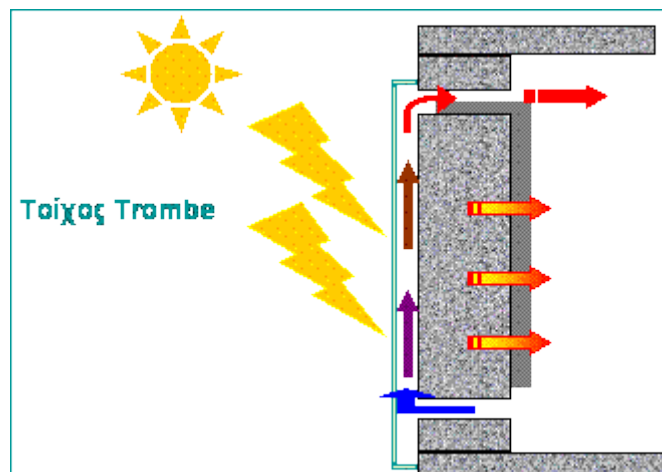
### 1.2.1 ΕΝΕΡΓΗΤΙΚΑ ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Ενεργητικά ηλιακά συστήματα είναι όσα συλλέγουν την ηλιακή ακτινοβολία και υπό μορφή θερμότητας τη μεταφέρουν σε κάποιο ρευστό, π.χ. νερό ή αέρας. Η τεχνολογία που εφαρμόζεται είναι αρκετά απλή και υπάρχουν πολλές δυνατότητες εφαρμογής της ακόμη και σε θερμικές εφαρμογές χαμηλών θερμοκρασιών. Η πιο απλή και διαδεδομένη μορφή των ηλιοθερμικών συστημάτων, είναι οι γνωστοί σε όλους μας ηλιακοί θερμοσίφωνες, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ζεστού νερού για απλή οικιακή χρήση ή για πιο σύνθετη βιομηχανική χρήση. Τελευταία δε ακόμη και για θέρμανση και ψύξη χώρων, μέσω κατάλληλων διατάξεων. Ένα τυπικό σύστημα παραγωγής ζεστού νερού, αποτελείται από επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες, ένα δοχείο αποθήκευσης της θερμότητας και τις σωληνώσεις. Η ηλιακή ακτινοβολία

απορροφάται από το συλλέκτη και η συλλεγόμενη θερμότητα μεταφέρεται στο δοχείο αποθήκευσης. Στη χώρα μας βρίσκεται σήμερα εγκατεστημένη περίπου η μισή επιφάνεια ηλιακών συλλεκτών, από το σύνολο των κρατών μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Η απόδοση των ηλιακών συλλεκτών και η ποιότητά τους, γενικά έχουν βελτιωθεί τα τελευταία χρόνια.

## 1.2.2 ΠΑΘΗΤΙΚΑ ΗΛΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Τα παθητικά ηλιακά συστήματα αποτελούνται από δομικά στοιχεία, κατάλληλα σχεδιασμένα και συνδυασμένα μεταξύ τους, ώστε να υποβοηθούν την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας για το φυσικό φωτισμό των κτιρίων ή για ρύθμιση της θερμοκρασίας μέσα σ' αυτά, δηλαδή θέρμανση το χειμώνα και δροσισμό το καλοκαίρι με φυσικό τρόπο. Όταν τα συστήματα αυτά συνοδεύονται από κάποιο μηχανικό σύστημα χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης, ονομάζονται υβριδικά. Τα παθητικά ηλιακά συστήματα αποτελούν την αρχή της Βιοκλιματικής Αρχιτεκτονικής και μπορούν να εφαρμοστούν σε όλους σχεδόν τους τύπους κτιρίων. Η Βιοκλιματική Αρχιτεκτονική αποτελεί ευρύτερο κλάδο, που έχει ως στόχο την εναρμόνιση των κτιρίων με το περιβάλλον και με το μικροκλίμα της περιοχής τους. Τα παθητικά ηλιακά συστήματα είναι αναπόσπαστα στοιχεία ενός βιοκλιματικού κτιρίου.

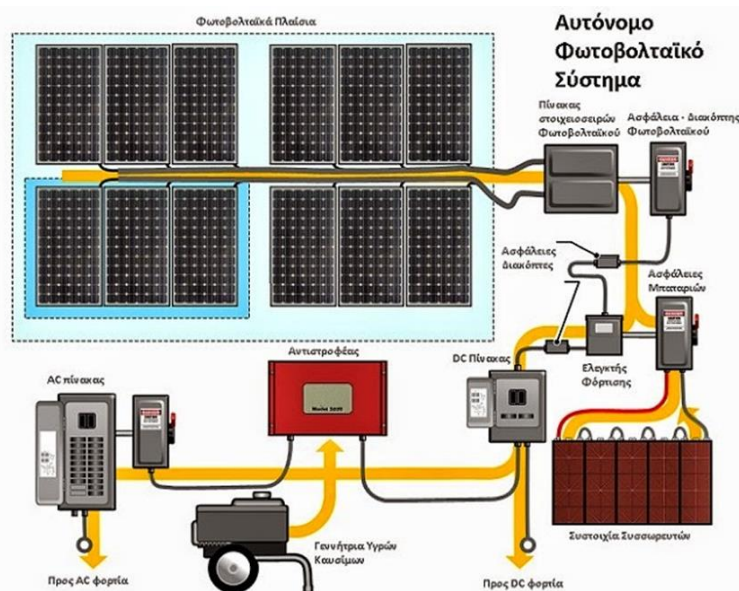


Εικόνα 1.3: Παράδειγμα παθητικού ηλιακού συστήματος Τοίχος Trombe

### 1.2.3 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Πρόκειται για συστήματα που μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια και που εδώ και πολλά χρόνια, χρησιμοποιούνται από απλές ηλεκτρονικές συσκευές έως την ηλεκτροδότηση μη διασυνδεδεμένων καταναλώσεων. Δορυφόροι, φάροι και απομονωμένα σπίτια χρησιμοποιούν παραδοσιακά τα φωτοβολταϊκά για την ηλεκτροδότησή τους. Ανάλογα με τη χρήση του παραγόμενου ρεύματος τα φωτοβολταϊκά κατατάσσονται σε:

- 1) Αυτόνομα συστήματα, η παραγόμενη ενέργεια των οποίων καταναλώνεται επί τόπου και εξολοκλήρου, από την παραγωγή στην κατανάλωση.



Εικόνα 1.4: Αυτόνομο Φωτοβολταϊκό Σύστημα

- 2) Διασυνδεδεμένα συστήματα, η παραγόμενη ενέργεια των οποίων διοχετεύεται στο ηλεκτρικό δίκτυο για να μεταφερθεί και να καταναλωθεί αλλού. Στην Ελλάδα η προοπτική ανάπτυξης των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι τεράστια, λόγω του ιδιαίτερου υψηλού δυναμικού ηλιακής ενέργειας. Θα πρέπει τέλος να τονίσουμε ότι κατά τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών συστημάτων δεν υπάρχουν επιπτώσεις στο περιβάλλον, οι εκπομπές ρύπων είναι μηδαμινές και δεν προκαλείται ηχορύπανση. Η χρήση ηλιακών συστημάτων σε κλιματικές συνθήκες όπως οι ελληνικές θεωρείται ότι είναι τεχνικά εφικτή, απλή και οικονομικά συμφέρουσα, αν συνδυαστεί με τη μελέτη και κατασκευή του κτιρίου, την καλή μόνωση, την αξιοποίηση της πλεονάζουσας θερμικής ενέργειας και τέλος την συνεργασία του χρήστη.

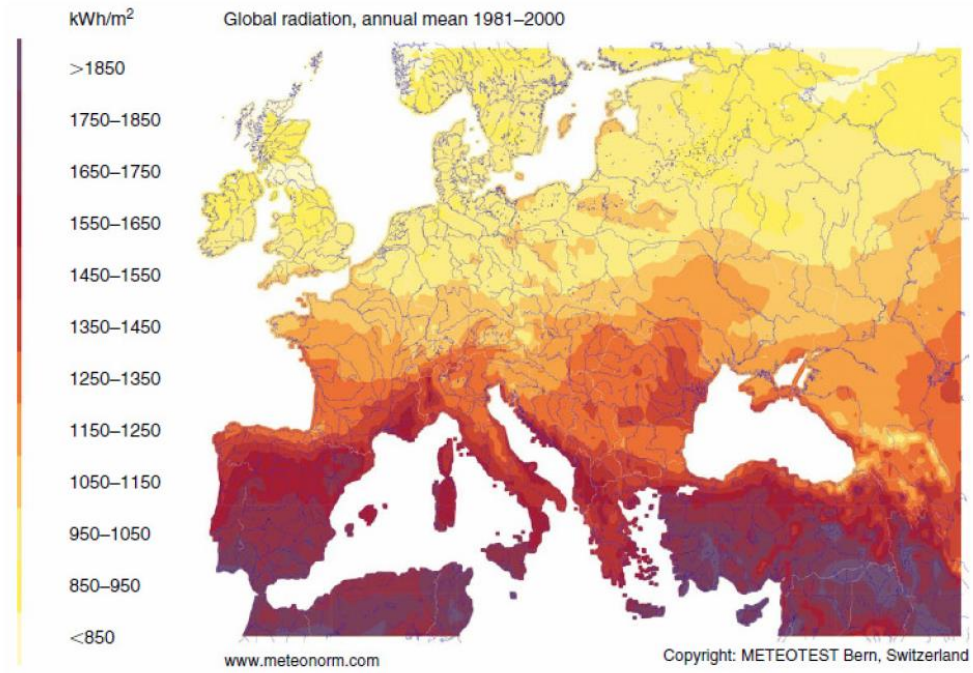
## 1.3 ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

### 1.3.1 ΤΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ

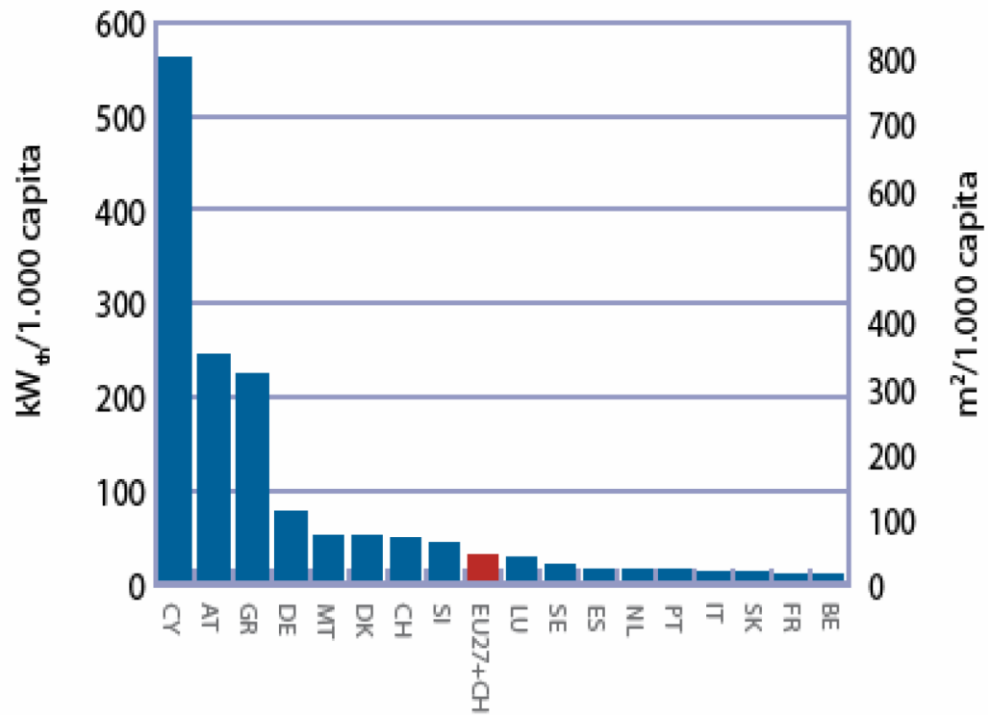
Τα τελευταία χρόνια και εξαιτίας του σύγχρονου τρόπου ζωής παρατηρείται μια μεγάλη αύξηση στην ετήσια κατανάλωση ενέργειας. Κύρια πηγή για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών αποτελούν τα πετρελαιοειδή και τα παράγωγά τους καθώς και ο άνθρακας. Λαμβάνοντας όμως υπόψιν και την ραγδαία αύξηση του πληθυσμού εύκολα γίνεται αντιληπτό ότι η επάρκεια των ορυκτών καυσίμων κρίνεται αβέβαιη. Σύμφωνα με το BP EENERGY OUTLOOK 2035 η παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας αναμένεται να αυξηθεί κατά 37% μεταξύ του 2013 και 2035. Η ανθρωπότητα καλείται να βρει μια βιώσιμη λύση του ενεργειακού προβλήματος στρεφόμενη προς τις ΑΠΕ και σε λύσεις για την εξοικονόμηση ενέργειας σε κάθε πτυχή της ανθρώπινης δραστηριότητας. Ο ήλιος ως μια ανεξάντλητη πηγή ενέργειας μπορεί να παίξει σημαντικό ρόλο στην λύση του προβλήματος.

### 1.3.2 ΤΟ ΗΛΙΑΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ

Η Ελλάδα εξαιτίας της γεωγραφικής της θέσης έχει ένα εξαιρετικά υψηλό ηλιακό δυναμικό προς εκμετάλλευση. Η μέση τιμή της ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται η χώρα μας κυμαίνεται στο επίπεδο των 1850 KWh/m<sup>2</sup>. Το γεγονός αυτό καθιστά την χώρα μας ιδανική για την εγκατάσταση ενεργητικών και παθητικών ηλιακών συστημάτων. Στην Ελλάδα η πιο διαδεδομένη χρήση της ηλιακής ενέργειας είναι η χρήση του ηλιακού θερμοσίφωνα. Συγκεκριμένα σύμφωνα με την Greenpeace ανά 1000 κατοίκους αντιστοιχούν 350 m<sup>2</sup> (0,35m<sup>2</sup>/κάτοικο) ηλιακών συλλεκτών. Με αυτό τον τρόπο η χώρα εξοικονομεί περίπου 200MW/1000MW παραγόμενες από θερμοηλεκτρικό σταθμό. Εκτός όμως από τα άμεσα οφέλη της εξοικονόμησης ενέργειας για κάθε τετραγωνικό μέτρο ηλιακού συλλέκτη μειώνεται η εκπομπή CO<sub>2</sub> κατά 0,5tn/year. Σε Ευρωπαϊκό επίπεδο τον υψηλότερο δείκτη τον έχει η Κύπρος, όπου πάνω από το 90% των κατοικιών είναι εξοπλισμένα με ηλιακούς συλλέκτες, με 554,0kWh/1000 κατοίκους και ακολουθεί η Αυστρία με 314,5kWh/1000 κατοίκους και η Ελλάδα με 265,8kWh/1000 κατοίκους[1]. Τα παραπάνω στοιχεία φαίνονται αναλυτικά στο γράφημα που ακολουθεί.



Εικόνα 1.5: Ηλιακό δυναμικό της Ελλάδος



Εικόνα 1.6: Αναλογία ηλιακών συλλεκτών ανά κάτοικο στην Ε.Ε.

## 1.4 ΗΛΙΑΚΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ

### 1.4.1 ΚΑΛΥΨΗ ΑΝΑΓΚΩΝ ΖΕΣΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΧΡΗΣΗΣ

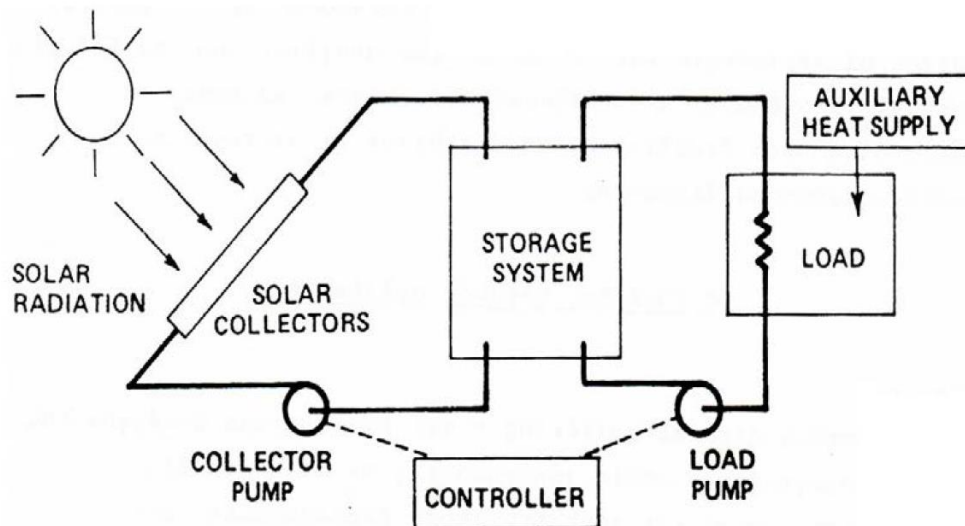
Μια βασική καθημερινή και ενεργοβόρα κατανάλωση του ανθρώπου είναι το ζεστό νερό χρήσης. Από μελέτες που έγιναν έχουν καταγραφεί τα εξής ποσοστά για την συνολική κατανάλωση νερού από μια οικία, περίπου το 40% απορρίπτεται από την χρήση του μπάνιου το 25% καταναλώνεται για τις ανάγκες της σωματικής καθαριότητας και το 35% για ανάγκες καθαριότητας. Στατιστικά η μέση κατανάλωση νερού είναι από 30-50ltr κατ' άτομο και ανά ημέρα. Από αυτά περίπου τα 20ltr είναι σε απαιτήσεις για ζεστό νερό χρήσης. Δηλαδή για μια τετραμελή οικογένεια απαιτούνται 80ltr τουλάχιστον ημερησίως ζεστού νερού. Αν υποθέσουμε την χρήση ενός συμβατικού ηλεκτρικού θερμοσίφωνα ισχύος 4KW για την θέρμανση του νερού και ότι αυτός θα παραμένει σε λειτουργία κατά μέσο όρο για 2 ώρες/ημέρα τότε η ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ανέρχεται σε 2920KWh. Η ενέργεια αυτή μπορεί να εξοικονομηθεί με τη χρήση ηλιακού συλλέκτη ο οποίος θα καλύπτει καθ' όλη τη διάρκεια του έτους τις απαιτήσεις της οικίας.

### 1.4.2 ΕΙΔΗ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ

#### 1.4.2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Οι ηλιακοί συλλέκτες αποτελούν τμήμα των αποκαλούμενων ηλιακών θερμικών συστημάτων. Τα ηλιακά θερμικά συστήματα αποτελούνται από :

- Σύστημα συλλογής της ηλιακής ενέργειας (ηλιακοί συλλέκτες)
- Σύστημα αποθήκευσης
- Βοηθητικό σύστημα παραγωγής θερμότητας
- Κυκλοφορητές και συστήματα ελέγχου (σε μεγάλες εγκαταστάσεις).



Εικόνα 1.7: Απεικόνιση ηλιακού θερμικού συστήματος

Οι ηλιακοί συλλέκτες χωρίζονται σε 3 κατηγορίες:

- A) Επίπεδοι Συλλέκτες
- B) Συλλέκτες χωρίς κάλυμμα (πλαστικοί)
- Γ) Συλλέκτες που χρησιμοποιούν σωλήνες κενού.

#### 1.4.2.2 ΕΠΙΠΕΔΟΙ ΗΛΙΑΚΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ

Οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες είναι η πιο διαδεδομένη μορφή συλλεκτών για την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης. Οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες έκαναν την εμφάνιση τους στις αρχές της δεκαετίας του 1970, και ακόμα και σήμερα είναι η πιο συμφέρουσα από οικονομοτεχνικής πλευράς λύση για θέρμανση νερού έως τους 60°C.

Τα βασικά τμήματα ενός επιπέδου ηλιακού συλλέκτη είναι:

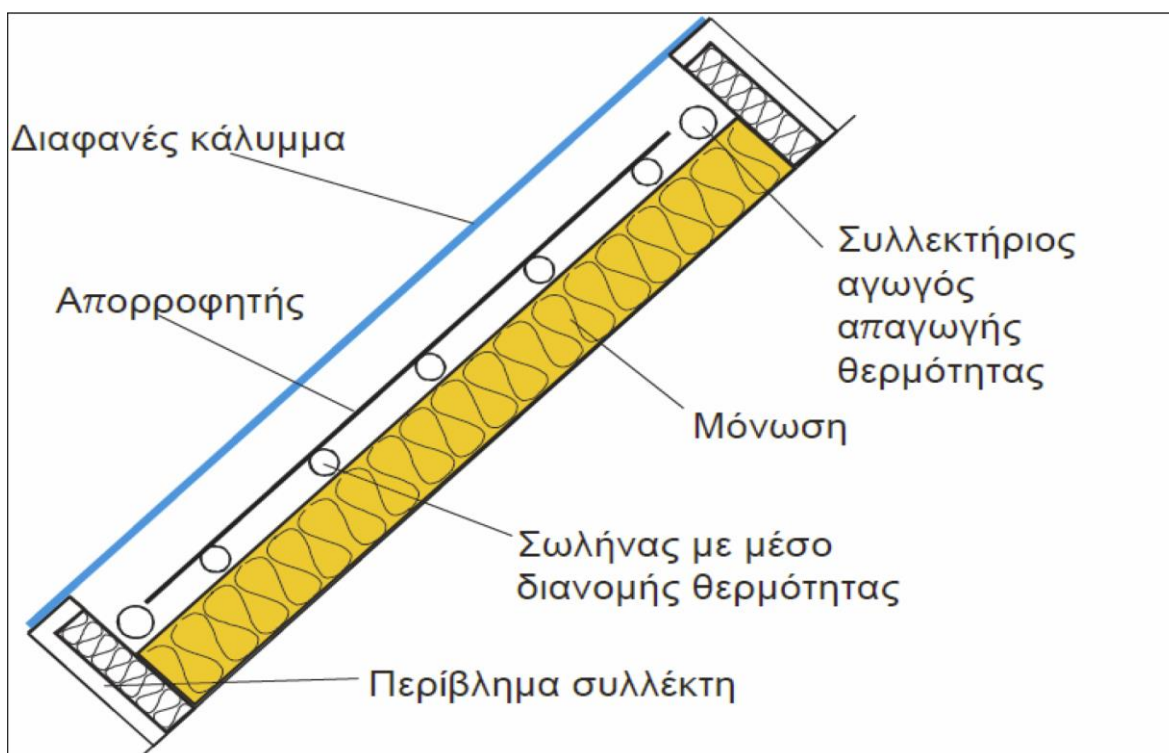
- Ο απορροφητήρας, ο οποίος περιλαμβάνει την απορροφητική επιφάνεια και τους σωλήνες μέσα στους οποίους ρέει το ρευστό.
- Η μόνωση του απορροφητή.
- Το διαφανές στην ορατή ακτινοβολία κάλυμμα.
- Το πλαίσιο του συλλέκτη, κατασκευασμένο συνήθως από αλουμίνιο

Η συλλογή της ηλιακής ακτινοβολίας είναι βασισμένη στο "φαινόμενο του θερμοσίφωνου, σύμφωνα με το οποίο η κίνηση του ζεστού νερού, οφείλεται στην διαφορά

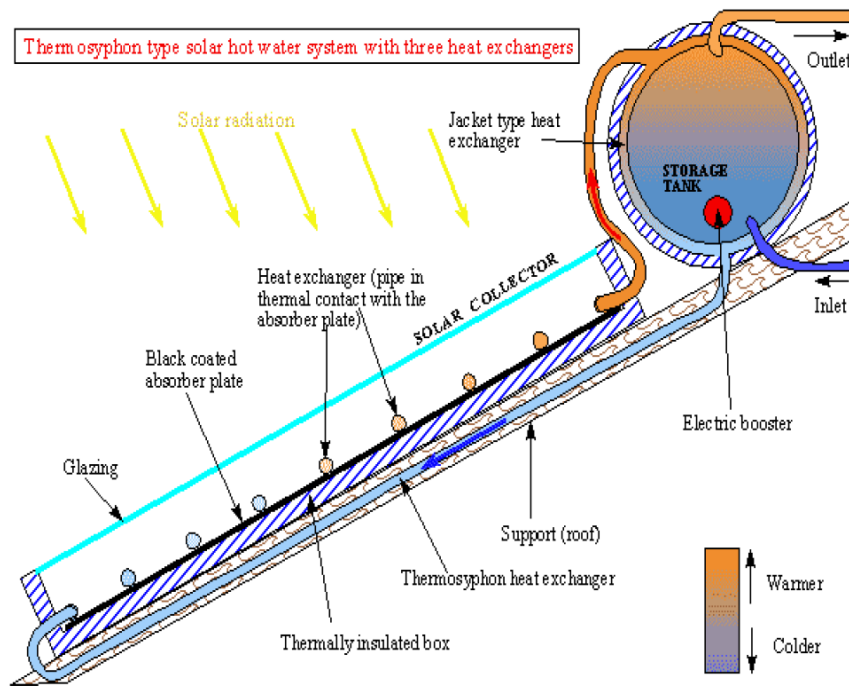


πίεσης που δημιουργείται κατά την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας.

Μεγάλο ποσοστό της ακτινοβολίας του ήλιου διαπερνά το γυάλινο παράθυρο του συλλέκτη και χτυπά την εσωτερική επιφάνεια του (απορροφητή). Ο απορροφητής μετατρέπει την ηλιακή ακτινοβολία σε θερμότητα η οποία αποτρέπεται η διαφυγή της από τους υαλοπίνακες τα πλευρικά τοιχώματα και την μόνωση του συλλέκτη. Σε επαφή με την απορροφητική επιφάνεια του συλλέκτη, βρίσκονται οι σωληνώσεις στις οποίες κυκλοφορεί νερό και αποσπών την συγκεντρωμένη ενέργεια. Αυτή την ενέργεια τη μεταφέρουμε, με τη μορφή ζεστού νερού, σε μονωμένη δεξαμενή αποθήκευσης, απ' όπου θα την χρησιμοποιήσουμε όταν την χρειαστούμε. Η πυκνότητα του νερού μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Τοποθετώντας λοιπόν το δοχείο αποθήκευσης σε υψηλότερη θέση από το συλλέκτη επιτυγχάνεται φυσική κυκλοφορία του νερού, ενώ σε διαφορετική περίπτωση (π.χ. συστήματα θέρμανσης πισίνας) απαιτείται η χρήση κυκλοφορητή



Εικόνα 1.8 : Σχηματική απεικόνιση επίπεδου ηλιακού συλλέκτη



Εικόνα 1.9: Λειτουργία επίπεδου ηλιακού συλλέκτη με φυσική κυκλοφορία

Το σημαντικότερο κατασκευαστικό στοιχείο του επίπεδου συλλέκτη το οποίο μπορεί να επηρεάσει και την απόδοσή του είναι ο απορροφητής. Ο απορροφητής απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία η οποία μετατρέπεται σε θερμότητα συνήθως είναι επικαλυμμένος με στρώμα μαύρου χρώματος ή με στρώμα επιλεκτικής βαφής. Οι συλλέκτες με επιλεκτική βαφή στον απορροφητή μπορεί να έχουν μέχρι και 30% μεγαλύτερη απόδοση, σε σχέση με τους επίπεδους συλλέκτες με απλή μαύρη βαφή λόγω της μείωσης των απωλειών λόγω ανάκλασης.



Εικόνα 1.10: Απορροφητής επίπεδου ηλιακού συλλέκτη

Βασικό μέγεθος που χαρακτηρίζει τον συλλέκτη αποτελεί ο βαθμός απόδοσής του ο οποίος ορίζεται από τη σχέση :

$$\eta = F_R * (\tau\alpha) - F_R * U_L * \frac{T_c - T_a}{G_T} \quad (1.1)$$

Όπου:

FR: συντελεστής θερμικής απολαβής του συλλέκτη

(τα)η: συντελεστής απορρόφησης ηλιακής ακτινοβολίας του απορροφητή

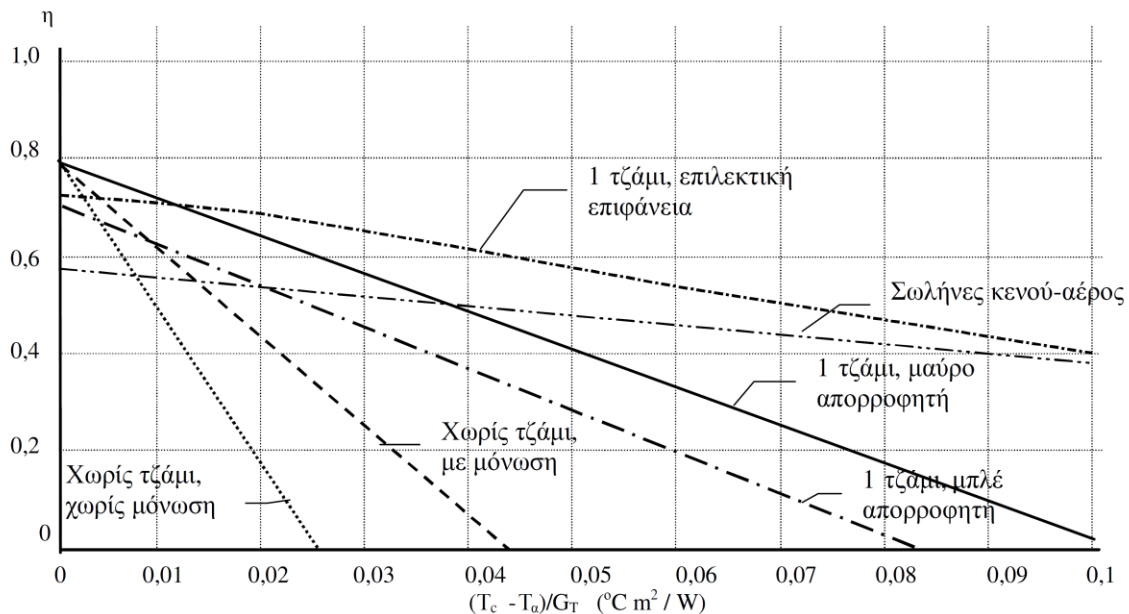
UL: συντελεστής ενεργειακών απωλειών του συλλέκτη (W/m<sup>2</sup>/°C)

G<sub>T</sub>: ένταση της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του συλλέκτη (W/m<sup>2</sup>)

T<sub>c</sub>: Θερμοκρασία του ρευστού στον συλλέκτη

T<sub>a</sub>: Θερμοκρασία περιβάλλοντος

Η επίδραση που έχει η επιλογή του απορροφητή στον βαθμό απόδοσης του συλλέκτη αποτυπώνεται στο παρακάτω διάγραμμα, καθώς επίσης και η απόδοση ανάλογα με τον τύπο του συλλέκτη.



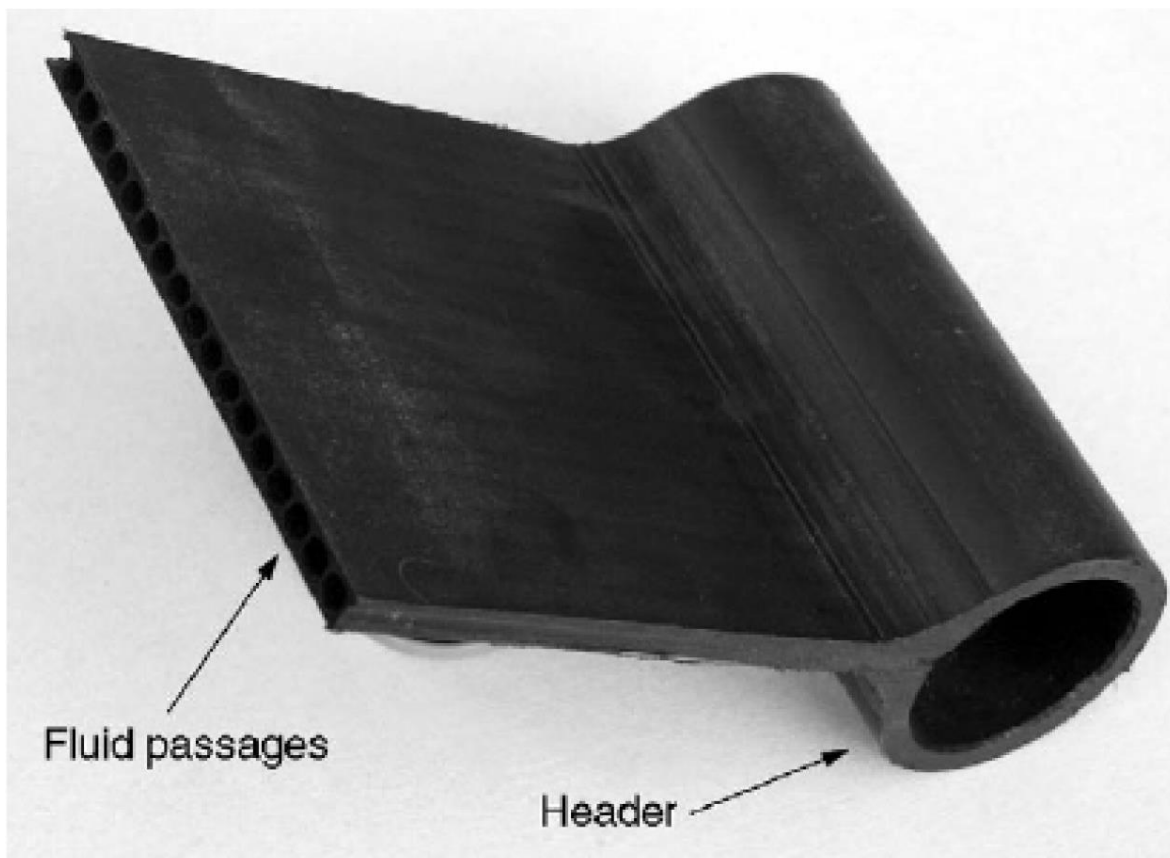
Εικόνα 1.11: Τύποι και απόδοση ηλιακού συλλέκτη

### 1.4.2.3 ΕΠΙΠΕΔΟΙ ΗΛΙΑΚΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ ΧΩΡΙΣ ΚΑΛΥΜΜΑ

Πρόκειται για την απλούστερη μορφή συλλεκτών. Η σημαντικότερη διαφορά σε σχέση με τους υπόλοιπους επίπεδους συλλέκτες έγκειται στο γεγονός ότι αποτελούνται μόνο από τον απορροφητή. Αναπτύσσει θερμοκρασίες 5-15°C πάνω από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Έχουν εφαρμογές μόνο σε κολυμβητικές δεξαμενές, όπου η επιθυμητή θερμοκρασία είναι σχετικά χαμηλή (25°C). Η επιφάνεια των ηλιακών συλλεκτών χρειάζεται να είναι περίπου το 80% της επιφάνειας της πισίνας, ενώ σε περίπτωση που χρησιμοποιηθούν επίπεδοι συλλέκτες, η επιφάνειά τους χρειάζεται να είναι περίπου το 60% της επιφάνειας της πισίνας. Δεν απαιτείται επιπρόσθετος εξοπλισμός (π.χ. μονάδα αποθήκευσης, εναλλάκτες θερμότητας κ.α.) που επιβαρύνει τον προϋπολογισμό. Έχουν χαμηλό κόστος (70-100€/m<sup>2</sup>) και σχετικά σύντομους χρόνους αποπληρωμής. Η αισθητική ένταξη των συλλεκτών του συστήματος είναι εξαιρετικά ομαλή. Ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες, το νερό κατευθύνεται είτε προς τους συλλέκτες είτε προς την βοηθητική πηγή ενέργειας (εάν υπάρχει). Η λύση αυτή μπορεί να επεκτείνει την κολυμβητική περίοδο από τον Απρίλιο μέχρι τον Οκτώβριο.



Εικόνα 1.12: Συλλέκτης χωρίς κάλυμμα



Εικόνα 1.13: Τομή ηλιακού συλλέκτη χωρίς κάλυμμα και μόνωση

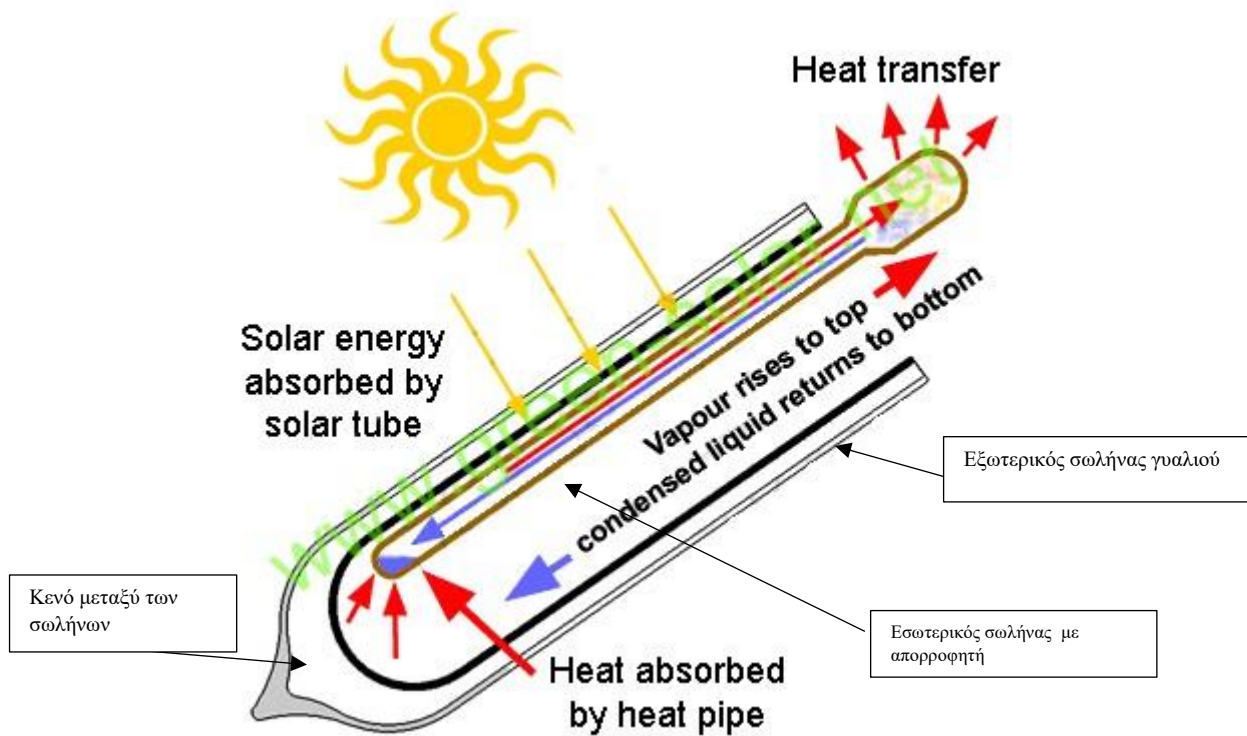
#### 1.4.2.4 ΗΛΙΑΚΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ ΚΕΝΟΥ

Μια νέα πολλά υποσχόμενη τεχνολογία στο χώρο των ηλιακών συλλεκτών που συνεχώς εξελίσσεται είναι ο σχεδιασμός συλλεκτών με τη χρήση σωλήνων κενού. Η φιλοσοφία αυτού του προτύπου βασίζεται στη μόνωση χαλκοσωλήνων με γυαλί που μέσα έχει δημιουργηθεί κενό. Η ιδέα της μόνωσης με κενό αποτελεί το κύριο πλεονέκτημα αυτής της τεχνολογίας καθώς έτσι αποφεύγονται όλες οι θερμικές απώλειες (αγωγής και συναγωγής). Εκτός από το κενό γίνεται και χρήση υλικών για τους απορροφητές τα οποία εμφανίζουν υψηλή απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας και μικρό συντελεστή ανακλαστικότητας. Εξαιτίας των παραπάνω η θερμοκρασία του ρευστού μπορεί να είναι υψηλότερη σε σχέση με τους κλασικούς επίπεδους συλλέκτες ενώ η θέρμανση του νερού γίνεται σε πολύ μικρότερο χρονικό διάστημα.

Το γυαλί που χρησιμοποιείται στους συλλέκτες κενού είναι ιδιαίτερης σκληρότητας, με μεγάλες αντοχές. Επίσης είναι επικολλημένο με ειδικό υλικό το οποίο προκαλεί την μέγιστη απορρόφηση των ηλιακών ακτίνων και ελάχιστες απώλειες επανεκπομπών. Ενδιάμεσα των δύο επιφανειών υπάρχει θερμοαπορροφητικό υλικό που με πολύ

αποτελεσματικό τρόπο μετατρέπει την ηλιακή ενέργεια σε θερμότητα. Το κενό αέρος το οποίο επικρατεί μεταξύ των δύο σωλήνων, αποτρέπει τη μετάδοση θερμότητας από τον εσωτερικό σωλήνα προς τον εξωτερικό, μέσω αγωγής ή συναγωγής. Έτσι λοιπόν, το σύνολο σχεδόν της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, μεταφέρεται και μετατρέπεται σε θερμότητα, στο θερμικό μέσο το οποίο ρέει μέσα στον εσωτερικό σωλήνα. Η θέρμανση του νερού μπορεί να γίνεται άμεσα, όταν το ίδιο το νερό είναι το εργαζόμενο μέσο, είτε έμμεσα μέσω της μεταφοράς θερμότητας στον συλλέκτη της εγκατάστασης όταν το εργαζόμενο μέσο είναι διαφορετικό. Όταν δε χρησιμοποιείται νερό συνήθως έχουμε ένα ανόργανο μη τοξικό υγρό, το οποίο βρίσκεται σε συνθήκες εξαιρετικά χαμηλών πιέσεων, βοηθώντας το να εξατμίζεται σε χαμηλές θερμοκρασίες, περίπου στους 25°C.

Ο θερμός ατμός, λοιπόν, στην περίπτωση αυτή, ανεβαίνει μέσα στο σωλήνα, μέχρι τη κορυφή του (συμπυκνωτής), όπου ανταλλάσσει θερμότητα με το νερό χρήσης. Με την ανταλλαγή θερμότητας το αέριο μετατρέπεται σε υγρό, και λόγω της βαρύτητας, κατέρχεται στο κάτω μέρος του σωλήνα και εκτίθεται και πάλι στην ηλιακή ακτινοβολία. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η τομή αυτού του τύπου σωλήνα κενού. Το βασικό εξάρτημα του συσσωρευτή είναι ο σωλήνας κενού διπλού τοιχώματος. Αποτελείται από δύο ομόκεντρους διαφανείς σωλήνες γυαλιού borosilicate ικανούς να αντισταθούν σε ακραίες καιρικές συνθήκες. Ο εσωτερικός σωλήνας είναι ντυμένος με ειδικό επίστρωμα απορροφητή AL-N/AL. Η ειδική αυτή επίστρωση απορροφά και μετατρέπει την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε θερμότητα η οποία στη συνέχεια μεταφέρεται στον σωλήνα θέρμανσης του εργαζόμενου μέσου.

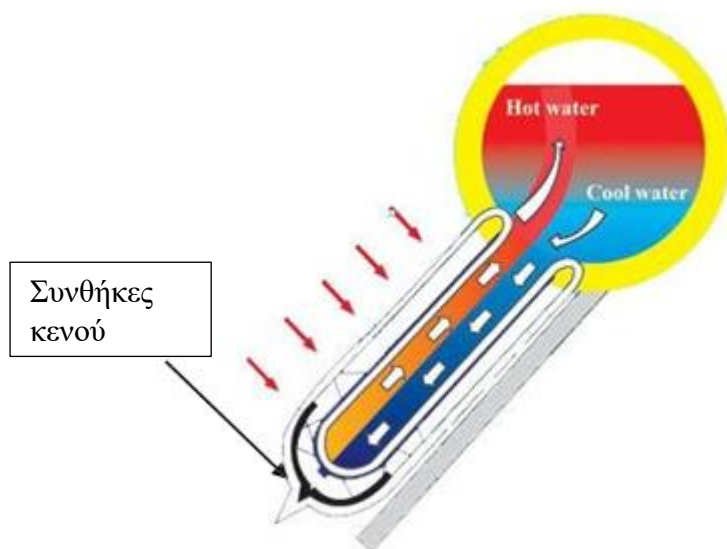


Εικόνα 1.14: Σχηματική απεικόνιση συλλέκτη κενού με χρήση ανόργανου υλικού για τη θέρμανση του νερού

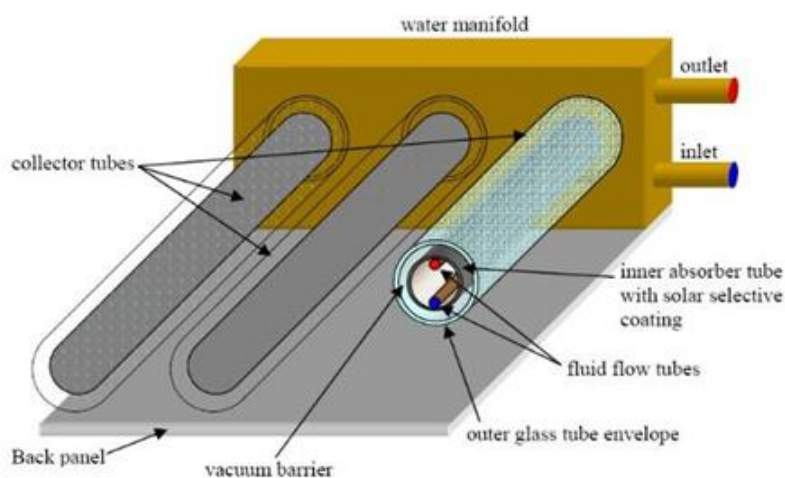


Εικόνα 1.15: Πραγματική διάταξη ηλιακού συλλέκτη κενού με χρήση ανόργανου μέσου για τη παραγωγή ΖΝΧ.

Στην περίπτωση όπου το εργαζόμενο μέσο είναι το νερό ένας από τους πιο διαδεδομένους τύπους συλλέκτη είναι ο τύπου ‘U’. Εδώ το νερό κυκλοφορεί μέσα σε ένα σωλήνα σχήματος U ο οποίος έρχεται σε άμεση επαφή με τον απορροφητή. Το κενό δημιουργείται μεταξύ του εξωτερικού γυάλινου σωλήνα και του εσωτερικού σωλήνα (απορροφητή) που φέρει επένδυση με επίλεκτο απορροφητή. Έτσι μέσω της φυσικής κυκλοφορίας, το νερό θερμαίνεται οδηγούμενο σε ένα κολεκτέρ απ’ όπου και καταλήγει στο δοχείο αδρανείας της εγκατάστασης.

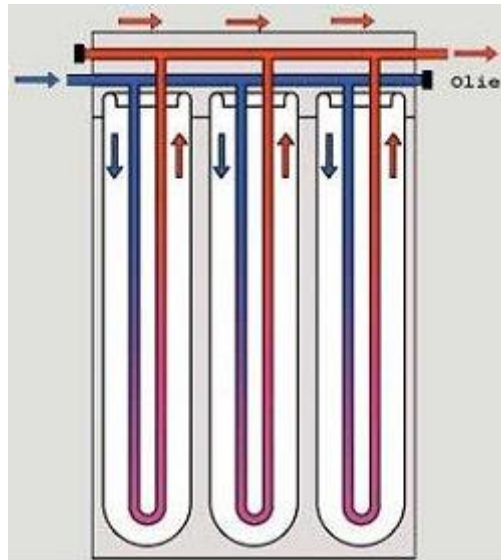


Εικόνα 1.16: Συλλέκτης κενού τύπου U με άμεση θέρμανση του νερού και συνθήκες κενού μεταξύ των δύο γυάλινων σωλήνων.



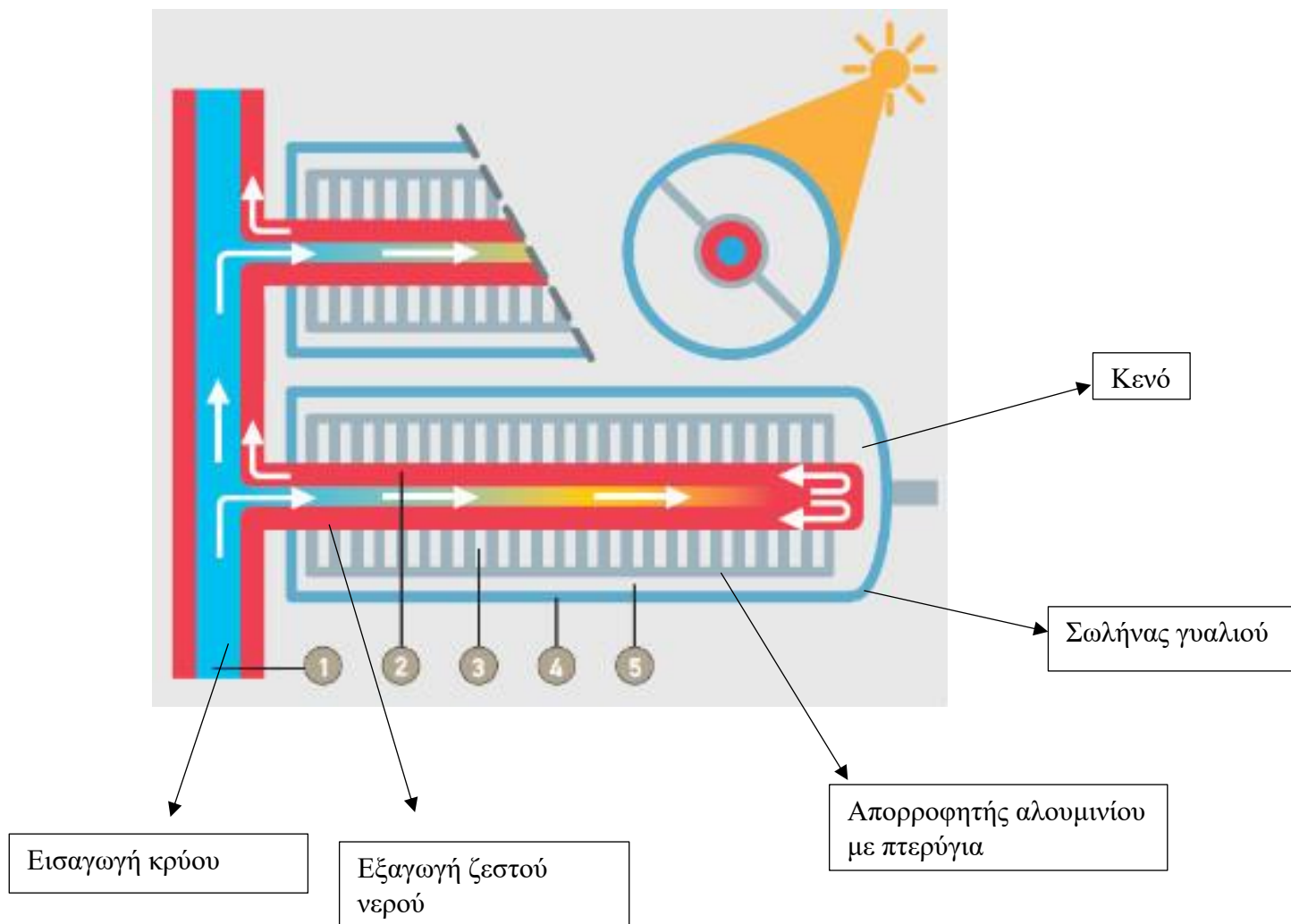
Εικόνα 1.17 : Συλλέκτης κενού τύπου U, εδώ οι συνθήκες κενού δημιουργούνται μεταξύ του γυάλινου σωλήνα και του απορροφητή.





**Εικόνα 1.18:** Απεικόνιση της κυκλοφορίας του νερού σε συλλέκτη τύπου U

Ο τύπος συλλέκτη κενού που θα μελετηθεί και στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζεται στο σχήμα 1.19. Εδώ έχουμε ένα σύστημα δύο σωλήνων αντιρροής όπου ο ένας βρίσκεται μέσα στον άλλο. Στον σωλήνα της μικρής διαμέτρου (εσωτερικό) εισάγεται αρχικά το νερό του δικτύου. Το νερό αρχίζει να θερμαίνεται καθώς ρέει στον εσωτερικό σωλήνα ενώ στη συνέχεια καταλήγει στο διάκενο μεταξύ των δυο σωλήνων όπου συνεχίζει να θερμαίνεται μέχρι να φτάσει στο κολεκτέρ της εγκατάστασης. Το κενό αναπτύσσεται μεταξύ του εξωτερικού γυάλινου σωλήνα και του απορροφητή του συλλέκτη ο οποίος φέρει πτερύγια και περιβάλλει τον εξωτερικό σωλήνα του νερού. Αναλυτικότερα η λειτουργία του παραπάνω συλλέκτη φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Εικόνα 1.19: Συλλέκτης κενού με διπλό σωλήνα αντιστροφής.

### 1.5 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ ΚΕΝΟΥ ΠΟΥ ΘΑ ΜΕΛΕΤΗΘΕΙ

Στον πίνακα που ακολουθεί δίνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συλλέκτη κενού που θα μελετηθεί.

<b>Τύπος Συλλέκτη</b>	<b>SEIDO 2-8</b>
Κατασκευή	Συλλέκτης σωλήνων κενού άμεσης ροής
Πιστοποίηση	<b>EN 12975</b>
Γωνία κλίσης	0-90°
Επιφάνεια απορρόφησης	0.175m <sup>2</sup>
Πάχος απορροφητή	0,47mm
Πτώση πίεσης στο συλλέκτη	<7mbar(100L/h)
Περιεκτικότητα υγρού στο συλλέκτη	1.3L

Τύπος γυαλιού	Borocilicate glass
Διάμετρος σωλήνα γυαλιού	102mm
Πάχος γυαλιού	1.8mm
Συντελεστής εκπομπής γυάλινου σωλήνα	0,91
Διάμετρος εξωτερικού σωλήνα	12mm
Πάχος εξωτερικού σωλήνα	2mm
Διάμετρος εσωτερικού σωλήνα	6mm
Πάχος εσωτερικού σωλήνα	1.5mm
Εκπομπή	>90
Υλικό απορροφητή	Αλουμίνιο
Απορροφητικότητα	>0.92
Εκπομπή	<0.08
Υλικό συλλέκτη διανομής	Αλουμίνιο
Χρώμα συλλέκτη διανομής	Καφέ
Μόνωση	Αφρώδης Πολυουρεθάνη
Μέγιστη πίεση λειτουργίας	6 bar
Θερμοκρασία αδράνειας συλλέκτη	190°C
Θερμοκρασία αδράνειας Σωλήνα	276°C
Σύνδεση	Τεχνική σύσφιξη

Πίνακας 1.1: Τεχνικά στοιχεία του υπό μελέτη συλλέκτη

## 1.6 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

### 1.6.1 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΙ ΗΛΙΑΚΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ

Οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες χρησιμοποιούνται κυρίως για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και σε εφαρμογές μεσαίων και υψηλών θερμοκρασιών, καθώς το εργαζόμενο μέσο μπορεί να αγγίξει υψηλότερες θερμοκρασίες από ότι σε έναν επίπεδο συλλέκτη. Η υψηλότερη συγκέντρωση των ηλιακών ακτινών στον συγκεντρωτικό ανακλαστή οδηγείται απευθείας σε έναν μικρότερο δέκτη με μεγάλη απορροφητική επιφάνεια. Μέσα στον δέκτη κυκλοφορεί το εργαζόμενο μέσο, το οποίο λαμβάνει την θερμότητα και την μεταφέρει. Οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες συμπεριφέρονται βέλτιστα κατά την υψηλή ένταση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ η διάχυτη ακτινοβολία έχει αρνητικές επιπτώσεις στην απόδοσή τους. Οι κυριότερες διατάξεις συγκεντρωτικών θερμικών ηλιακών συλλεκτών είναι οι εξής[2]:

### Παραβολικά κοίλα κάτοπτρα:

- Κοίλο κάτοπτρο (PTC)
- Σκάφης
- CPC (compound parabolic collector):

### Παραβολικά πιάτα:

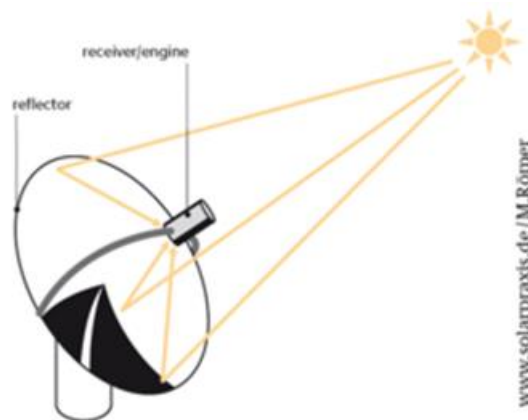
- Τυπικό παραβολικό

### Fresnel

### Πύργοι ισχύος με ηλιοστάτες

Οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες απαιτούν την συνεχή παρακολούθηση του ήλιου, ώστε να βρίσκονται σε ορθή λειτουργία. Για τον σκοπό αυτό προσαρτώνται απλά συστήματα ρύθμισης προσανατολισμού, ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος και την ηλιακή γωνία. Επιπλέον έχουν υψηλό εμπορικό κόστος λόγω της τεχνικής τους πολυπλοκότητας και των υλικών που χρησιμοποιούνται.

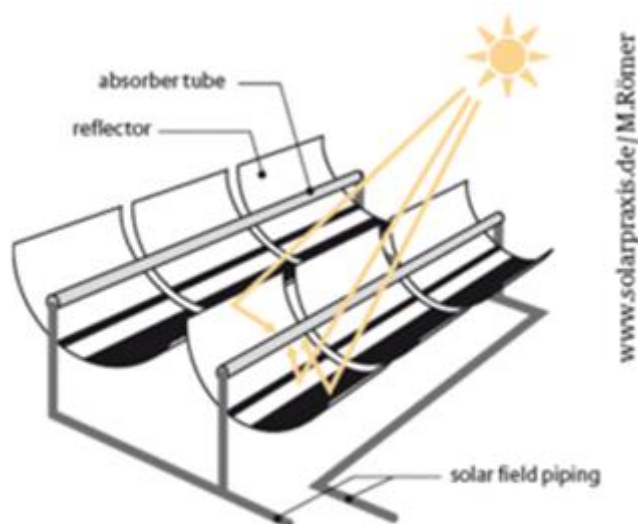
Τα παραβολικά πιάτα αποτελούνται από μεταλλικές επιφάνειες σε σχήμα παραβολής ενωμένες σε μορφή δορυφορικού πιάτου. Οι ανακλώμενες ακτίνες οδηγούνται προς το εστιακό σημείο της γεωμετρίας του πιάτου, όπου προσαρμόζεται ο δέκτης. Συνηθισμένη μορφή είναι το σύστημα «Stirling», όπου προσαρμόζεται ένας κινητήρας «Stirling» στο εστιακό σημείο για απευθείας μετατροπή της ενέργειας.



Εικόνα 1.20: Σύστημα παραβολικού δίσκου ( ηλιακό πιάτο)

Τα παραβολικά κάτοπτρα σε μορφή σκάφης χρησιμοποιούνται για να συγκεντρώσουν το ηλιακό φως σε έναν διαφανή σωλήνα που διατρέχει κάθε σκάφη. Η σκάφη

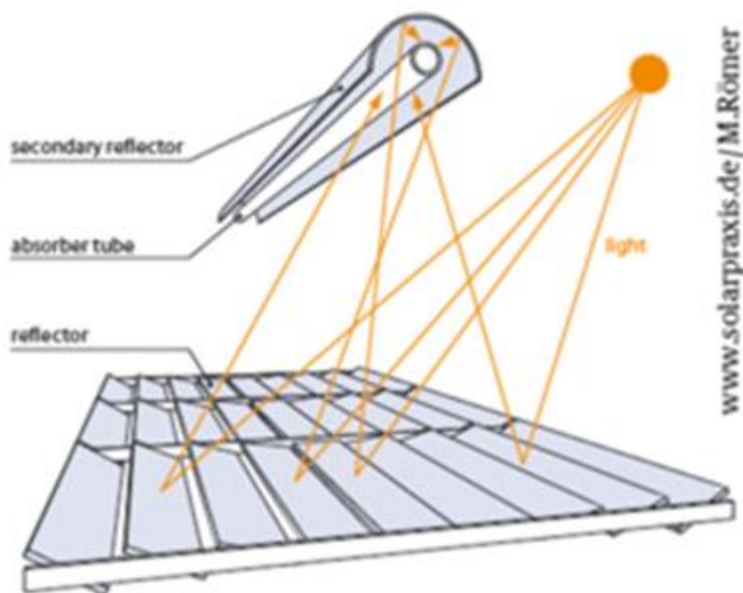
περιστρέφεται κατά τη διάρκεια της ημέρας, ώστε να διατηρεί την εστίαση του κατόπτρου, ακολουθώντας την τροχιά του ήλιου. Το υγρό (λάδι) που κυκλοφορεί μέσα στον σωλήνα θερμαίνεται και δημιουργεί ατμό μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας. Ο ατμός, με τη σειρά του, τροφοδοτεί έναν ατμοστρόβιλο, ο οποίος παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Η ενέργεια παρέχεται άμεσα στο ηλεκτρικό δίκτυο, αλλά το περίσσειμά της είτε αποθηκεύεται με τη μορφή θερμότητας για να συνεχίζεται η παροχή και τη νύχτα, είτε διοχετεύεται σε παραπλήσια μονάδα αφαλάτωσης θαλασσινού νερού.



Εικόνα 1.21: Βασική λειτουργία συστήματος παραβολικού συλλέκτη σκάφης

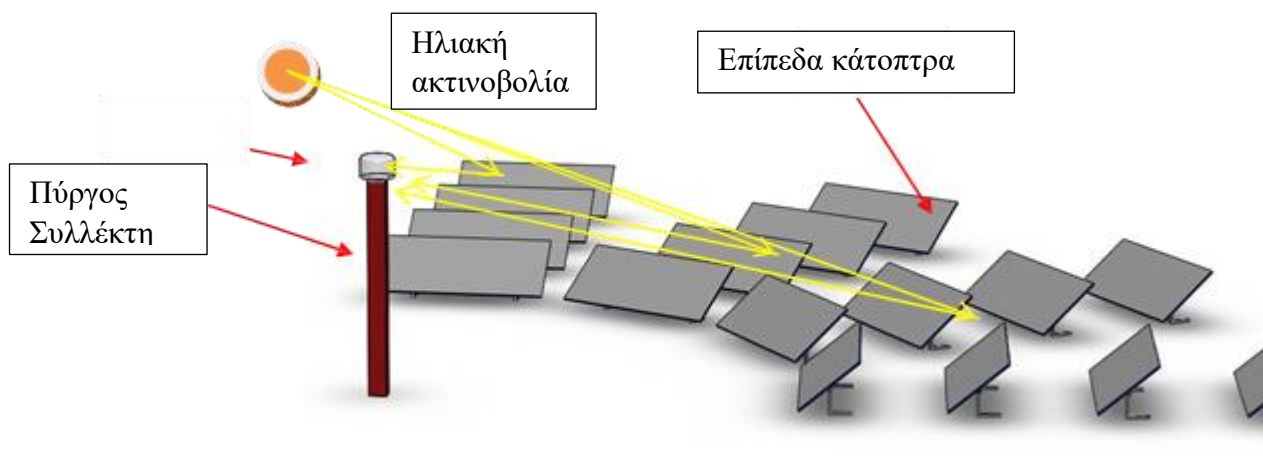
Η τεχνολογία συστημάτων Φρενέλ στηρίζεται στις βασικές αρχές που διέπουν την τεχνολογία παραβολικών συλλεκτών σκάφης. Η διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι τα παραβολικά κάτοπτρα αντικαθίστανται από καθρέπτες Φρενέλ, οι οποίοι είναι λεπτοί καθρέπτες πολύ μικρής καμπυλότητας. Οι καθρέπτες μπορούν να ακολουθούν την πορεία του ήλιου (single axis tracking) και είναι διαρρυθμισμένοι με τέτοιο τρόπο ούτως ώστε η ηλιακή ακτινοβολία να αντανακλάται και να συλλέγεται σε σταθερό ευθύγραμμο σωλήνα συλλογής θερμότητας που τοποθετείται παράλληλα και κατά μήκος των καθρεπτών στο εστιακό τους σημείο. Το εστιακό σημείο βρίσκεται αρκετά μέτρα πάνω από τους καθρέπτες αυτούς. Οι καθρέπτες Φρενέλ μπορούν να συγκεντρώνουν την ηλιακή ενέργεια μέχρι και 30 φορές πέραν της κανονικής ηλιακής έντασης. Ακριβώς πάνω και γύρω από τη σωλήνα συλλογής, συνήθως τοποθετείται μικρό παραβολικό κάτοπτρο (που ονομάζεται συμπληρωματικός ανακλαστήρας), για περαιτέρω εστίαση της ηλιακής ακτινοβολίας όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.21. Μέσα στην σωλήνα συλλογής θερμότητας βρίσκεται συνήθως νερό το οποίο μετατρέπεται με την απορρόφηση της θερμότητας άμεσα σε ατμό (direct steam generation). Ο ατμός χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ατμοστρόβιλου σε κλασικό κύκλο Rankine. Οι

συνηθισμένες συνθήκες ατμού στην είσοδο του ατμοστροβίλου με αυτή την τεχνολογία, είναι 270°C στα 55bar. Η οπτική απόδοση ενός τυπικού συστήματος Φρενέλ μπορεί να φθάσει το 70% και είναι μικρότερη από αυτή ενός παραβολικού συλλέκτη σκάφης όπου κυμαίνεται από 75 – 80%. Η μειωμένη απόδοση αποτελεί και το κυριότερο μειονέκτημα αυτής της τεχνολογίας σε σύγκριση με την τεχνολογία παραβολικών συλλεκτών σκάφης. Το πλεονέκτημα της τεχνολογίας αυτής είναι η απλούστερη κατασκευή και η χρήση οικονομικότερων υλικών λόγω των χαμηλότερων θερμοκρασιών που αναπτύσσονται.



Εικόνα 1.21: Βασική λειτουργία συστήματος Frenel

Οι πύργοι ισχύος τοποθετούνται συνήθως σε μεγάλες εκτάσεις με πλήθος ηλιοστατών, προσανατολισμένους ώστε η προσπίπτουσα ακτινοβολία να οδηγείται στον κορυφή του πύργου. Εκεί βρίσκεται ο δέκτης που παραλαμβάνει την θερμότητα του ήλιου και την μεταφέρει σε κάποιο ρευστό μέσο. Βασίζονται δηλαδή στη συγκέντρωση της ακτινοβολίας σε ένα κεντρικό σημείο (Tower), όπου η ανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας προέρχεται από τα επίπεδα κάτοπτρα.



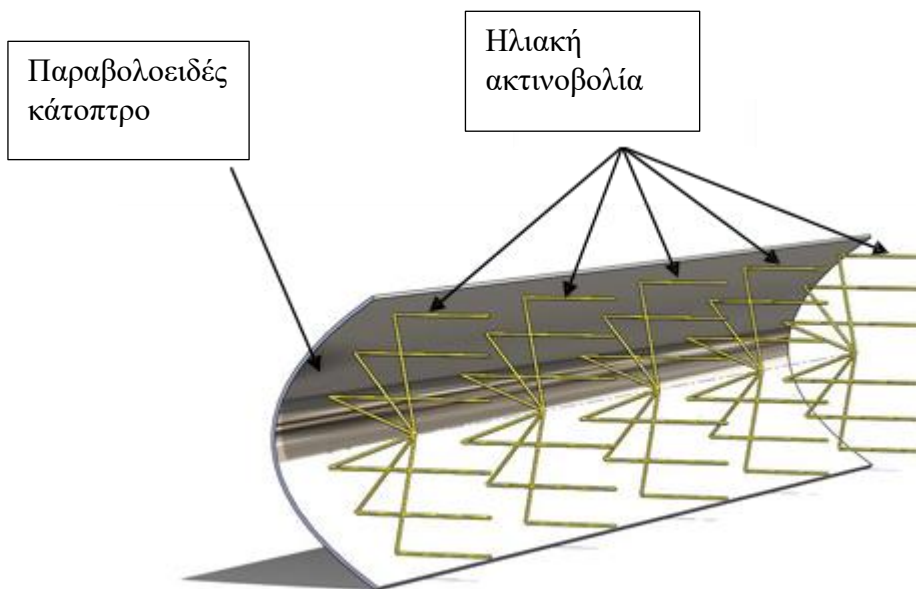
Εικόνα 1.22: Πύργος Ισχύος με επίπεδα κάτοπτρα

Το πιο διαδεδομένο είδος των συγκεντρωτικών θερμικών ηλιακών συστημάτων είναι τα παραβολικά κοίλα κάτοπτρα (Parabolic Trough Collectors, PTC). Αυτά αποτελούνται από μία ή περισσότερες σειρές κοίλων κάτοπτρων, φτιαγμένα από μεταλλικά, συνήθως, φύλλα που έχουν κατεργαστεί κατάλληλα, ώστε να ενώνονται στο σχήμα της παραβολής. Η άμεση ηλιακή ακτινοβολία που πέφτει σε αυτά ανακλάται σε σωληνοειδή δέκτη. Ο δέκτης βρίσκεται στην εστιακή γραμμή της παραβολής και μέσα από αυτόν κυκλοφορεί το ρευστό που μεταφέρει τη θερμότητα.

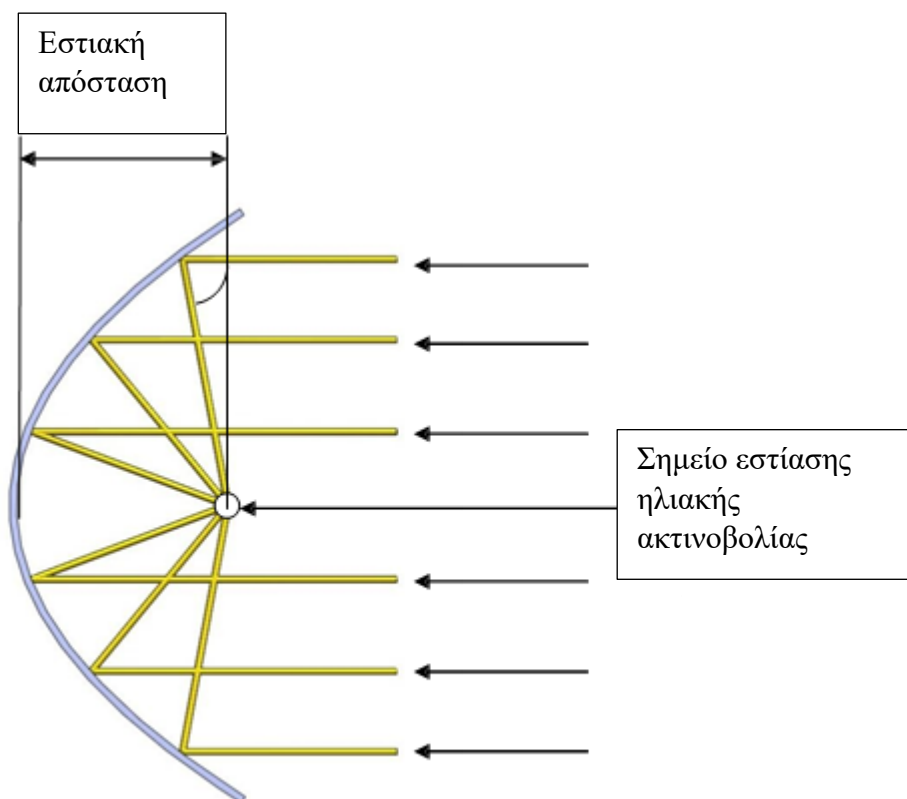
### 1.6.2.ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΑ ΣΩΛΗΝΟΕΙΔΗ ΚΑΤΟΠΤΡΑ

Τα τελευταία χρόνια τα παραβολικά κάτοπτρα εκτός από την παραγωγή ενέργειας σε ηλιοθερμικά πάρκα έχουν αρχίσει να χρησιμοποιούνται και στον οικιακό τομέα για την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης. Η πρώτη πρακτική εφαρμογή των παραβολικών κατόπτρων τοποθετείται γύρω στο 1870, όταν ο John Ericsson σχεδίασε και κατασκεύασε ένα σύστημα συνολικής επιφάνειας  $3,25\text{m}^2$  η οποία συνεργαζόταν με μία μηχανή ισχύος 373Watt χρησιμοποιώντας τον αέρα ως εργαζόμενο μέσο.[3]

Τοποθετώντας στο σημείο εστίασης έναν συλλέκτη κενού με εργαζόμενο μέσο το νερό μπορούμε να επιτύχουμε αύξηση της θερμοκρασίας. Η θερμοκρασία αυτή μπορεί να ρυθμιστεί ανάλογα με το την εστιακή απόσταση (Focal Length), πετυχαίνοντας έτσι αποτελέσματα για διάφορες χρήσεις. Για παράδειγμα, θέρμανση νερού για οικιακές ανάγκες (40-60°C) ή θέρμανση ψύξη κτηρίων όπου απαιτούνται θερμοκρασίες νερού της τάξης των 60-85°C[4].



Εικόνα 1.23: Συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας στο παραβολικό κάτοπτρο.

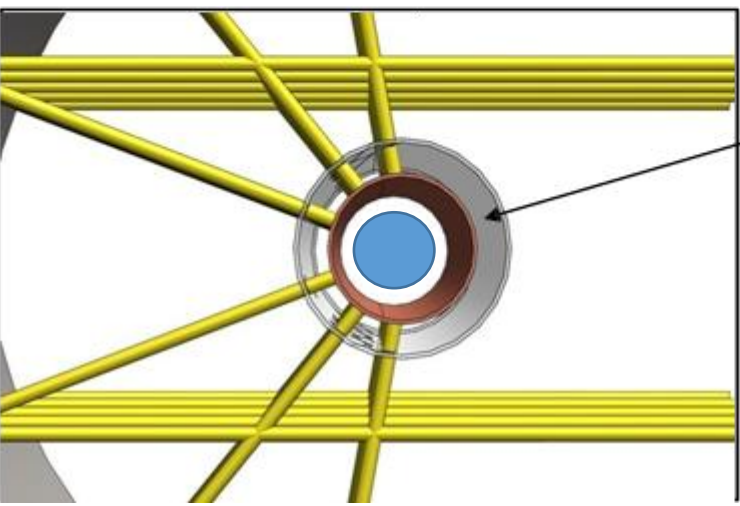
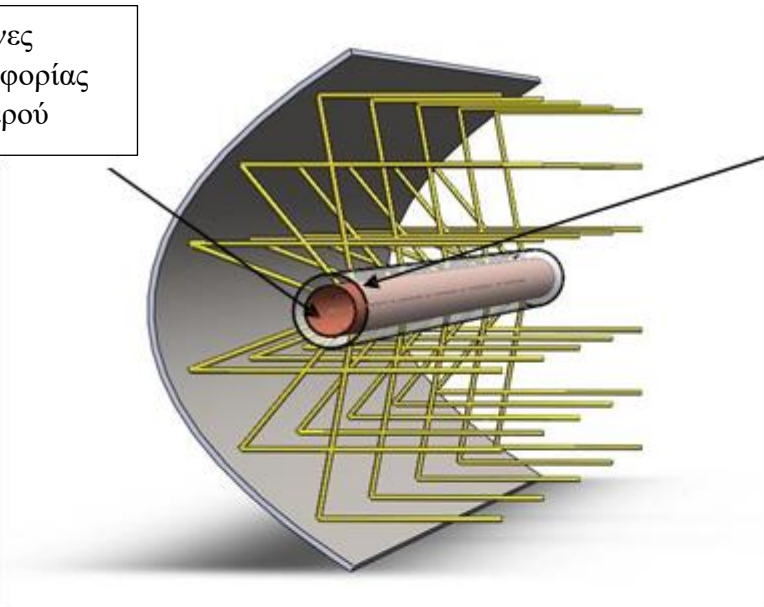


Εικόνα 1.24: Συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας στο σημείο εστίασης του κατόπτρου



Σωλήνες  
κυκλοφορίας  
του νερού

Σωλήνας  
γαλιού



Συνθήκες κενού  
μεταξύ του γυάλινου  
σωλήνα και των  
σωλήνων του  
ρευστού

Εικόνα 1.25/26 :Ο συλλέκτης κενού θα τοποθετηθεί στο σημείο εστίασης του κατόπτρου.

## 1.7 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενός παραβολικού κατόπτρου το οποίο θα συνεργάζεται με τον συλλέκτη κενού τα τεχνικά χαρακτηριστικά του οποίου παρουσιάστηκαν αναλυτικά στην παράγραφο 1.6. Η τομή της διάταξης παρουσιάζεται στην εικόνα 1.26. Ουσιαστικά δηλαδή είχαμε τον συλλέκτη κενού αποτελούμενο από 1 γυάλινο σωλήνα, έναν απορροφητή με πτερύγια εσωτερικά σε όλο το μήκος, και 2 σωλήνες για την θέρμανση του ρευστού και μέσω των νόμων τη μετάδοσης θερμότητας μελετήθηκαν και προσδιορίστηκαν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της παραβολής η οποία θα επιτυγχάνει τις συνθήκες εξόδου που ορίσαμε. Η σκέψη ήταν πως από τη στιγμή που χρησιμοποιείται η τεχνολογία κενού θα έπρεπε να επιτύχουμε την μέγιστη απόδοση του συστήματος. Για τον σκοπό αυτό η μελέτη ουσιαστικά έγινε για νερό εξόδου θερμοκρασίας 80°C το οποίο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί, με την χρήση κατάλληλου δοχείου αδρανείας και για την ψύξη-θέρμανση μιας οικίας. Η τεχνολογία της ηλιακής θέρμανσης και ψύξης παρουσιάζονται στο Παράρτημα Ι.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

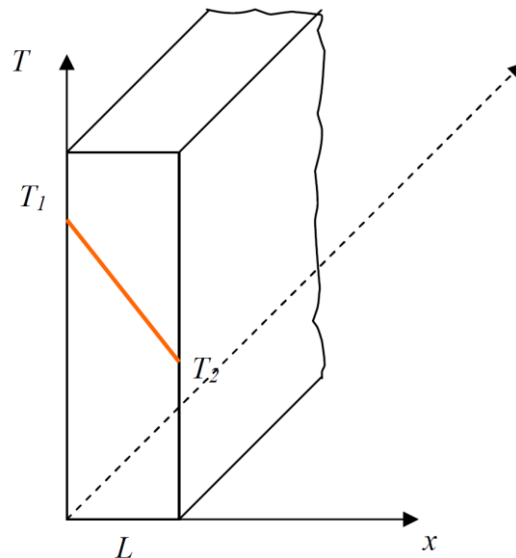
## 2.1 ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

### 2.1.1 ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΑΓΩΓΗ

Η μεταφορά θερμότητας με αγωγή οφείλεται κυρίως στη μεταφορά ενέργειας μεταξύ των ατόμων ή των μορίων ενός σώματος ανάλογα με την κατάσταση στην οποία βρίσκεται. Στα μέταλλα η θερμική ενέργεια μεταφέρεται μεταξύ των μικρών σωματιδίων με διάχυση των ηλεκτρονίων ενώ στα αέρια σχεδόν αποκλειστικά με διάχυση των μορίων τους. Στα υγρά παρατηρείται ο ίδιος μηχανισμός όμως οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μορίων είναι εντονότερες και συχνότερες απ' ό,τι στα αέρια. Η μετάδοση θερμότητας μακροσκοπικά ( σε μία διάσταση ) περιγράφεται από τον Νόμο του Fourier[5].

Αν θεωρήσουμε ένα στερεό σώμα σταθερού πάχους  $L$  με θερμοκρασίες στα άκρα του  $T_1$  και  $T_2$  όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα τότε ο ρυθμός μετάδοσης θερμότητας κατά την  $x$ -διεύθυνση ανά μονάδα επιφανείας δίνεται από τη σχέση:

$$q_x = -k * \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$



Εικόνα 2.1: Μονοδιάστατη μετάδοση θερμότητας με αγωγή

Όπου

$q_x$  : πυκνότητα ροής θερμότητας (heat flux)  $W/m^2$

$k$  : συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας ( $W/mK$ )

### 2.1.2 ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΣΥΝΑΓΩΓΗ

Η συναγωγή θερμότητας αναφέρεται στη μετάδοση θερμότητας σε κινούμενα ρευστά. Στην περίπτωση αυτή συνυπάρχουν δύο μηχανισμοί μετάδοσης ενέργειας. Ο πρώτος είναι της διάχυσης μέσω των σωματιδιακών αλληλεπιδράσεων (όπως και στην περίπτωση της αγωγής), ενώ ο δεύτερος σχετίζεται με τη μακροσκοπική κίνηση του ρευστού. Κατά τη μακροσκοπική κίνηση του ρευστού τα στοιχειώδη σωματίδια που απαρτίζουν και τα στοιχεία του ρευστού, μεταφέρουν μαζί με τη μάζα τους και την θερμική ενέργεια, που σχετίζεται με την τυχαία μεταφορική κίνηση τους, την εσωτερική περιστροφή τους και την ταλάντωσή τους[6]. Η κύρια περιοχή εφαρμογή της μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή είναι η μετάδοση από στερεή επιφάνεια προς κινούμενο ρευστό σε επαφή με την επιφάνεια ή το αντίθετο.

Ο υπολογισμός της πυκνότητας παροχής θερμότητας γίνεται μέσω της σχέσης του Newton σύμφωνα με την οποία:

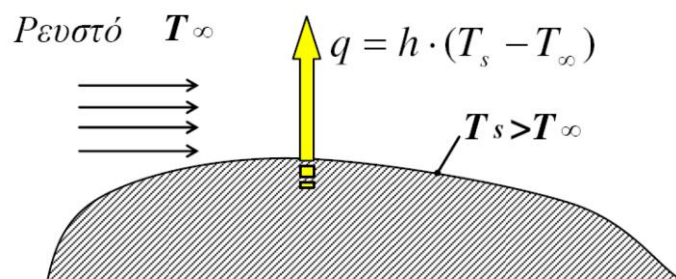
$$q = h \cdot (T_s - T_\infty) \quad (2.2)$$

Όπου :

$h$ : ειδική συναγωγιμότητα ( $W/m^2K$ )

$T_s$  : θερμοκρασία επιφάνειας στερεού

$T_\infty$ : θερμοκρασία του ρευστού



Εικόνα 2.2: Μετάδοση θερμότητας με συναγωγή

### 2.1.3 ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

Στη θερμική ακτινοβολία η θερμότητα μεταφέρεται μεταξύ των σωμάτων με τη βοήθεια των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Τα στερεά σώματα, τα περισσότερα υγρά και αρκετά αέρια ακτινοβολούν θερμότητα συγχρόνως όμως απορροφούν και μέρος της ακτινοβολίας την οποία εκπέμπουν άλλα σώματα. Στη μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία εμφανίζεται διπλή μετατροπή ενέργειας και ενώ στην αγωγή και στην συναγωγή απαιτείται η ύπαρξη κάποιου υλικού ή μέσου για τη μεταφορά θερμότητας στην ακτινοβολία δε συμβαίνει αυτό[5]. Η ακτινοβολία εμφανίζεται στο κενό και μάλιστα σε εντονότερο βαθμό. Η μέγιστη πυκνότητα παροχής θερμότητας η οποία ακτινοβολείται από το μέλαν σώμα υπολογίζεται με τη σχέση Stefan-Boltzman:

$$q = \sigma * T_s^4 \quad (2.3)$$

Όπου

$\sigma$ : σταθερά ακτινοβολίας του μέλανος σώματος  $5,6697*10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

$T_s$ : Η θερμοκρασία του σώματος (K)

Για μια πραγματική επιφάνεια ( μη μέλαν σώμα ) υπολογίζεται από την:

$$q = \varepsilon * \sigma * T_s^4 \quad (2.4)$$

Όπου το  $\varepsilon$  είναι ο συντελεστής εκπομπής του πραγματικού σώματος και οι τιμές του κυμαίνονται από 0-1 όπου το 1 αντιστοιχεί στο μέλαν σώμα.

### 2.1.4 ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΑΓΩΓΟ ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

Έστω ότι έχουμε τον αγωγό που φαίνεται στο σχήμα 2.3. Ο αγωγός αυτός εκτίθεται σε ένα σταθερό ομοιόμορφο ρεύμα θερμότητας  $Q$ . Μέσα στον αγωγό υπάρχει νερό το οποίο θερμαίνεται από τη θερμοκρασία  $T_{in}$  στη θερμοκρασία  $T_{out}$ . Αν αγνοήσουμε τις απώλειες των τοιχωμάτων και υποθέσουμε ότι βρίσκεται σε ένα μονωμένο περιβάλλον θεωρώντας τη ροή ασυμπίεστη (δηλαδή χωρίς ουσιαστική μεταβολή της πίεσης), η θερμότητα μεταφέρεται με αγωγή στην επιφάνεια του τοιχώματος το οποίο θερμαίνεται. Από την κάτω επιφάνεια του τοιχώματος μέσω της συναγωγής η θερμότητα μεταφέρεται στο ρευστό επιτυγχάνοντας έτσι την θερμοκρασιακή του ανύψωση. Αν ονομάσουμε  $Q(w)$  το ποσό της ομοιόμορφης θερμότητας που δέχεται ο αγωγός τότε με βάση τη αρχή διατήρησης της ενέργειας (Α.Δ.Ε) θα ισχύει ότι[7] :

$$Q = \dot{m} * c_p * \Delta T = \dot{m} * c_p * (T_{out} - T_{in}) \quad (2.5)$$

Όπου:

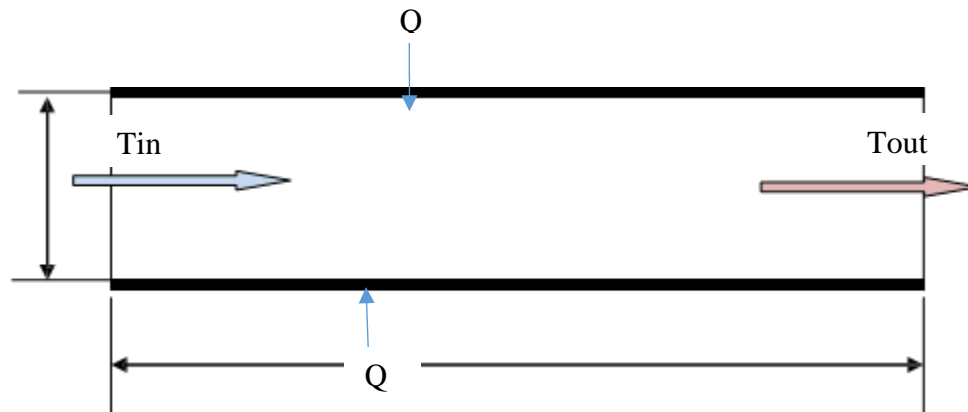
$\dot{m}$  : η παροχή μάζας σε Kg/s

$C_p$  : η ειδική θερμοχωρητικότητα του νερού (J/KgK)

$T_{in}$  : θερμοκρασία εισόδου του νερού

$T_{out}$  : θερμοκρασία εξόδου του νερού.

Δηλαδή ουσιαστικά όλη η προδιδόμενη θερμότητα, απορροφάται από το ρευστό προκαλώντας την θερμοκρασιακή του ανύψωση.



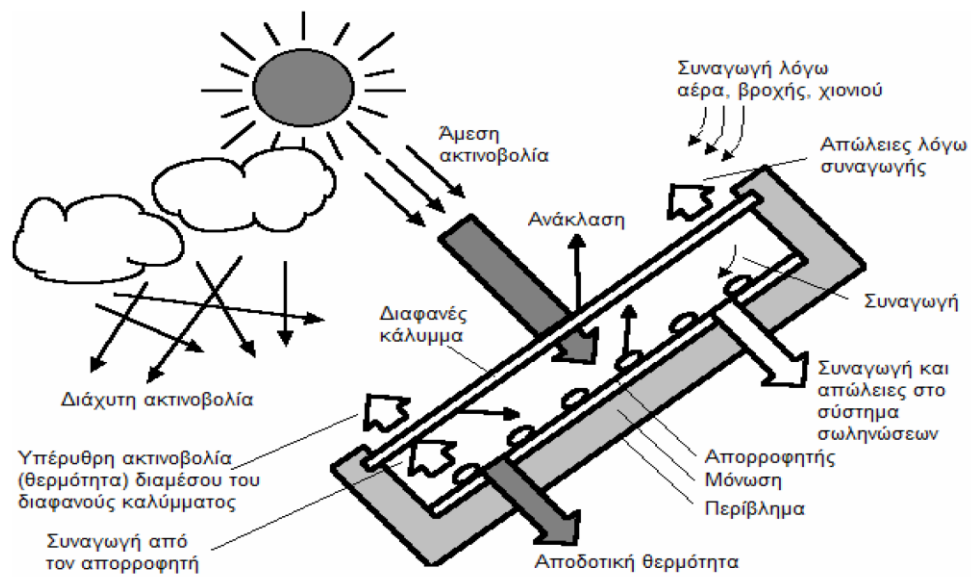
Εικόνα 2.3: Σταθερή ροή θερμότητας σε αγωγό κυκλικής διατομής.

## 2.2 ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΣΕ ΕΠΙΠΕΔΟ ΣΥΛΛΕΚΤΗ

Οι συνηθισμένοι θερμοκοί ηλιακοί συλλέκτες αποτελούνται από ένα ή δύο διαφανή καλύμματα που επιτρέπουν την είσοδο της ηλιακής ακτινοβολίας στο σύστημα χωρίς να επιτρέπουν την έξοδο της θερμικής ακτινοβολίας, από ένα στρώμα αέρα και από μια μαύρη επιφάνεια που απορροφά την ακτινοβολία που πέφτει πάνω της και θερμαίνεται. Κάτω από τη μαύρη επιφάνεια μέσα σε κατάλληλους σωλήνες κυκλοφορεί ρευστό, συνήθως νερό, που θερμαίνεται. Τέλος, πίσω από τους σωλήνες καθώς και στο πλάι τοποθετείται μόνωση με σκοπό τη μείωση των θερμικών απωλειών.

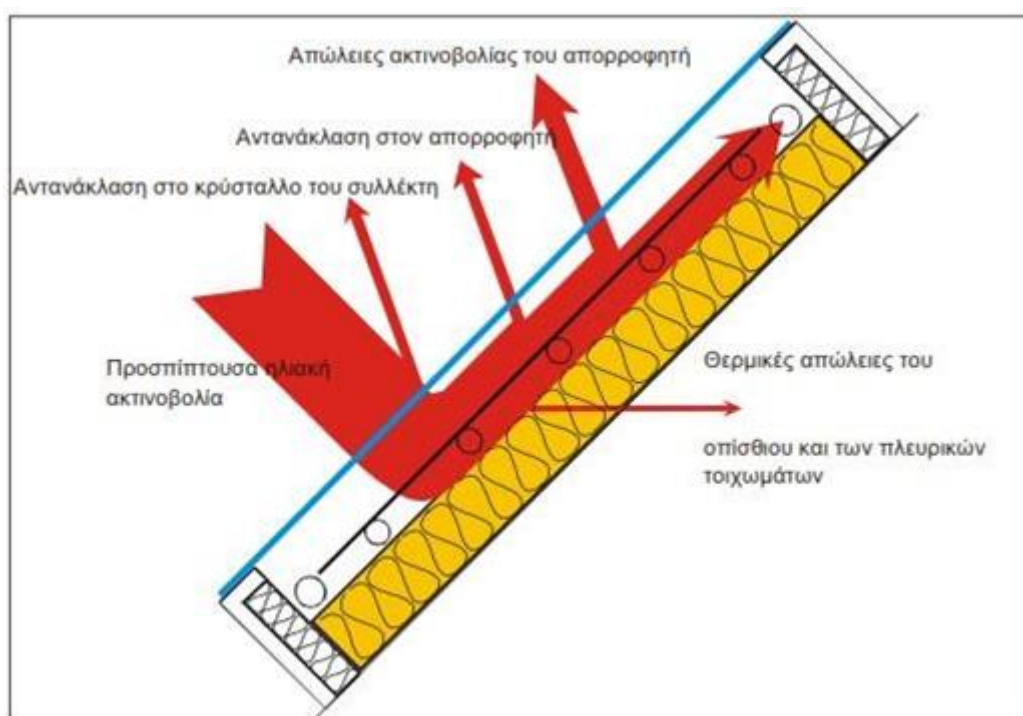
Υπάρχει ένα ποσοστό της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας πάνω στην απορροφητική επιφάνεια που δεν απορροφάται από τον απορροφητή αλλά επιστρέφει λόγω ανακλάσεων. Οι απώλειες αυτές προέρχονται από την ανάκλαση στον απορροφητή, την ανάκλαση στο γυάλινο κάλυμμα, απώλειες με ακτινοβολία από τον απορροφητή καθώς και θερμικές απώλειες λόγω συναγωγής από την πίσω επιφάνεια και από τα πλευρικά τοιχώματα. Τέλος ένα μικρότερο ποσοστό απωλειών προκύπτει μέσω

συναγωγής μεταξύ των παράλληλων επιφανειών του καλύμματος και της πλάκας απορρόφησης. Γι' αυτό το λόγο ο βέλτιστος σχεδιασμός τους γίνεται με τη μέγιστη προσπάθεια μείωσης των θερμικών απωλειών. Δηλαδή θα μπορούσαμε να πούμε ότι οι απώλειες χωρίζονται σε 3 κατηγορίες. Τις απώλειες κορυφής, τις απώλειες πυθμένα και τις πλευρικές απώλειες. Οι θερμικές απώλειες κορυφής είναι οι απώλειες δια συναγωγής και ακτινοβολίας από τον απορροφητήρα προς το κάλυμμα. Οι απώλειες πυθμένα που οφείλονται στη ροή θερμότητας στη μόνωση και οι πλευρικές απώλειες που οφείλονται στη μονοδιάστατη αγωγή στη μόνωση[8].



Εικόνα 2.4: Απώλειες επίπεδου συλλέκτη.

Η απόδοση των ηλιακών συλλεκτών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το συντελεστή απορρόφησης και τον συντελεστή εκπομπής της επιφάνειας, στην οποία η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία μετατρέπεται σε θερμότητα. Οι κοινές μαύρες απορροφητικές επιφάνειες έχουν μεν μεγάλο συντελεστή απορρόφησης αλλά και μεγάλο συντελεστή εκπομπής και συνεπώς μεγάλο ποσοστό θερμικών απωλειών λόγω ακτινοβολίας. Οι επιλεκτικές επιφάνειες, είναι επιφάνειες κυρίως μαύρες, με υψηλό συντελεστή απορρόφησης και χαμηλό συντελεστή εκπομπής, προκαλώντας έτσι μικρό ποσοστό απωλειών ακτινοβολίας.



Εικόνα 2.5: Διάγραμμα ροής θερμότητας σε επίπεδο ηλιακό συλλέκτη.

### 2.3 ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕ ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΑ ΚΑΤΟΠΤΡΑ

Ο προσδιορισμός της θερμικής συμπεριφοράς των συγκεντρωτικών συλλεκτών ακολουθεί τις ίδιες γενικές αρχές με αυτές των επίπεδων συλλεκτών. Οι θερμικές απώλειες του συλλέκτη εκτιμώνται συνήθως με την χρήση ενός συντελεστή απωλειών  $U_L$  ανοιγμένο στην επιφάνεια του συλλέκτη. Η θερμοκρασιακή διαφορά κατά μήκος του συλλέκτη μπορεί να υπολογιστεί με τη χρήση του παράγοντα ροής  $F_R$  ο οποίος



επιτρέπει την χρήση των θερμοκρασιών του ρευστού στις εξισώσεις του ενεργειακού ισοζυγίου[8]. Οι μέθοδοι για τον υπολογισμό των θερμικών απωλειών από τους συλλέκτες δεν μπορούν να γενικευτούν τόσο εύκολα όσο στην περίπτωση των επίπεδων συλλεκτών καθώς υπάρχει μεγάλο εύρος σχημάτων και μορφολογίας, ενώ θερμοκρασιακή διακύμανση μπορεί να είναι αποτέλεσμα μη-ομοιόμορφης ροής ακτινοβολίας στο συλλέκτη. Μια βασική διαφορά που μεταξύ των συγκεντρωτικών και των επίπεδων συλλεκτών είναι οι αρκετά υψηλότερες θερμοκρασίες που μπορούν να αναπτυχθούν στους συγκεντρωτικούς συλλέκτες. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι απώλειες λόγω ακτινοβολίας να αποτελούν ένα σημαντικό μέρος των απωλειών, προκαλώντας την θερμοκρασιακή εξάρτηση του  $U_L$ . Υποθέτουμε, ότι έχουμε ένα σωλήνα απορροφητή με ένα γραμμικό κάτοπτρο, μια προσέγγιση για τον υπολογισμό των θερμικών απωλειών και του  $U_L$ , θεωρώντας ότι έχουμε απώλειες συναγωγής και ακτινοβολίας από την επιφάνεια και απώλειες αγωγής στις πλευρικές στηρίξεις της διάταξης, είναι[9]:

$$\begin{aligned} \frac{Q_{loss}}{A_r} &= h_w * (T_r - T_a) + \varepsilon * \sigma * (T_r^4 - T_{sky}^4) + U_{cond} * (T_r - T_a) \\ &= (h_w + U_{cond} + h_r) * (T_r - T_a) = U_L * (T_r - T_a) \end{aligned} \quad (2.9)$$

Όπου

$$h_r = \frac{\varepsilon * \sigma * (T_r^4 - T_{sky}^4)}{T_r - T_a} \quad (2.10)$$

Αν τώρα θεωρήσουμε ένα κυλινδρικό σωλήνα μέσα σε έναν κυλινδρικό απορροφητή ο οποίος περιβάλλεται από ένα γυάλινο σωλήνα στον οποίο συγκεντρώνεται η ηλιακή ακτινοβολία από ένα παραβολικό κάτοπτρο, για μήκος συλλέκτη  $L$ , θερμοκρασία γυάλινου σωλήνα στην εξωτερική επιφάνεια  $T_{co}$ , στην εσωτερική επιφάνεια  $T_{ci}$  και θερμοκρασία απορροφητή  $T_r$  τότε οι θερμικές απώλειες δίνονται από τις σχέσεις 2.11.1 και 2.11.2 :

$$Q_{loss} = \frac{2\pi k_{eff} * L}{\ln\left(\frac{D_{ci}}{D_r}\right)} * (T_r - T_{ci}) + \frac{\pi D_r * L * \sigma * (T_r^4 - T_{ci}^4)}{1/\varepsilon_r + \frac{1 - \varepsilon_c}{\varepsilon_c} * \left(\frac{D_r}{D_{ci}}\right)} \quad (2.11.1)$$

$$Q_{loss} = \frac{2\pi k_c * L * (T_{ci} - T_{co})}{\ln\left(\frac{D_{co}}{D_{ci}}\right)} \quad (2.11.2)$$

Όπου :

$D_r$ : η διάμετρος του απορροφητή

$D_{co}$  : η εξωτερική διάμετρος του γυάλινου σωλήνα

$D_{ci}$ : η εσωτερική διάμετρος του γυάλινου σωλήνα

$\epsilon_r$ : ο συντελεστής εκπομπής του απορροφητή

$\epsilon_c$ : ο συντελεστής απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας του απορροφητή

Όπου σε περιπτώσεις που έχουμε την χρήση κενού ο συντελεστής  $k_{eff}$  μπορεί να είναι ακόμα και μηδενικός.

Η σχέση 2.11.1 και εκφράζει τις απώλειες του απορροφητή λόγο ακτινοβολίας και συναγωγής προς το εσωτερικό τοίχωμα του γυάλινου σωλήνα, αλλά εξαιτίας της ύπαρξης του κενού η συναγωγή θεωρείται μηδενική, δηλαδή  $k_{eff}=0$ .

Η απώλειες της ακτινοβολίας του απορροφητή απορροφούνται από το εσωτερικό τοίχωμα του εξωτερικού σωλήνα και μέσω της αγωγής μεταδίδονται στο εξωτερικό τοίχωμα. Η εξίσωση 2.11.2 περιγράφει την αγωγή που συμβαίνει μεταξύ των τοιχωμάτων του γυάλινου σωλήνα. Οπότε θα μπορούσαμε να πούμε ότι οι δύο αυτές σχέσεις είναι ισοδύναμες.

Οι απώλειες αυτές στη συνέχεια μεταδίδονται από τον σωλήνα του γυαλιού προς το εξωτερικό περιβάλλον με συναγωγή και ακτινοβολία σύμφωνα με τη σχέση 2.12

$$Q_{loss} = \pi D_{co} * L * h_w * (T_{co} - T_a) + \epsilon_c * \pi * D_{co} * L * \sigma * (T_{co}^4 - T_{sky}^4) \quad (2.12)$$

Όπου

$h_w$ : ο συντελεστής συναγωγής ( $W/m^2K$ ) ατμοσφαιρικού αέρα γυαλιού

$\epsilon_c$ : ο συντελεστής απορρόφησης του γυάλινου σωλήνα

$T_{sky}$ : η θερμοκρασία του ουράνιου θόλου.

$T_a$ : η θερμοκρασία περιβάλλοντος

$\sigma$ : σταθερά Boltzman  $5.67 \times 10^{-8}$

$L$ : το μήκος του συλλέκτη

Η σχέση 2.12 από τη βιβλιογραφία πολλές φορές χρησιμοποιείται αντικαθιστώντας το  $T_{sky}$  με το  $T_a$  δηλαδή την θερμοκρασία περιβάλλοντος [10]. Οπότε προκύπτει η σχέση 2.13 :

$$Q_{loss} = \pi D_{co} * L * h_w * (T_{co} - T_a) + \epsilon_c * \pi * D_{co} * L * \sigma * (T_{co}^4 - T_a^4) \quad (2.13)$$

Από τη βιβλιογραφία προκύπτουν πάρα πολλά πειραματικά μοντέλα με τα οποία μπορούν να υπολογιστούν οι θερμικές απώλειες στους συγκεντρωτικούς συλλέκτες. Σε άλλο πειραματικό μοντέλο [11] η συνολική θερμική απώλεια ενός PTC (Parabolic Trough Concentrator) οφείλεται στην απώλεια θερμότητας ακτινοβολίας από τον σωλήνα απορρόφησης στο περιβάλλον  $Q_{abs-amb}$  στις θερμοαγωγικές απώλειες θερμότητας από τον σωλήνα απορρόφησης στον εξωτερικό γυάλινο σωλήνα  $Q_{abs-glass}$ .

Αν και αυτές οι απώλειες θερμότητας διέπονται από τους γνωστούς μηχανισμούς της μεταφοράς θερμότητας για αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία, είναι μια καλή πρακτική να υπολογίζονται όλες μαζί χρησιμοποιώντας τον ενιαίο συντελεστή θερμικής απώλειας  $U_{Labs}$  σύμφωνα με την:

$$Q_{collector-amb} = U_L * \pi * D_o * l * (T_{abs} - T_{amb}) \quad (2.14)$$

Όπου

$T_{abs}$ : μέση θερμοκρασία του σωλήνα απορρόφησης

$T_{amb}$ : η θερμοκρασία του περιβάλλοντος

$D_o$ : η εξωτερική διάμετρος του σωλήνα απορρόφησης

Στην παραπάνω εξίσωση ο συντελεστής θερμικής απώλειας δίνεται ανά τετραγωνικό μέτρο επιφάνειας του σωλήνα απορρόφησης. Ο συντελεστής θερμικής απώλειας εξαρτάται από την θερμοκρασία του σωλήνα απορρόφησης και βρίσκεται πειραματικά με την εκτέλεση συγκεκριμένων δοκιμών κατά τη λειτουργία του PTC. Η μεταβολή του συντελεστή θερμικών απωλειών σχετίζεται με τη θερμοκρασία του σωλήνα δέκτη της ηλιακής ακτινοβολίας με μία εξίσωση δευτέρου βαθμού, η οποία δίνεται στη συνέχεια, οι συντελεστές της οποίας προσδιορίζονται πειραματικά:

$$U_{Labs} = a + b(T_{abs} - T_{amb}) + c(T_{abs} - T_{amb})^2 \quad (2.15)$$

Τιμές ανάλογα με το εύρος των θερμοκρασιών δίνονται στον πίνακα που ακολουθεί:

$T_{abs}/(^{\circ}C)$	a	b	c
<200	0.687257	0.001941	0.000026
>200; <300	1.433242	-0.00566	0.000046
>300	2.895474	-0.0164	0.000065

**Πίνακας 2.1:** Τυπικές τιμές συντελεστών πολυωνόμου για τον υπολογισμό του  $U_L$

Μια τυπική τιμή του  $U_{Labs}$  για σωλήνες απορρόφησης με κενό είναι μικρότερη από  $5W/m^2k$ .

Τέλος από πειραματικές μετρήσεις που έγιναν σε PTC (Parabolic Trough Collectors) [13], προέκυψε ότι οι απώλειες προσδιορίζονται στο 5,3% της συνολικής ωφέλιμης

ισχύος, ενώ από την ίδια μελέτη με την χρήση υπολογιστικών μοντέλων προκύπτει ότι το ποσοστό ανέρχεται στο 7,7%.

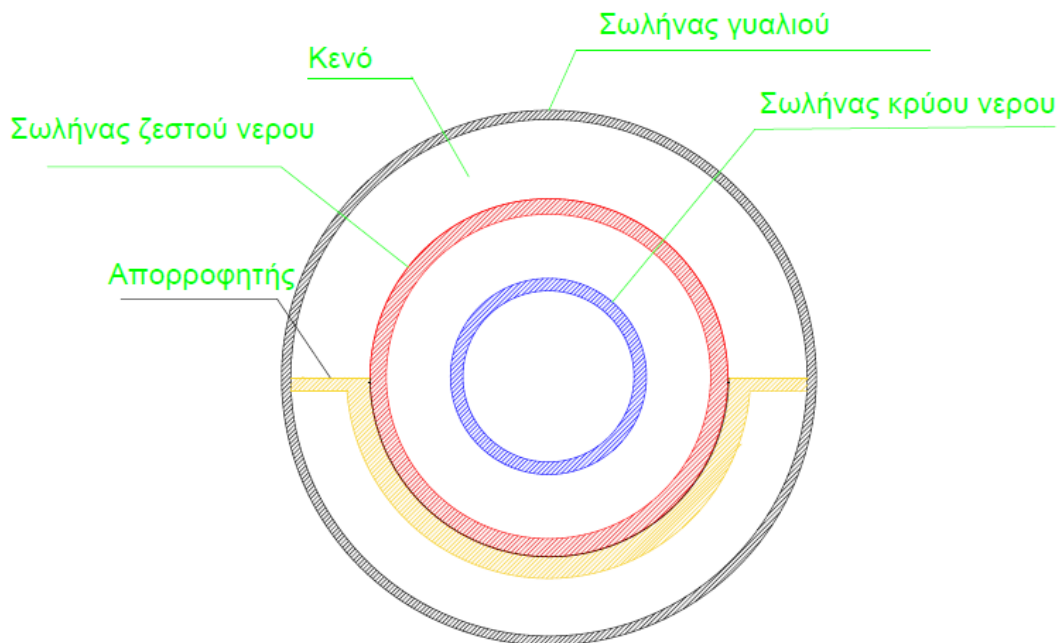
	Vacuum tube(w/m)	Lost vacuum tube(W/m)	Broken glass tube( W/m)
Loss(experimental)	153.11	223.64	522.17
Loss(numerical)	219.36	288.86	626.23
Reflected energy into absorber tube	2842	2720	2675
Loss percentage (experimental)	5.3	8.2	19.5
Loss percentage (numerical)	7.7	10.5	23.4
Collectors performance(numerical)	61%	58.5%	46%

**Πίνακας 2.2:** Προσδιορισμός απωλειών συστήματος με πειραματικές μετρήσεις [14].

## **2.4 ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΤΟΝ ΣΥΛΛΕΚΤΗ ΚΕΝΟΥ ΜΕ ΔΥΟ ΣΩΛΗΝΕΣ ΑΝΤΙΡΡΟΗΣ**

### **2.4.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ**

Όπως περιεγράφηκε και σε προηγούμενη παράγραφο, ο συλλέκτης που θα μελετηθεί αποτελείται από έναν εξωτερικό γυάλινο σωλήνα, εσωτερικά του οποίου βρίσκονται δύο ομόκεντροι χάλκινοι σωλήνες αντιρροής για την κυκλοφορία του νερού, εσωτερικά ενός απορροφητή με πτερύγια. Μεταξύ του εξωτερικού γυάλινου σωλήνα και του απορροφητή αναπτύσσονται συνθήκες κενού. Η τομή του συλλέκτη δίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Εικόνα 2.6: Τομή συλλέκτη κενού.

Καθώς η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει στο συλλέκτη το εξωτερικό τοίχωμα του γυάλινου σωλήνα θερμαίνεται. Η θερμότητα αυτή με αγωγή μεταδίδεται προς το εσωτερικό τοίχωμα του γυαλιού. Στη συνέχεια το ποσό της θερμότητας με αγωγή προσπίπτει στον εσωτερικό σωλήνα του νερού, δηλαδή το σωλήνα που κυκλοφορεί το ζεστό νερό. Στο κενό θεωρούμε πως η μετάδοση θερμότητας γίνεται με αγωγή καθώς το θεωρούμε ως τέλεια μόνωση. Στη συνέχεια μέσω της αγωγής ένα ποσό θερμότητας θερμαίνει τα τοίχωμα του κάθε σωλήνα και έπειτα με συναγωγή ανεβάζει τη θερμοκρασία του ρευστού που κυκλοφορεί μέσα σε αυτό. Η χρήση του απορροφητή με πτερύγια εξασφαλίζει την ομοιόμορφη κατανομή θερμότητας στο σύστημα. Δηλαδή θεωρούμε ότι ίσα ποσά θερμότητας μεταφέρονται από την πάνω όσο και από την κάτω πλευρά του συλλέκτη. Η ροή θερμότητας δίνεται στο σχήμα που ακολουθεί όπου:

$Q_s$ : η ροή θερμότητας λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει πάνω στον γυάλινο σωλήνα.

$Q_{conv,o}$ : ροή θερμότητας λόγω συναγωγής από την εξωτερική επιφάνεια στον ατμοσφαιρικό αέρα, η ροή αυτή θεωρείται απώλεια.

$Q_{rad,o-sun}$ : Καθαρός ρυθμός εναλλαγής θερμότητας λόγω ακτινοβολίας μεταξύ της εξωτερικής επιφάνειας του εξωτερικού γυάλινου σωλήνα και του περιβάλλοντος συμπεριλαμβανομένης της συμβολής που οφείλεται στην ανάκλαση του κατόπτρου.

$Q_{s,t}$  :ροή θερμότητας που μεταφέρεται μέσω του εξωτερικού γυάλινου σωλήνα και προσπίπτει στον εσωτερικό σωλήνα 2 (τον εξωτερικό της κυκλοφορίας του νερού)

$Q_{rad,i-o}$ : Καθαρός ρυθμός εναλλαγής θερμότητας λόγω ακτινοβολίας μεταξύ της επιφάνειας του απορροφητή και της εσωτερικής επιφάνειας του γυάλινου σωλήνα.

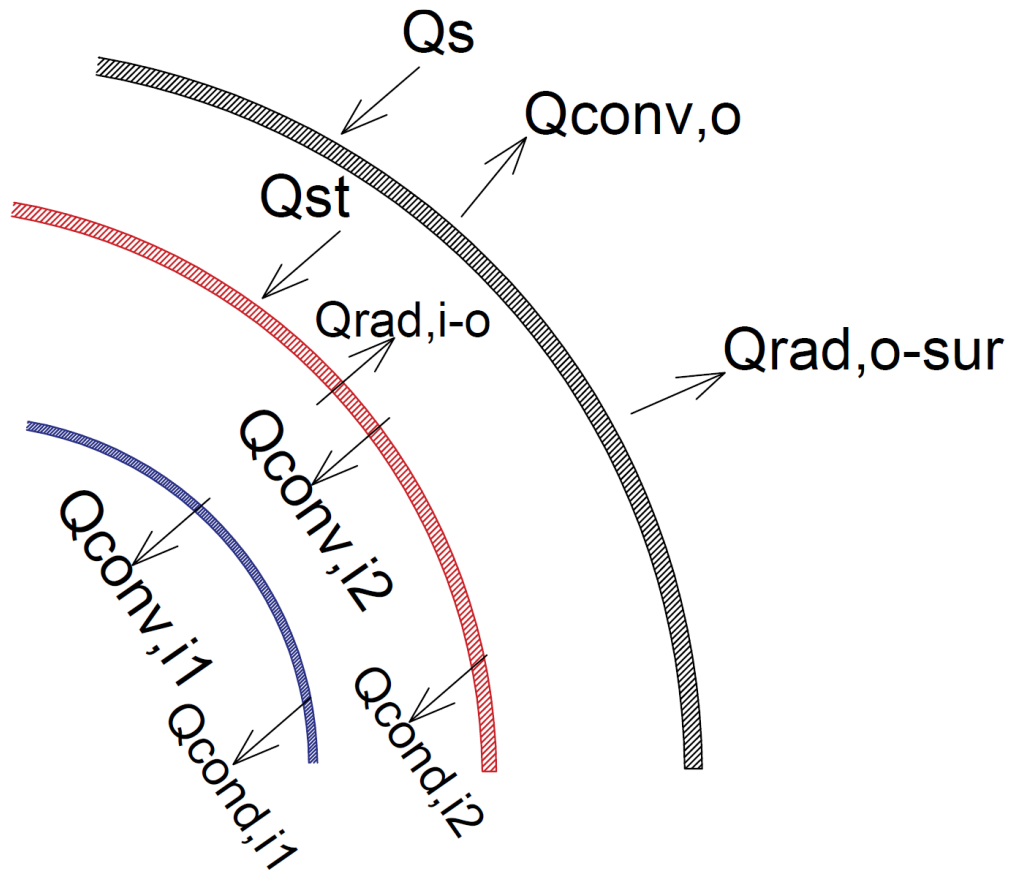
$Q_{conv,i2}$ : μεταφορά θερμότητας λόγω συναγωγής στο ρευστό του σωλήνα 2

$Q_{conv,i1}$ : μεταφορά θερμότητας λόγω συναγωγής στο ρευστό του σωλήνα 1

$Q_{cond,i2}$ : μεταφορά θερμότητας λόγω αγωγής διαμέσου των τοιχωμάτων του σωλήνα 2

$Q_{cond,i1}$ : μεταφορά θερμότητας λόγω αγωγής διαμέσου των τοιχωμάτων του σωλήνα 1

Η μεταφορά θερμότητας λόγω αγωγής, θεωρείται αμελητέα όταν οι αγωγοί είναι λεπτότοιχοι διότι η πτώση θερμοκρασίας είναι αμελητέα[5].



Εικόνα 2.7 : Ροή θερμότητας στο υπό μελέτη σύστημα.

Επίσης για το σύνολο των απωλειών  $Q_{conv,o}$  και  $Q_{rad,o-sun}$ , έγινε η υπόθεση ότι αντιστοιχούν στο 7.5% [13] της συνολικής προσπίπτουσας ακτινοβολίας στο συλλέκτη, ενώ αμελήθηκαν επίσης και οι απώλειες στις ενώσεις του συλλέκτη καθώς

θεωρήθηκε η ύπαρξη κατάλληλης μόνωσης η οποία μειώνει δραστικά την αγωγή μεταξύ των επιφανειών που βρίσκονται σε επαφή. Οπότε η ωφέλιμη θερμότητα η οποία απορροφάται και προκαλεί την θερμοκρασιακή ανύψωση του νερού από τους 10°C στους 80°C είναι η  $Q_{st}$ , και με βάση τα όσα αναφέρθηκαν ισχύει ότι[11]:

$$Q_s = Q_{st} + 0.075Q_s \Leftrightarrow Q_{st} = 0.925Q_s \quad (2.16)$$

#### 2.4.2 ΤΟ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ

Προκειμένου να μπορέσουμε να μελετήσουμε τη μεταφορά θερμότητας στη σύνθετη διατομή του συλλέκτη εισάγεται η έννοια του ισοδύναμου προβλήματος. Στο ισοδύναμο λοιπόν σύστημα του συλλέκτη θεωρούμε πως αντί για δύο ομόκεντρους σωλήνες ίδιου μήκους, όπως φαίνεται στην κάτοψη, έχουμε δύο διαδοχικούς σωλήνες ίδιου μήκους. Προφανώς για τον δεύτερο σωλήνα, τον εξωτερικό θεωρούμε ότι εντός αυτού βρίσκεται ένας σωλήνας με τα χαρακτηριστικά του εσωτερικού σωλήνα (σωλήνας κρύου νερού) χωρίς όμως να έχουμε ροή εντός αυτού. Έτσι ονομάζουμε  $Q_1$  και  $Q_2$  τη ροή θερμότητας προς καθένα από τα δύο ισοδύναμα μήκη αντίστοιχα. Για τις ροές αυτές με βάση την προηγούμενη παράγραφο θα ισχύει ότι :

$$Q_1 + Q_2 = Q_{st} \quad (2.17)$$

Η χρήση των πτερυγίων του απορροφητή έχει ως στόχο την απορρόφηση της θερμότητας από την ηλιακή ακτινοβολία και την ομοιόμορφη μετάδοσή της στα τοιχώματα του σωλήνα. Με βάση λοιπόν τα όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο 2.1.4 και εξασφαλίζοντας την ομοιομορφία χάρη στον απορροφητή, ισχύει ότι:

$$Q_1 = \dot{m}_1 * c_p * \Delta T_1 = \dot{m}_1 * c_p * (T_{out1} - T_{in1}) \quad (2.18)$$

και αντίστοιχα

$$Q_2 = \dot{m}_2 * c_p * \Delta T_2 = \dot{m}_2 * c_p * (T_{out2} - T_{in2}) \quad (2.19)$$

Από το σχήμα 2.9 εύκολα γίνεται αντιληπτό ότι με την αναγωγή στο ισοδύναμο σύστημα οι θερμοκρασίες  $T_{out1}$  και  $T_{in2}$  ταυτίζονται. Δηλαδή η θερμοκρασία εξόδου από τον εσωτερικό σωλήνα του κρύου νερού ισούται με την θερμοκρασία εισόδου στον σωλήνα του ζεστού νερού. Για τις παροχές μάζας  $\dot{m}_1$  και  $\dot{m}_2$  ισχύουν αντίστοιχα ότι:

$$\dot{m}_1 = \rho_1 * \dot{Q} \quad (2.20)$$

και

$$\dot{m}_2 = \rho_2 * \dot{Q} \quad (2.21)$$

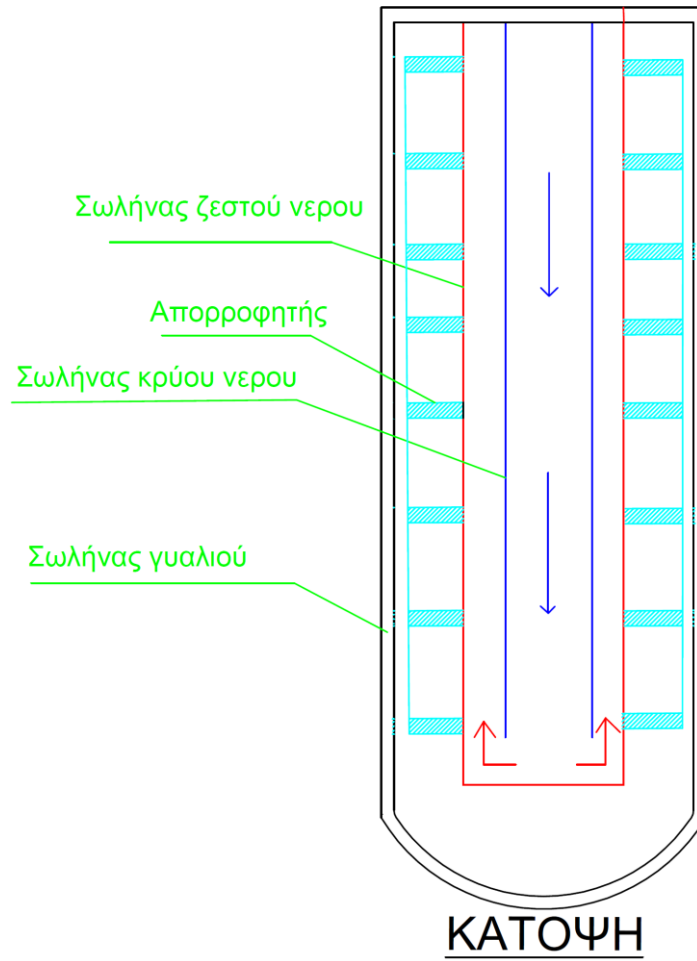
Όπου  $\dot{Q}$  είναι η σταθερή παροχή όγκου σε  $\text{m}^3/\text{sec}$  η οποία ορίζεται από τον κυκλοφορητή του συστήματός μας.

Ενώ υποθέτοντας ότι έχουμε ασυμπίεστη ροή μπορούμε να θεωρήσουμε σταθερό το  $C_p=4187\text{J}/\text{Kg}\cdot\text{K}$ , κάτι τέτοιο όμως δεν μπορεί να θεωρηθεί για την πυκνότητα η οποία παρουσιάζει θερμοκρασιακή εξάρτηση σύμφωνα με τη σχέση:

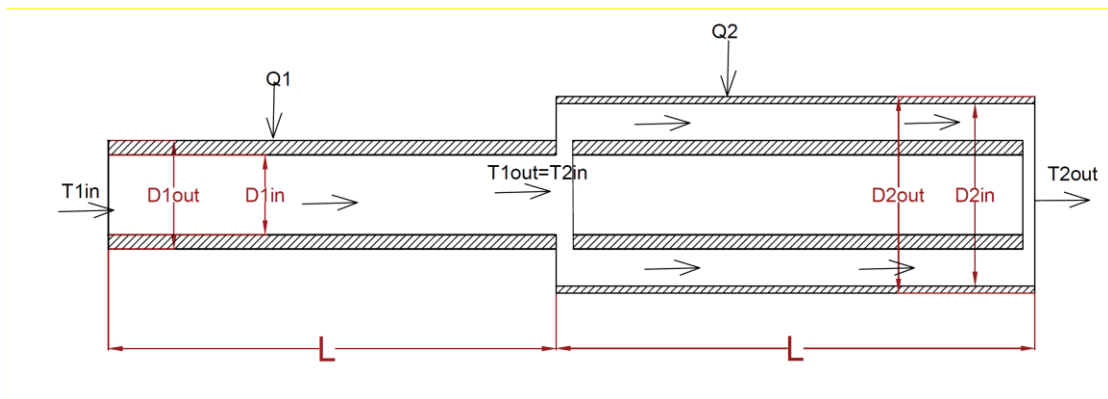
$$\rho = 1000 * \left(1 - \frac{(T + 288.9414)}{(508929.2 * (T + 68.12963))} * (T - 3.9863)^2\right) \quad (2.22)$$

Για την επίλυση του προβλήματος θεωρήθηκε ομοιόμορφη θέρμανση του νερού στους δύο σωλήνες. Δηλαδή ότι σε κάθε σωλήνα η θερμοκρασιακή ανύψωση του νερού είναι  $(80-10)/2$  δηλαδή  $35^\circ\text{C}$ . Οπότε υποθέτοντας ως θερμοκρασία εισόδου του νερού από το δίκτυο τους  $10^\circ\text{C}$  η θερμοκρασία εξόδου από τον εσωτερικό σωλήνα θα είναι  $(10+35)=45^\circ\text{C}=T_{\text{out1}}$  και προφανώς η  $T_{\text{out2}}$  που είναι και η θερμοκρασία στόχου που θέλουμε να θερμάνουμε το νερό ορίζεται στους  $80^\circ\text{C}$ .





Εικόνα 2.8: Κάτοψη συλλέκτη



Εικόνα 2.9: Ισοδύναμο σύστημα συλλέκτη.

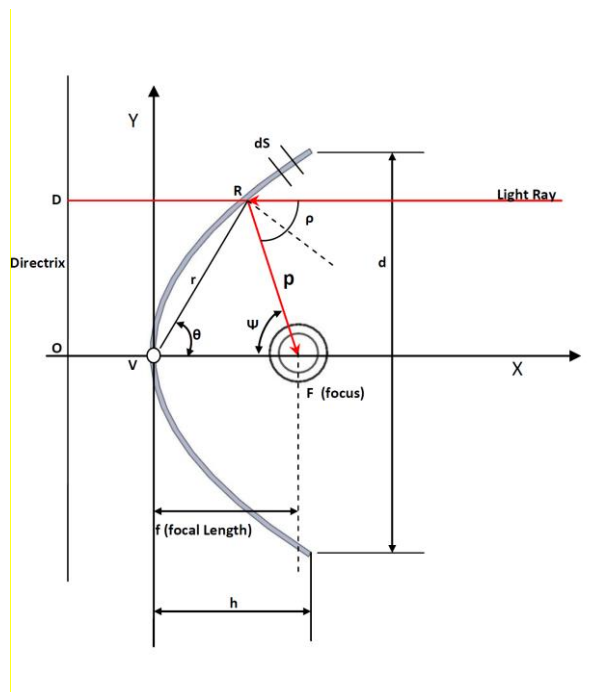
## 2.5 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΠΑΡΑΒΟΛΟΕΙΔΟΥΣ ΚΑΤΟΠΟΤΡΟΥ

Η παραβολή ορίζεται ως ο γεωμετρικός τόπος των σημείων καθένα από τα οποία ισαπέχει από ένα γεωμετρικό τόπο F (την εστία) και μια ευθεία (τη διευθύνουσα). Για το σχήμα 2. RD=RF. Σύμφωνα με την πιο πάνω θεωρία η εξίσωση της παραβολής θα είναι [14]:

$$y^2 = 4 * f * x \quad (2.23)$$

Όπου

f: η απόσταση του σημείου F από την αρχή των αξόνων

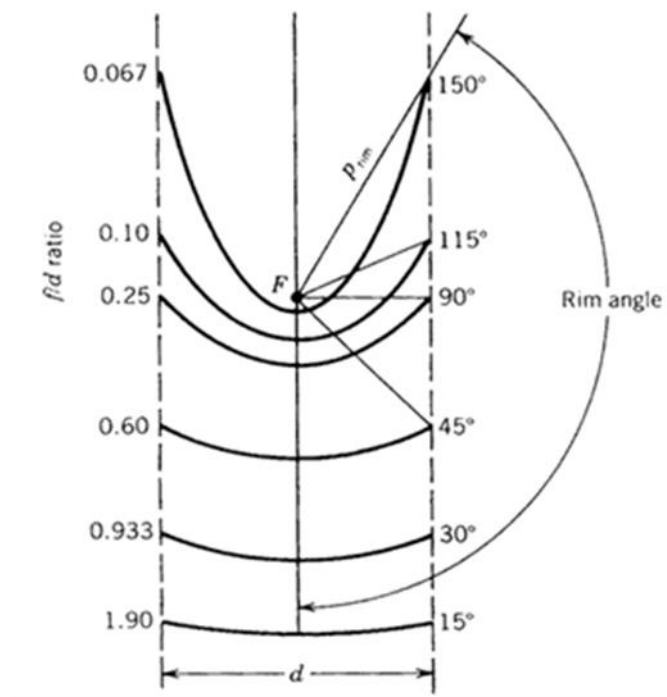


Εικόνα 2.10: Στοιχεία παραβολής

Στις μελέτες που έχουν γίνει για την ανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας σε παραβολοειδές κάτοπτρο είναι προτιμότερο να υπολογίζεται η παραβολή σύμφωνα με τη γωνία Ψ η οποία υπολογίζεται με τις ευθείες VF και RF, η οποία ορίζεται ως η πορεία της ανακλώμενης ακτίνας στο σημείο της εστίασης. Η εξίσωση της ευθείας που προκύπτει είναι η [14]:

$$p = \frac{2 * f}{1 + \cos \psi} \quad (2.24)$$

Στην περίπτωση όπου χρησιμοποιούμε παραβολικά κάτοπτρα για την συγκέντρωση της ακτινοβολίας η έκτασή τους δεν μπορεί να είναι πάρα πολύ μεγάλη, αλλά μέχρι ένα σημείο που ορίζεται από το άνοιγμα της παραβολής  $d$ . Συνεπώς η ευθεία  $p$  σύμφωνα με τη σχέση (2.6) θα ορίζεται για την γωνία  $\Psi_{rim}$ , η οποία είναι η μέγιστη δυνατή γωνία που μπορεί να πάρει η παραβολή. Ορίζοντας τον λόγο  $f/d$  και έχοντας γνωστό το άνοιγμα της παραβολής, προκύπτει τα παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 2.11: Ο λόγος  $f/d$  συναρτήσει του  $\Psi_{rim}$ .

Από το σχήμα παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η γωνία  $\Psi_{rim}$  τόσο αυξάνεται και το ύψος της παραβολής  $h$ . Αυξάνοντας το ύψος διατηρώντας σταθερό το  $f$  όμως αυξάνεται το μήκος τόξου  $s$  και συνεπώς και η επιφάνεια του παραβολοειδούς κατόπτρου. Ο τύπος που συνδέει το  $\Psi_{rim}$ , με το  $f/d$  είναι:

$$\frac{f}{d} = \frac{1}{4 \tan(\Psi_{rim}/2)} \quad (2.25)$$

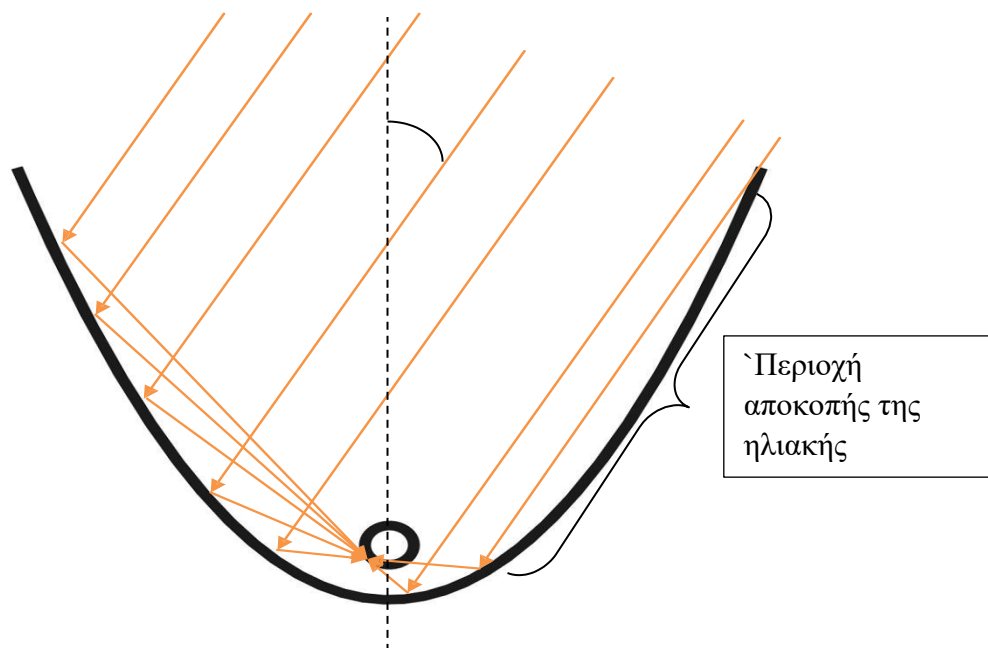
Από τη γεωμετρία προκύπτει ότι η απόσταση  $h$  δίνεται συναρτήσει του ανοίγματος της παραβολής  $d$  και της απόστασης  $f$  από τη σχέση:

$$h = \frac{d^2}{16 * f} \quad (2.26)$$

Ενώ το μήκος τόξου της παραβολής ορίζεται από τη σχέση ( 2.9)

$$s = \left[ \frac{d}{2} * \sqrt{\left(\frac{4h}{d}\right)^2 + 1} \right] + 2 * f * \ln \left| \frac{4h}{d} + \sqrt{\left(\frac{4h}{d}\right)^2 + 1} \right| \quad (2.27)$$

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως η γωνία  $\Psi_{rim}$  καθορίζει το μέγιστο άνοιγμα της παραβολής. Όσο μεγαλύτερο είναι το άνοιγμα τόσο μεγαλύτερο είναι και το ύψος  $h$ , και σύμφωνα με τη σχέση 2.9 τόσο μεγαλύτερο και το μήκος τόξου της παραβολής, με αποτέλεσμα να έχουμε θεωρητικά μεγαλύτερη συγκέντρωση της ακτινοβολίας. Στην πραγματικότητα όμως όταν το  $\Psi_{rim}$  πάρει τιμές μεγαλύτερες από ένα όριο, τότε η προσπίπτουσες ακτίνες του ηλίου ανακόπτονται.



Εικόνα 2.12: Μεγάλο ύψος κατόπτρου μπορεί να δημιουργήσει αποκοπή της ηλιακής ακτινοβολίας.

Προκειμένου να αποφεύγεται το παραπάνω φαινόμενο και βασιζόμενοι στο σχήμα 2.10 η βέλτιστη επιλογή της  $\Psi_{rim}$  για τον σχεδιασμό του κατόπτρου, είναι στο διάστημα ( $90^\circ$  έως  $98^\circ$ ).

## 2.6 ΔΕΙΚΤΕΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΣΕ ΕΝΑΝ ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΟ ΣΥΛΛΕΚΤΗ

### 2.6.1 ΔΕΙΚΤΕΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

Τρεις από τις παραμέτρους που απαιτούνται για τον σχεδιασμό ενός PTC είναι ο γεωμετρικός δείκτης συγκέντρωσης  $C$  [12], [9], η γωνία εισόδου  $\beta$  και η οριακή γωνία συλλέκτη  $\Psi_{lim}$  όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο.

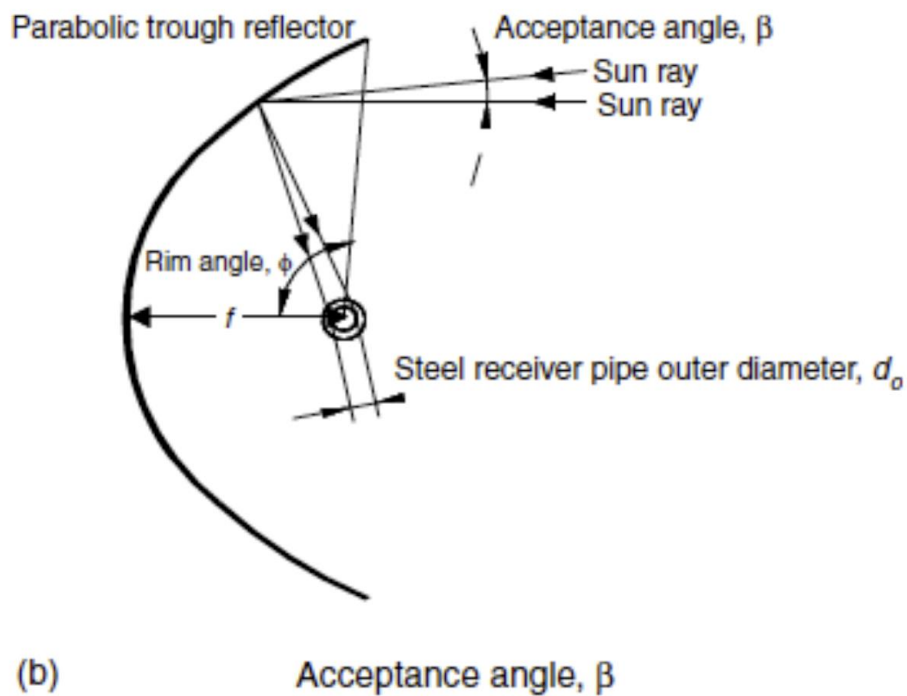
Ο δείκτης συγκέντρωσης ορίζεται ως ο λόγος μεταξύ της επιφάνειας ανοίγματος του συλλέκτη και του συνολικού εμβαδού του σωλήνα απορρόφησης, ενώ η γωνία εισόδου είναι η μέγιστη γωνία που μπορεί να διαμορφωθεί από δύο ακτίνες σε ένα επίπεδο εγκάρσιο στο άνοιγμα του συλλέκτη έτσι ώστε να σταματούν την πορεία τους στο σωλήνα του δέκτη αφού πρώτα ανακλαστούν στο παραβολικό κάτοπτρο.

Ο λόγος συγκέντρωσης δίνεται από τη σχέση:

$$C = \frac{A_a}{A_r} \frac{d * L}{\pi * d_o * L} = \frac{d}{\pi * d_o} \quad (2.28)$$

Όπου το  $d$  είναι το άνοιγμα της παραβολής και  $d_o$  είναι η εξωτερική διάμετρος του σωλήνα δέκτη. Για την περίπτωση μας όπου ο σωλήνας δέκτης περιβάλλεται από έναν απορροφητή αλουμινίου με πτερύγια, στον παρονομαστή της σχέσης 2.28 θα μπει η συνολική επιφάνεια του απορροφητή η οποία από τον κατασκευαστή δίνεται ίση με  $0,175\text{m}^2$ . Συνήθεις τιμές για τον δείκτη συγκέντρωσης των PTC είναι περίπου 20, ενώ η μέγιστη θεωρητική αξία είναι της τάξης των 70. Ο δείκτης συγκέντρωσης ουσιαστικά μπορούμε να πούμε ότι εκφράζει την ενίσχυση της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει τελικά τον συλλέκτη μετά τις ανακλάσεις στο κάτοπτρο, σε σχέση με την ακτινοβολία που θα προσέπιπτε σε μια επιφάνεια χωρίς κάτοπτρο.

Η ελάχιστη πρακτική γωνία εισόδου είναι  $0,53^\circ$ . Αυτό σημαίνει ότι ένα σύστημα με γωνία μικρότερη από  $0,53^\circ$ , πάντα θα έχανε ένα μέρος της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας. Στην πραγματικότητα οι συνιστώμενες εμπορικές γωνίες εισόδου είναι μεταξύ  $1^\circ$  και  $2^\circ$ . Μικρότερες γωνίες εισόδου θα απαιτούσαν περισσότερο ακριβή συστήματα παρακολούθησης της θέσης του ήλιου, ενώ μεγαλύτερες σε μικρότερες του λόγου συγκέντρωσης [12].



Εικόνα 2.13: Γωνία εισόδου (αποδοχής) ενός παραβολικού συλλέκτη.

## 2.6.2 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ

Όταν η άμεση ηλιακή ακτινοβολία φθάνει στην επιφάνεια του κατόπτρου, ένα σημαντικό ποσό χάνεται. Η συνολική απώλεια μπορεί να χωριστεί σε 2 κατηγορίες, οι οποίες είναι :

- Οπτικές απώλειες
- Γεωμετρικές απώλειες

Οι οπτικές απώλειες σχετίζονται με 4 παραμέτρους :

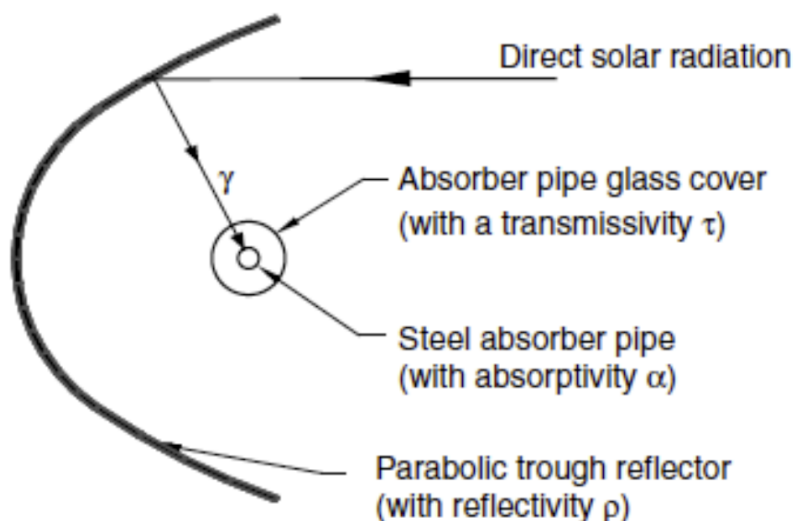
- Ανακλαστικότητα  $\rho$  της επιφάνειας : επειδή η ανακλαστικότητα του παραβολικού κοίλου συγκεντρωτή είναι μικρότερη από 1 μόνο ένα ποσοστό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας ανακλάται προς τον σωλήνα δέκτη. Τυπικές τιμές των καθαρών επαργυρωμένων κατόπτρων από γυαλί είναι περίπου 0.93. Η τιμή αυτή μπορεί να μειωθεί με τη συσσώρευση σκόνης και να φτάσει έως 0,9.
- Παράγοντας ανάσχεσης  $\gamma$ : ένα μέρος της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που αντανακλάται από το κάτοπτρο δεν φτάνει στο γυάλινο κάλυμμα του σωλήνα

απορρόφησης είτε λόγω μικροσκοπικών ατελειών των ανακλαστήρων ή μακροσκοπικών λαθών στο σχήμα των παραβολικών συγκεντρωτών. Τα σφάλματα αυτά προκαλούν ανάκλαση κάποιων ακτινών σε λάθος γωνία και κατά συνέπεια δεν προσπίπτουν στον σωλήνα απορρόφησης. Οι απώλειες αυτές περιγράφονται από τον παράγοντα  $\gamma$ , που είναι συνήθως 0,96 για σωστά συναρμολογημένους συλλέκτες.

- Διαπερατότητα του γυάλινου σωλήνα  $\tau$ : ο μεταλλικός σωλήνας απορρόφησης τοποθετείται μέσα σε έναν εξωτερικό γυάλινο σωλήνα προκειμένου να αυξηθεί το ποσό της ενέργειας που απορροφάται και να μειωθούν οι θερμικές απώλειες Ένα μέρος της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας αντανακλάται από τους καθρέφτες και φθάνοντας το γυάλινο κάλυμμα του σωλήνα απορρόφησης δεν είναι σε θέση να περάσει μέσα από αυτό. Η σχέση μεταξύ της ακτινοβολίας που περνά μέσα από το γυάλινο σωλήνα και της συνολικής προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε αυτό, δίνει την διαπερατότητα του γυάλινου σωλήνα η οποία είναι συνήθως 0.93.
- Απορροφητικότητα του απορροφητή  $\alpha$ : η παράμετρος αυτή προσδιορίζει το ποσό της ενέργειας που απορροφάται από τον απορροφητή σε σχέση με την ακτινοβολία που φθάνει σε αυτόν. Αυτή η παράμετρος είναι συνήθως ίση με 0.92 για επίλεκτο απορροφητή.

Ο πολλαπλασιασμός αυτών των παραμέτρων δίνει τη λεγόμενη μέγιστη οπτική απόδοση του συστήματος όπου :

$$\eta_{opt} = \rho * \gamma * \tau * \alpha \quad (2.29)$$



Εικόνα 2.14: Οπτικοί παράμετροι ενός παραβολικού συστήματος.

### Γεωμετρικές απώλειες :

Η γωνία πρόσπτωσης της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας, γιατί το ποσοστό της άμεσης ακτινοβολίας που είναι χρήσιμη για τον συλλέκτη είναι ευθέως ανάλογη προς το συνημίτονο της γωνίας, η οποία μειώνει την ωφέλιμη επιφάνεια του ανοίγματος. Η γωνία πρόσπτωσης μειώνει την ωφέλιμη επιφάνεια κατά την ποσότητα  $A\epsilon$ , που ονομάζεται παράγοντας γεωμετρικών απωλειών και ισούται με:

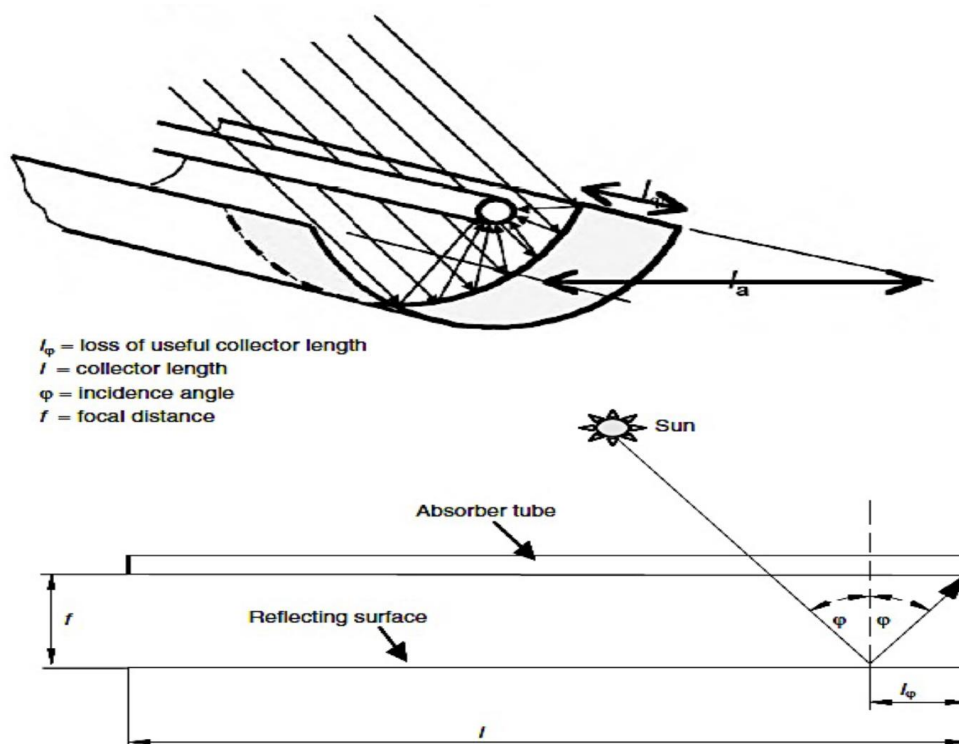
$$A\epsilon = d * L_{\varphi} = d * f_m * \tan \varphi \quad (2.30)$$

Όπου το  $d$ : άνοιγμα της παραβολής

$L_{\varphi}$ : το μήκος του συλλέκτη που μένει ανεκμετάλλευτο λόγω της γωνίας  $\varphi$

$f$ : η εστιακή απόσταση του κατόπτρου

$f_m$ : η μέση εστιακή απόσταση σε ένα εγκάρσιο τμήμα του κατόπτρου.



Εικόνα 2.15: Γεωμετρικές απώλειες συλλέκτη.



## 2.7 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΤΟΠΤΡΩΝ

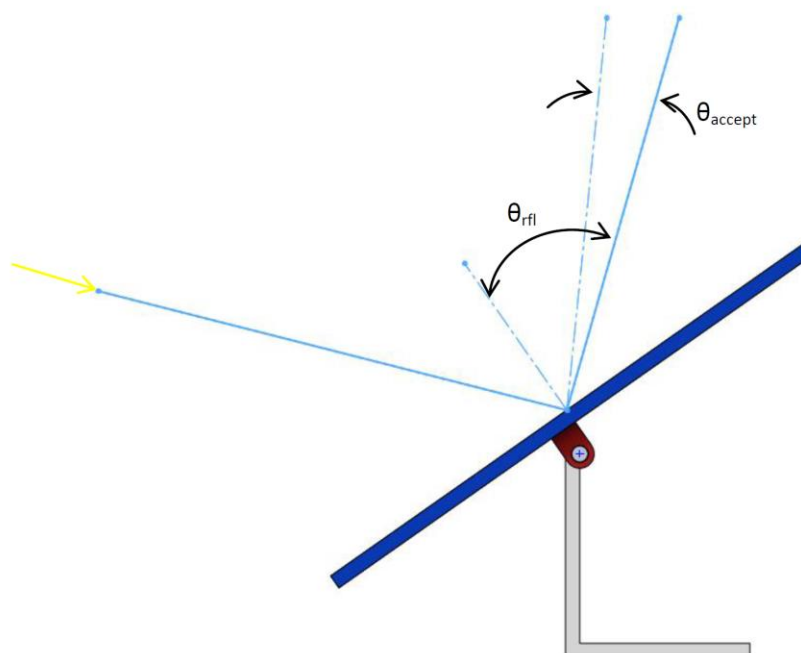
Η κατασκευή και η επιλογή των κατόπτρων γίνεται με βάση την κατοπτρική ανάκλαση. Η τέλεια κατοπτρική ανάκλαση, σύμφωνα με τον ορισμό της προκύπτει όταν μια τυχαία δέσμη ακτινοβολίας  $\rho_s$ , προσπίπτει σε ένα επίπεδο κάτοπτρο με γωνία  $\theta_i$  και στη συνέχεια ανακλάται με την ίδια γωνία  $\theta_{rfl}$  αλλά με αντίθετη φορά. Τα κάτοπτρα που μπορούν να τηρούν αυτό τον κανόνα είναι συνήθως πανάκριβες κατασκευές με πολύ μικρό συντελεστή τραχύτητας και επιφάνεια σχεδόν λεία. Έτσι για τις κοινές κατασκευές θα πρέπει να λάβουμε υπόψιν την ανάκλαση που συμβαίνει όταν η επιφάνεια παρουσιάζει τραχύτητα, με αποτέλεσμα η δέσμη να αντικατοπτρίζεται με λόγο :

$$Rs = \rho_s = \frac{I_{r,a}}{I_b} \quad (2.31)$$

Όπου

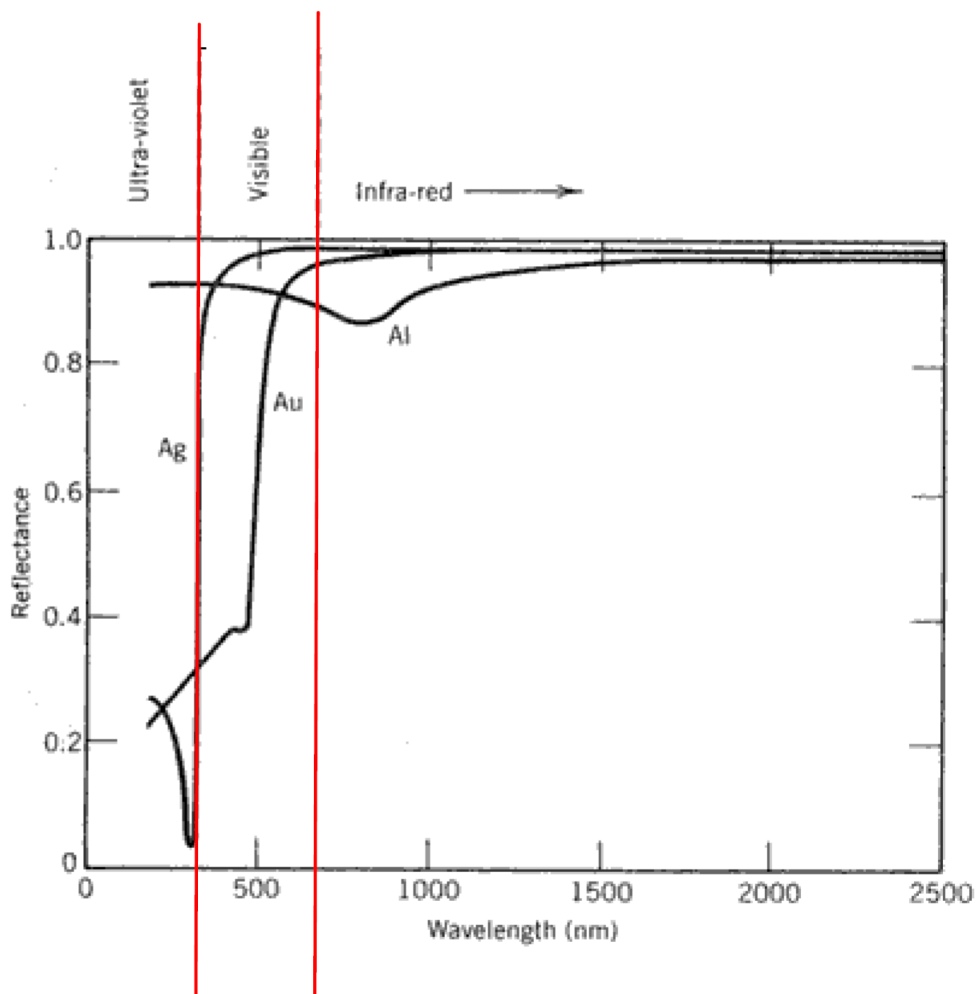
$I_{r,a}$ : η μειωμένης ισχύος δέσμη ακτινοβολίας που προκύπτει μετά την πρόσπτωση και ανακλάται με σύμφωνα με τη γωνία  $\theta_{accept}$

$I_b$ : η ισχύς της ακτινοβολίας που προσπίπτει στο κάτοπτρο.



Εικόνα 2.16 : Η ανάκλαση με γωνία  $\theta_{accept}$

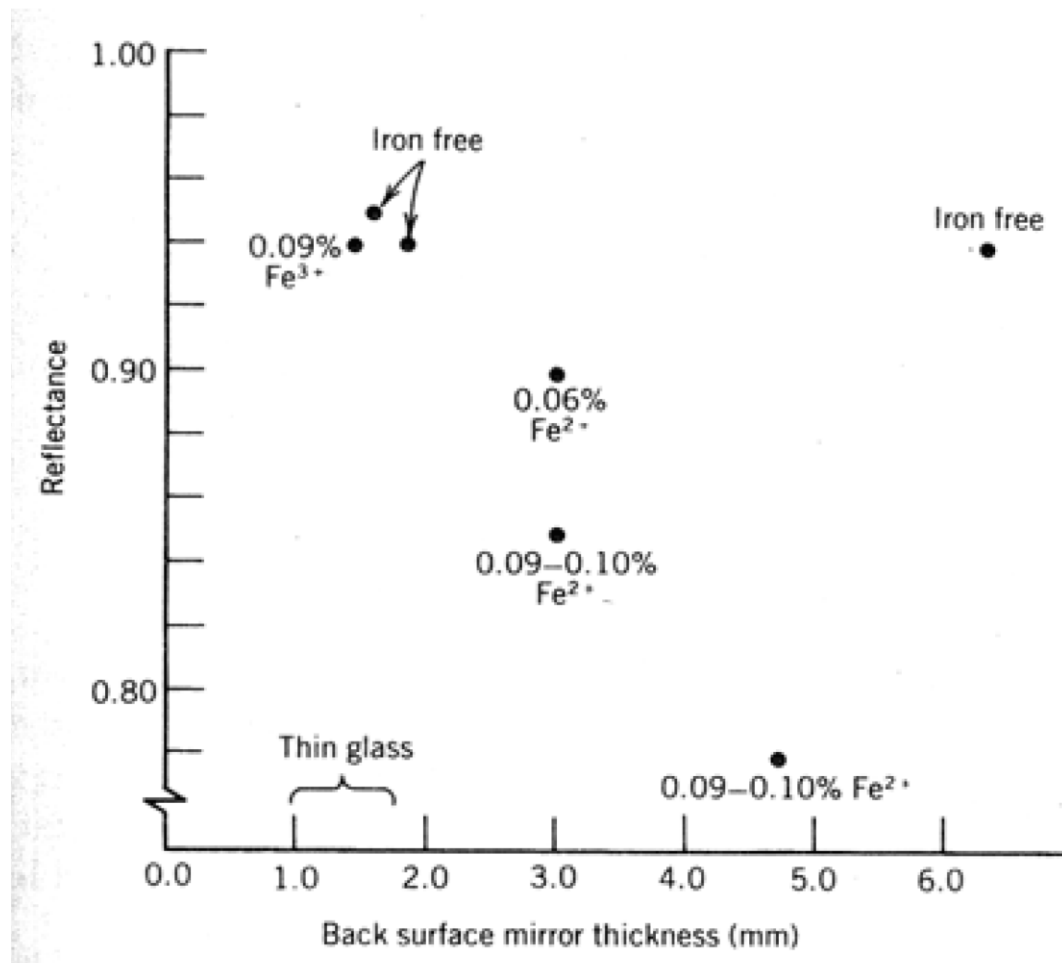
Η ακτινοβολία που εκπέμπει ο ήλιος στη Γη δεν έχει σταθερό μήκος κύματος. Έτσι στο επόμενο διάγραμμα παρουσιάζεται η ανάκλαση του φωτός για διάφορα μήκη κύματος και για 3 υλικά (Ag, Al, Au). Από το διάγραμμα καταλαβαίνουμε ότι ο λόγος ανάκλασης της ακτινοβολίας είναι πάρα πολύ καλός για το ορατό φάσμα της ακτινοβολίας στα συγκεκριμένα υλικά. Η χρήση τους όμως είναι ιδιαίτερα ακριβή.



Εικόνα 2.17 : Ανάκλαση φωτός σε διάφορα μήκη κύματος για τα υλικά Ag, Au, Al

Έτσι μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε κάτοπτρα τα οποία χρησιμοποιούν δύο επιφάνειες. Η πρώτη επιφάνεια (εξωτερική) είναι διαφανής και αφήνει την ακτινοβολία να περάσει, ενώ η δεύτερη φέρει σκούρο χρώμα και μπορεί να ανακλά το φως. Η διαφανής επιφάνεια μπορεί να είναι είτε από γυαλί είτε από πλαστικό. Στα κάτοπτρα όμως αυτά παρουσιάζεται το φαινόμενο της απορρόφησης της ακτινοβολίας, αφού όταν οι ακτίνες περάσουν το διαφανές υλικό ένα ποσοστό απορροφάται. Η ικανότητα

λοιπόν ενός υλικού να αφήνει την ενέργεια της ακτινοβολίας να περνά, ονομάζεται Transmittance τα και υπολογίζει το λόγο της ισχύος της ακτινοβολίας που διαπερνά το υλικό ( $I_{tr}$ ) προς την ισχύ της ακτινοβολίας. Μετά από μελέτες που έγιναν παρατηρήθηκε ότι όταν το διαφανές υλικό περιέχει στοιχεία  $Fe^{2+}$ , τότε η διαπερατότητα που εμφανίζει το υλικό μπορεί να φθάσει σε υψηλά επίπεδα. Στο επόμενο διάγραμμα παρουσιάζεται η ανακλαστική ικανότητα ενός κατόπτρου ανάλογα με το πάχος του και το ποσοστό του Fe.



Εικόνα 2.18 :Ανακλαστικότητα κατόπτρου ανάλογα με το πάχος της επιφάνειας και την περιεκτικότητα σε ποσοστό Fe

Τα υλικά που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε σήμερα είναι πάρα πολλά και οι εταιρίες λόγω της ανάγκης για δημιουργία όλο και αποδοτικότερων κατόπτρων έχουν αναπτύξει διατάξεις με πολύ καλά αποτελέσματα κατοπτρικής ανάκλασης. Στο επόμενο πίνακα παρατίθενται αρκετά υλικά μαζί με τις τιμές  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_s$  ,

$R_1$ : η κατοπτρική ανάκλαση του υλικού όταν η ακτινοβολία προσπίπτει απευθείας σε αυτό.

$R_2$ : η κατοπτρική ανάκλαση του υλικού όταν η ακτινοβολία που προσπίπτει στο κάτοπτρο, προέρχεται από τη συγκέντρωση της ακτινοβολίας που ανακλάται από το ίδιο το υλικό.  $R_s$ : το άθροισμα των δύο παραπάνω όρων.

Material	Measurement wavelength (nm)	$R_1$	$R_2$	$R_s$
<b>I. Second surface glass</b>				
(a) Laminated glass – Carolina Mirror Co.	500.0	0.92		<b>0.83</b>
<b>(b) Laminated glass – Gardner Mirror Co.</b>				
Perpendicular to streaks	600.0	0.92		<b>0.90</b>
	500.0	0.92		
Parallel to streaks	800.0	0.88		
	500.0	0.92		
(c) Corning microsheet (Vacuum chuck)	550.0	0.77	0.18	<b>0.95</b>
<b>II. Metallized plastic films</b>				
<b>(a) 3M Scotchcal 5400</b>				
	500.0	0.86		
	600.0	0.86		
	700.0	0.82		
	900.0	0.84		
<b>(b) 3M FEK – 163</b>	500.0	0.86		<b>0.85</b>
	600.0	0.86		
	700.0	0.82		
	900.0	0.84		
<b>(c) Sheldahl aluminized Teflon</b>	400.0	0.73	0.15	<b>0.87</b>
	500.0	0.80	0.07	
	700.0	0.81	0.04	
	900.0	0.81	0.03	
<b>III. Polished , bulk aluminum</b>				
<b>(a) Alcoa Alzak</b>				
Perpendicular to rolling marks	670.0	0.66	0.21	<b>0.85</b>
	505.0	0.56	0.33	
	407.5	0.45	0.42	
Parallel to rolling marks	670.0	0.70	0.17	
	505.0	0.62	0.27	
	407.5	0.58	0.29	
<b>(b) Kingston Ind. Kinglux</b>				
Perpendicular to rolling marks	498.0	0.65	0.23	<b>0.85</b>
Parallel to rolling marks	498.0	0.67	0.21	
<b>(c) Metal fabrications bright aluminum</b>				
	550.0	0.44	0.43	<b>0.84</b>

Εικόνα 2.20 : Δημοφιλή υλικά κατόπτρων

## 2.8 ΗΛΙΑΚΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ

### 2.8.1 ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΤΗΣ ΕΝΤΑΣΗΣ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΛΟΓΩ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ

Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας ελαττώνεται κατά τρόπο αντιστρόφως ανάλογο του τετραγώνου της απόστασης, καθώς απομακρυνόμαστε από την πηγή εκπομπής. Η γη γυρίζει γύρω από τον ήλιο στη γνωστή ελλειπτική τροχιά μεταβάλλοντας συνεχώς την μεταξύ τους απόσταση, όπως δείχνει η παρακάτω εικόνα. Η γη είναι πλησιέστερα στον ήλιο την 3η Ιανουαρίου (περιήλιο), ενώ η μέγιστη απόσταση παρατηρείται στις 4 Ιουλίου (αφήλιο). Η διαφορά ανάμεσα στις δύο θέσεις ανέρχεται στα 5.000.000 χιλιόμετρα. Τελικά η Γη στις 3 Ιανουαρίου δέχεται 7% περισσότερη ενέργεια σε σχέση με τις 4 Ιουλίου



Εικόνα 2.21: Η ελλειπτική τροχιά της γης

### 2.8.2 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΕΝΤΑΣΗΣ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΗΣ ΗΜΕΡΑΣ

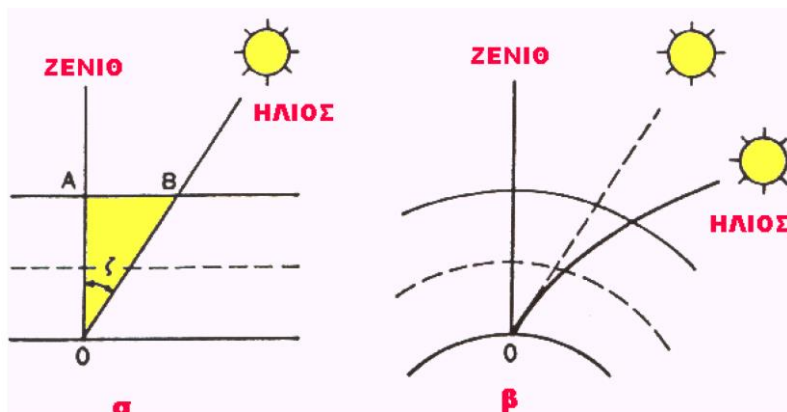
Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας σε μια επιφάνεια κάθετη στη αρχή της ατμόσφαιρας της γης είναι  $1367 \text{ W/m}^2$ . Επειδή, όμως μόνο το 79% της ακτινοβολίας φθάνει στην επιφάνεια της γης, η ένταση της ακτινοβολίας πέφτει στα  $1000 \text{ W/m}^2$ .

Όσο μεγαλύτερη είναι η διαδρομή που ακολουθεί η ακτινοβολία μέχρι την επιφάνεια της γης τόσο μεγαλύτερη είναι και απορρόφηση. Το μήκος της διαδρομής της ηλιακής ακτινοβολίας είναι μικρότερο, όταν ο ήλιος είναι στο ζενίθ του τόπου. Επομένως η μέγιστη ένταση στη μονάδα επιφάνειας προκύπτει όταν οι ακτίνες είναι κάθετες προς

την επιφάνεια. Οι ακτίνες του ήλιου σχηματίζουν με την κατακόρυφο του τόπου, γωνία ( $\zeta$ ) γνωστή ως γωνία Zenίθ. Άρα η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας σε σχέση με την γωνία ζενίθ θα είναι:

$$I = I_0 \cos(\zeta) \quad (2.32)$$

Για το λόγο αυτό, τις πρωινές και απογευματινές ώρες η ένταση του ήλιου είναι μικρότερη από την ένταση όταν ο ήλιος είναι στο ζενίθ του τόπου.



Εικόνα 2.22 (α),(β): Η γωνία ζενίθ του ήλιου, η διάθλαση της ηλιακής ακτινοβολίας από τα στρώματα της ατμόσφαιρας

Επομένως, η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας μεταβάλλεται στη διάρκεια της ημέρας μεταξύ μιας μηδενικής τιμής, κατά τη διάρκεια της νύχτας και μιας μέγιστης τιμής, όταν ο ήλιος βρίσκεται στο ζενίθ του τόπου. Πράγματι, σύμφωνα με τη σχέση (2.32) όταν η γωνία  $\zeta = 0$  τότε  $I = I_0$

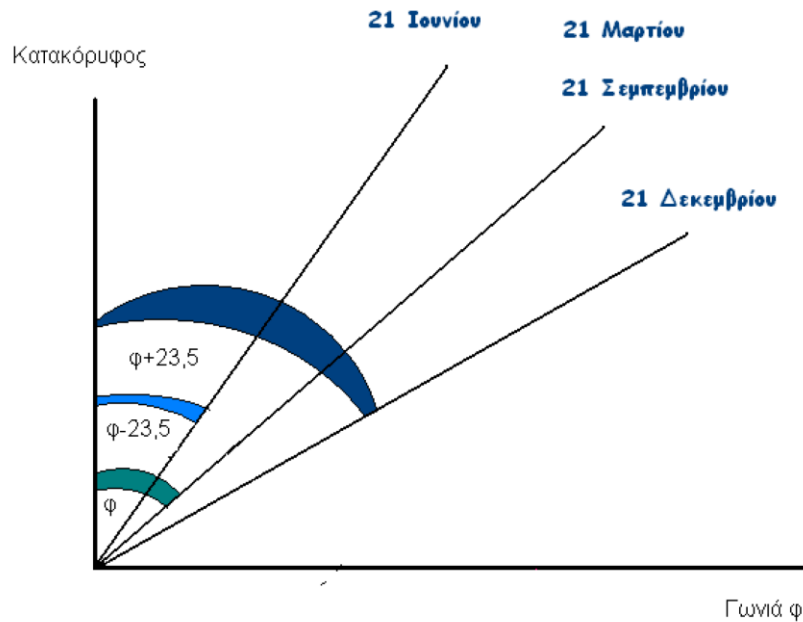
### 2.8.3 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΕΝΤΑΣΗΣ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΟΥ ΕΤΟΥΣ

Όπως γνωρίζουμε ο άξονας περιστροφής της γης γύρω από τον εαυτό της δεν είναι κάθετος στο επίπεδο περιφοράς τη γης γύρω από τον ήλιο, αλλά σχηματίζει γωνία  $23,5^\circ$ . Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μεταβάλλεται η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας με το χρόνο. Αν χρησιμοποιήσουμε την ουράνια σφαίρα τοποθετώντας τη γη στο κέντρο της, τότε η φαινόμενη πορεία του ήλιου πάνω σε αυτή ονομάζεται εκλειπτική. Ο ουράνιος ισημερινός και η εκλειπτική τροχιά έχουν μια απόκλιση μεταξύ τους, που μεταβάλλεται συνεχώς, ανάλογα με την εποχή. Οι τιμές της απόκλισης παίρνουν τις μέγιστες τιμές κατά το θερινό και χειμερινό ηλιοστάσιο ενώ μηδενίζονται στις ισημερίες:

- Θερινό ηλιοστάσιο -21 Ιουνίου  $-23.45^\circ$
- Χειμερινό ηλιοστάσιο 21 Δεκεμβρίου  $+23.45^\circ$

- Στις ισημερίες 21 Μαρτίου και 21 Σεπτεμβρίου, η απόκλιση ισούται είναι μηδέν.

Για να είναι λοιπόν, οι ακτίνες του ήλιου , κάθετες σε ένα γεωγραφικό τόπο με γεωγραφικό πλάτος  $\varphi$  θα πρέπει να υπάρχει μια διόρθωση στη γωνία που σχηματίζει ο κατακόρυφος του τόπου με την εκλειπτική, κατά μια γωνία που παίρνει τιμές από  $\varphi+23,50^\circ$  μέχρι  $\varphi-23,50^\circ$  ανάλογα με την εποχή.



**Εικόνα 2.23:** Θέση του ηλίου στο θερινό (21 Ιουνίου) και χειμερινό (21 Δεκεμβρίου) ηλιοστάσιο καθώς και στην εαρινή ( 21 Μαρτίου) και φθινοπωρινή ( 21 Δεκεμβρίου) ισημερία σε ένα γεωγραφικό τόπο  $\varphi$

Για κάθε ημέρα του έτους η γωνία απόκλισης υπολογίζεται από τη σχέση :

$$\delta = 23.45 * \sin\left(\frac{360 * (284 + n)}{365}\right) \quad (2.33)$$

#### 2.8.4 Η ΩΡΙΑΙΑ ΓΩΝΙΑ

Η ωριαία γωνία  $\omega$  ορίζεται ως η μετατόπιση του ήλιου ανατολικά ή δυτικά του τοπικού μεσημβρινού λόγω της περιστροφής της γης περί τον άξονα της με ρυθμό  $15^\circ/\text{h}$ .

Η τιμή της ωριαίας γωνίας δίνεται από τη σχέση :

$$\omega = 0.25x(\Delta T_{noon}) \quad (2.34)$$

Όπου

$\Delta T_{\text{noon}}$ : είναι η χρονική απόσταση από το ηλιακό μεσημέρι (12:00 μ.μ.) σε min

Η γωνία  $\omega$  λαμβάνει θετικές τιμές όταν υπολογίζεται από τις 12μ.μ και μετά ενώ είναι αρνητική για τιμές υπολογισμού πριν το ηλιακό μεσημέρι.

### 2.8.5 ΓΩΝΙΑ ΠΡΟΣΠΤΩΣΗΣ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Η γωνία πρόσπτωσης της αμέσου ηλιακής ακτινοβολίας  $\theta$ , πάνω σε μια επιφάνεια είναι η γωνία μεταξύ των προσπιπτουσών ηλιακών ακτινών και της καθέτου στην επιφάνεια.

Η γωνία πρόσπτωσης για μια επιφάνεια δίνεται από τη γενική σχέση :

$$\begin{aligned} \cos \theta &= \sin \delta \sin \varphi \cos \beta - \sin \delta \cos \varphi \sin \beta \cos \gamma \\ &+ \cos \delta \cos \varphi \cos \beta \cos \omega \\ &+ \cos \delta \sin \varphi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \\ &\cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \end{aligned} \quad (2.35)$$

Όπου:

$\gamma$ :ορίζεται ως το αζιμούθιο της επιφάνειας, είναι η γωνία που σχηματίζεται από την προβολή της καθέτου στη επιφάνεια πάνω στο οριζόντιο επίπεδο και τη νότια κατεύθυνση

$\beta$ :η γωνία κλίσης του συστήματος ως προς το οριζόντιο επίπεδο

Η γωνία πρόσπτωσης για οριζόντιες επιφάνειες ορίζεται από τη σχέση :

$$\cos \theta = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega \quad (2.36)$$

## 2.9 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΤΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΤΟΥ ΗΛΙΟΥ

### 2.9.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο μεταβολή στην ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας έχουμε:

- Λόγω της μεταβολής της απόστασης ηλίου-γης
- Κατά τη διάρκεια της ημέρας
- Κατά τη διάρκεια του έτους.

Από τις παραπάνω τρεις μεταβολές, στην πρώτη περίπτωση, δεν μπορεί να υπάρξει ανθρώπινη παρέμβαση. Μπορούμε όμως, να εξασφαλίσουμε την μέγιστη απορρόφηση της ηλιακής ενέργειας στις άλλες δυο περιπτώσεις. Για το σκοπό αυτό, το σύστημα παρακολούθησης του ηλίου θα πρέπει να εξασφαλίσει την κίνηση του συλλέκτη σε δυο άξονες: τον οριζόντιο και τον κατακόρυφο άξονα.



Η κίνηση του συλλέκτη στον οριζόντιο άξονα θα εξασφαλίζει τη μέγιστη δυνατή απορρόφηση της ηλιακής ενέργειας κατά τη διάρκεια του έτους. Αυτό επιτυγχάνεται με την αλλαγή της κλίσης συλλέκτη στη διάρκεια του έτους, καθημερινά, στρέφοντας συνεχώς κάθετα το πλαίσιο στις ηλιακές ακτίνες. Ουσιαστικά δίνουμε τη δυνατότητα συλλέκτη να ακολουθήσει την εποχιακή μεταβολή και να μεταβάλει μόνο του, τη γωνία κλίσης από  $\varphi-23,5^\circ$  μέχρι  $\varphi+23,5^\circ$  ( όπου  $\varphi$  το γεωγραφικό πλάτος του τόπου).

Επίσης με την κίνηση του πλαισίου στήριξης του συλλέκτη στον κατακόρυφο άξονα μεταβάλλουμε τη ζενίθια γωνία, κατά τη διάρκεια της ημέρας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα και η αζιμούθια γωνία να μεταβάλλεται συνεχώς και να μηδενίζεται με τη σειρά της. Με αυτό το τρόπο δίνουμε τη δυνατότητα στο συλλέκτη να περιστρέφεται συνεχώς, ακολουθώντας την πορεία του ήλιου.

## 2.9.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΝΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΔΥΟ ΑΞΟΝΩΝ

Το σύστημα αποτελείται από τρία βασικά μέρη:

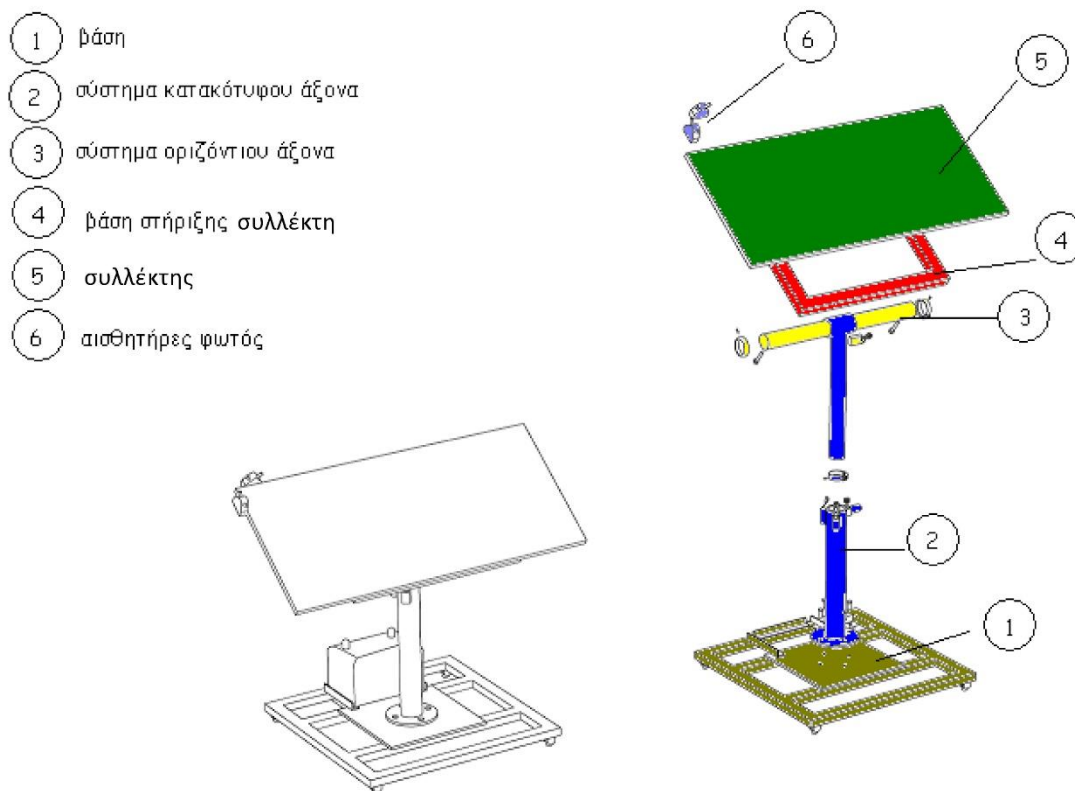
1. Το μηχανολογικό τμήμα το οποίο περιλαμβάνει :
  - Τη βάση
  - Το σύστημα κατακόρυφου άξονα
  - Το σύστημα οριζόντιου άξονα
  - Τη βάση στήριξης του Φ/Β πλαισίου
  - Τη βάση τοποθέτησης των αισθητήρων
2. Το ηλεκτρολογικό τμήμα που αποτελείται από :
  - Δύο μοτέρ (1 μοτέρ για κάθε κίνηση)
  - Δύο ζεύγη τερματικών διακοπών ( 1 ζεύγος για κάθε ηλεκτρονικό τμήμα
3. Το ηλεκτρονικό κύκλωμα που περιλαμβάνει:
  - το ηλεκτρονικό κύκλωμα
  - του αισθητήρες (φωτοαντιστάσεις)

## 2.9.3 ΒΑΣΙΚΗ ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Η αρχή λειτουργίας του συστήματος είναι η εξής:

Στην πάνω δεξιά γωνία της πλάκας στήριξης υπάρχουν δυο ζεύγη αισθητήρων (φωτοαντιστάσεων). Κάθε ζεύγος αντιστοιχεί και σε μια κίνηση, στον οριζόντιο και κατακόρυφο άξονα. Συγκεκριμένα το ζεύγος που εφαρμόζει στην μεγάλη ακμή του είναι υπεύθυνο για την κίνηση στον κατακόρυφο άξονα, (ρύθμιση της γωνίας

αξιμούθιου) ενώ αυτό που εφαρμόζει στη μικρή ακμή είναι υπεύθυνο για την κίνηση στο οριζόντιο άξονα (ρύθμιση της γωνίας κλίσης). Σε κάθε ζεύγος ο ένας αισθητήρας είναι υπεύθυνος για την δεξιόστροφη κίνηση και ο άλλος για την αριστερόστροφη κίνηση του μοτέρ. Όταν κάθε ζεύγος φωτοαντιστάσεων δέχεται το ίδιο ηλιακό φως, ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα αποφασίζει η διάταξη πρέπει να παραμείνει ακίνητη. Όταν ο ένας αισθητήρας από το ζεύγος δέχεται περισσότερο ηλιακό φως, τότε μέσω του ηλεκτρονικού κυκλώματος, δίνεται εντολή στο αντίστοιχο μοτέρ να περιστρέψει το συλλέκτη. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, μετά από μικρό χρονικό διάστημα, οι αισθητήρες να δέχονται πάλι την ίδια ηλιακή ακτινοβολία. Τότε το μοτέρ σταματά αυτόματα την κίνηση. Οι τερματικοί διακόπτες υπάρχουν για να σταματάνε τη περιστροφή, όταν η πλάκα έχει πάρει την επιθυμητή θέση, π.χ. μετά τη δύση του ηλίου. Επίσης προστατεύουν τη διάταξη σε περίπτωση αδικαιολόγητης εντολής για συνεχή περιστροφή του κινητήρα, λόγω βλάβης. Το σύστημα παρουσιάζεται στην εικόνα 2.24.



Εικόνα 2.24: Διάταξη σερβομηχανισμού.

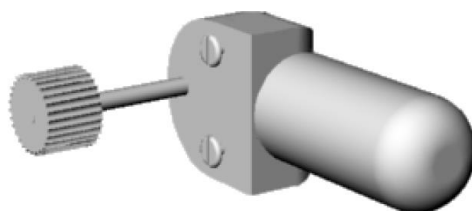
## 2.9.4 ΤΑ ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΤΜΗΜΑΤΑ ΤΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ

### 2.9.4.1 ΤΟ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΚΟ ΤΜΗΜΑ

Τα βασικά μέρη του ηλεκτρολογικού τμήματος είναι τα δυο μοτέρ μετάδοσης οριζόντιας και κατακόρυφης περιστροφής καθώς και οι τερματικοί διακόπτες. Τόσο η τροφοδοσία των μοτέρ όσο και των τερματικών διακόπτων γίνεται από έναν συσσωρευτή που μπορεί είτε να χρησιμοποιεί την ενέργεια του δικτύου είτε να

τροφοδοτείται από τη χρήση μιας φωτοβολταϊκής πλάκας με την αποθήκευση της ηλιακής ενέργειας. Ο συσσωρευτής παράγει συνεχή τάση 12 V.

Τα δυο μοτέρ είναι απλής κατασκευής και είναι ίδια με αυτά που χρησιμοποιούνται για την κίνηση των υαλοκαθαριστήρων των αυτοκινήτων. Η επιλογή τους, γίνεται με βάση τη δύναμη τους και τη ταχύτητα περιστροφής. Τα μοτέρ που επιλέγονται θα πρέπει να έχουν μεγάλη δύναμη ώστε να περιστρέψουν μεγάλα φορτία και μικρή ταχύτητα περιστροφής για προστασία του συστήματος από τις απότομες μεταβολές της έντασης του ηλιακού φωτός. Κάθε μοτέρ έχει στην άκρη του άξονα περιστροφής του, ένα μικρό γρανάζι το οποίο και το περιστρέφει. Το μικρό αυτό γρανάζι εφαρμόζει σε ένα άλλο μεγάλο γρανάζι που είναι στερεωμένο σε μια βάση που βρίσκεται πάνω στον άξονα περιστροφής. Η περιστροφή του μικρού γραναζιού από το μοτέρ, περιστρέφει το μεγάλο γρανάζι του αντίστοιχου άξονα περιστροφής, και άρα την διάταξη του συλλέκτη.



Εικόνα 2.25: Μοτέρ κίνησης της διάταξης

#### Οι τέσσερις τερματικοί διακόπτες

Οι διακόπτες αυτοί, τοποθετημένοι σε κατάλληλες μεταλλικές βάσεις καθορίζουν τα όρια της οριζόντιας και κατακόρυφης περιστροφής. Ουσιαστικά καθορίζουν τα όρια που παίρνει η αζιμούθια γωνία και η γωνία κλίσης. Υπάρχει η δυνατότητα, χειροκίνητης ρύθμισης των γωνιών που επιθυμούμε να περιστραφεί το πλαίσιο, σε κάθε άξονα. Σκοπός τους είναι να διακόπτουν την περιστροφή, όταν η γωνία περιστροφής περάσει τα όρια που θέτουμε. Για παράδειγμα η αζιμούθια γωνία δεν χρειάζεται να είναι πάνω από  $180^\circ$ , αφού το βράδυ δεν υπάρχει ηλιακή ακτινοβολία,



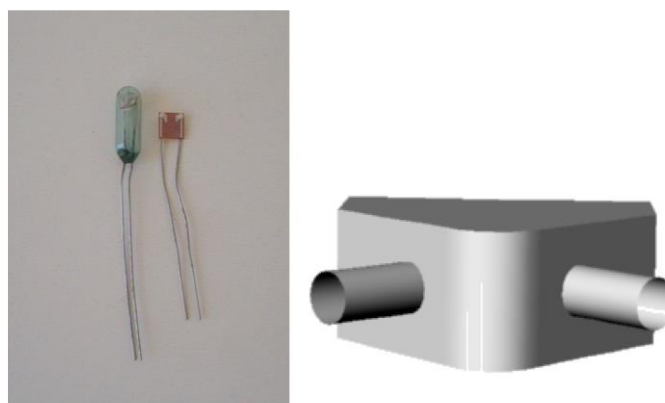
Εικόνα 2.26: Τερματικός διακόπτης

#### 2.9.4.2 ΤΟ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΤΜΗΜΑ

Το ηλεκτρονικό τμήμα αποτελείται από τους αισθητήρες του φωτός και το ηλεκτρονικό κύκλωμα.

##### Αισθητήρες φωτός

Οι αισθητήρες είναι δύο φωτοαντιστάτες που μεταβάλουν την αντίστασή τους ανάλογα με την ηλιακή ακτινοβολία. Οι αισθητήρες βρίσκονται μέσα σε μια ειδική διάταξη, ώστε να σχηματίζουν γωνία μεταξύ τους. Η γωνία αυτή είναι απαραίτητη ώστε, όταν ο ήλιος μετακινηθεί, να ανιχνευτεί η κίνησή του. Όσο πιο μικρή είναι η γωνία τόσο πιο ευαίσθητες είναι οι φωτοαντιστάτες. Επίσης, σημαντικό ρόλο στη ρύθμιση παίζει και το μήκος του σωλήνα που τις περιέχει. Μικρό μήκος σημαίνει λιγότερη ευαισθησία. Το σύστημα έχει δυο ειδικές διατάξεις, μια για κάθε άξονα περιστροφής, και είναι τοποθετημένες στην πάνω αριστερή γωνία της διάταξης σχηματίζοντας ορθή γωνία μεταξύ τους. Όπως έχει αναφερθεί, η οριζόντια διάταξη ανιχνεύει τη ημερήσια πορεία του ήλιου και δίνει εντολή για περιστροφή του κατακόρυφου άξονα. Η κατακόρυφη διάταξη ανιχνεύει την εποχιακή μεταβολή του ηλίου και δίνει εντολή για περιστροφή του οριζοντίου άξονα.

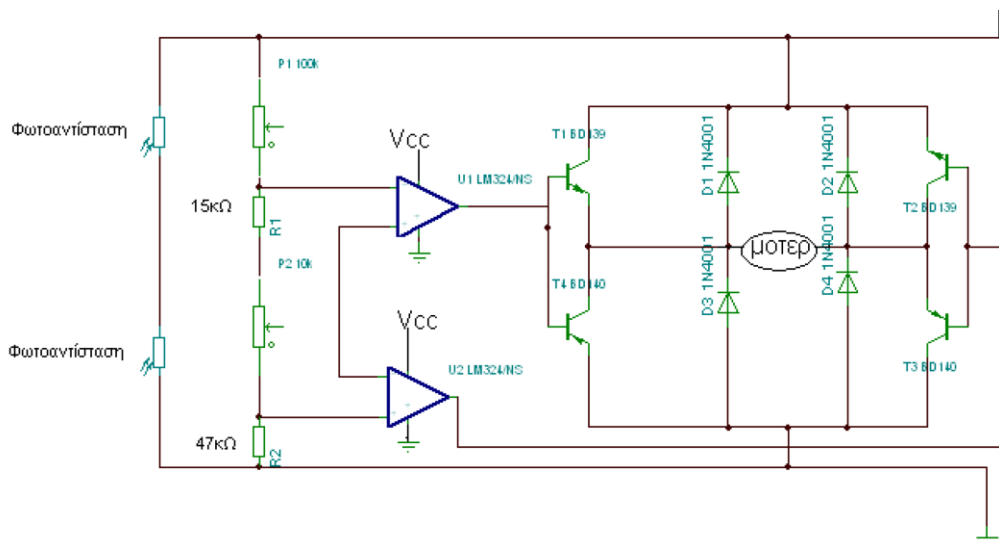


Εικόνα 2.27: Οι αισθητήρες φωτός μαζί με την ειδική διάταξη τοποθέτησής τους

## Το ηλεκτρονικό κύκλωμα

Το ηλεκτρονικό κύκλωμα είναι το μυαλό του συστήματος. Η φιλοσοφία του είναι απλή. Για την κίνηση σε κάθε άξονα χρησιμοποιείται το παραπάνω ζευγάρι αισθητήρων που ανιχνεύουν το φως. Κάθε μια φωτοαντίσταση συνδέεται με ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα (LM324) που εργάζεται σαν συγκριτής παραθύρου. Όταν το φως στις φωτοαντιστάσεις είναι ίδιο, τότε η έξοδος του συγκριτή είναι μηδέν και κρατάει τον αντίστοιχο μοτέρ σε κατάσταση αναμονής. Όταν αλλάξει η θέση του ήλιου, οι φωτοαντιστάσεις μεταβάλουν την αντίστασή τους, με αποτέλεσμα στην έξοδο του συγκριτή να εμφανίζεται μια τάση που είναι θετική ή αρνητική με αποτέλεσμα, να δίνει στο μοτέρ, την αντίστοιχη εντολή για αριστερόστροφη ή δεξιόστροφη περιστροφή.

Οι δίοδοι D1 ως D4 καταπνίγουν ότι αιχμές τάσης παράγονται, από την λειτουργία του κινητήρα και προστατεύουν τον συγκριτή από την αυξομείωση της τάσης. Τα ρυθμιστικά ποτενσιόμετρα P1 και P2 χρησιμοποιούνται για την ευθυγράμμιση της σκόπευσης του συστήματος. Ρυθμίζονται δηλαδή έτσι ώστε ο κινητήρας (μοτέρ) να ηρεμεί όταν και οι δυο φωτοαντιστάσεις δέχονται ακριβώς τον ίδιο φωτισμό. Τα τρανζίστορ T1 ως T4 είναι σε διάταξη γέφυρας και είναι αυτά, που οδηγούν ομαλά τα μοτέρ για δεξιόστροφη ή αριστερόστροφη κίνηση. Για να συμβεί αυτό θα πρέπει να πάρουν το κατάλληλο σήμα στην βάση τους, από την έξοδο του συγκριτή. Επίσης έχουν χρησιμοποιηθεί ειδικά μικρορελέ 12V, όση και η τάση της μπαταρίας. Τα μικρορελέ είναι απαραίτητα για να οδηγήσουν τους κινητήρες, μιας και η τάση που βγάζει η έξοδος του συγκριτή, 10V, δεν είναι ικανή να τους ενεργοποιήσει. Ουσιαστικά η έξοδος του ολοκληρωμένου κυκλώματος οδηγεί τα μικρορελέ και αυτά με τη σειρά τους, τα δυο μοτέρ, χρησιμοποιώντας την τάση της μπαταρίας 12V για την τροφοδοσία των κινητήρων.



Εικόνα 2.28: Το θεωρητικό ηλεκτρονικό κύκλωμα

Στο ηλεκτρονικό κύκλωμα έχει τοποθετηθεί και ένας διακόπτης που ενεργοποιεί ή διακόπτει την λειτουργία του συστήματος σκόπευσης του ήλιου. Επίσης η όλη τροφοδοσία του ηλεκτρονικού κυκλώματος γίνεται από τον ίδιο συσσωρευτή. Η υλοποίηση του κυκλώματος γίνεται με ηλεκτρονική πλακέτα και το κύκλωμα τοποθετείται σε προστατευτικό κάλυμμα. Το προστατευτικό κάλυμμα έχει βιδώνεται πάνω στη βάση του συστήματος παρακολούθησης.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΟΥ ΚΑΤΟΠΤΡΟΥ

## 3.1 ΣΥΝΔΙΑΣΜΟΣ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΩΝ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΟΥ ΚΑΤΟΠΤΡΟΥ

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο προσδιορισμός των γεωμετρικών χαρακτηριστικών και η κατασκευή του εργονομικού παραβολικού κατόπτρου το οποίο θα συνεργάζεται με τον υπάρχων συλλέκτη κενού της εταιρίας AVATEC. Προκειμένου να προχωρήσουμε στην ανάλυση θα πρέπει να συνδυαστούν οι εξισώσεις της γεωμετρίας του κατόπτρου με τις εξισώσεις από τη ροή θερμότητας. Η διασύνδεση αυτή γίνεται μέσω της εξίσωσης του ενεργειακού ισολογισμού στο σύστημα σύμφωνα με την οποία :

$$E_{\eta\lambda} = Q_{USEFUL} + Q_{LOSS} \quad (3.1)$$

Δηλαδή η προσπίπτουσα στο συλλέκτη ακτινοβολία ισούται με την ενέργεια η οποία αξιοποιείται για την ανύψωση της θερμοκρασίας του νερού συν τις ενεργειακές απώλειες του συστήματος.

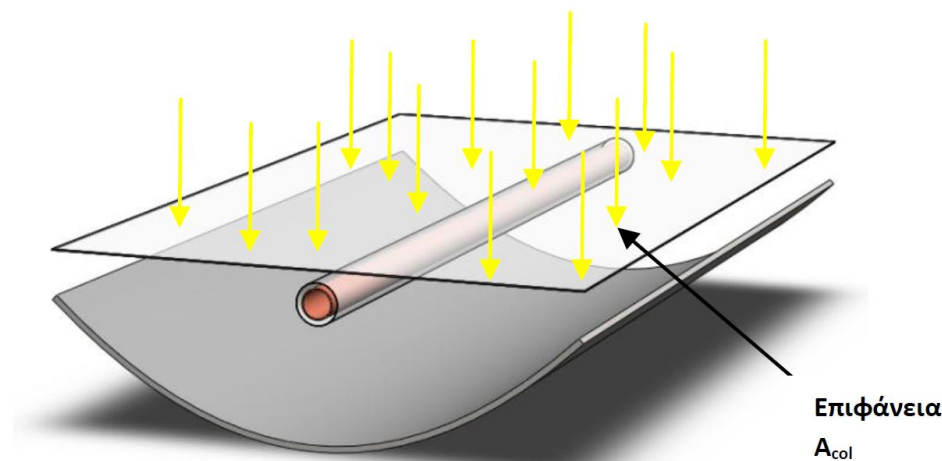
Η συνολική ενέργεια που προσπίπτει στον αγωγό δίνεται από τη σχέση:

$$E_{\eta\lambda} = I_a * A_{col} \quad (3.2)$$

όπου

$I_a$ : η ηλιακή ενέργεια σε  $W/m^2$  και

$A_{col}$ : η συνολική επιφάνεια του συλλέκτη που προσπίπτει κάθετα η ηλιακή ακτινοβολία.



Εικόνα 3.1: Προσδιορισμός της επιφάνειας  $A_{col}$

Δηλαδή ουσιαστικά θεωρούμε ότι όλη η ηλιακή ακτινοβολία, μετά και τις ανακλάσεις που υφίσταται στο κάτοπτρο προσπίπτει κάθετα στον συλλέκτη μέσω μιας επιφάνειας  $A_{col}$ . Προφανώς για την επιφάνεια αυτή ισχύει ότι

$$A_{col} = L * d \quad (3.3)$$

Όπου το  $d$  είναι το άνοιγμα της παραβολής και  $L$  είναι το μήκος του συλλέκτη. Για εμάς το μήκος του συλλέκτη είναι γνωστό και ίσο με 1930mm οπότε εάν υπολογίσουμε το  $A_{col}$  μέσω της (3.2) μπορούμε να βρούμε το  $d$ .

Προκειμένου όμως να γνωρίζουμε το  $A_{col}$  θα πρέπει πρώτα να υπολογιστεί το  $E_{\eta\lambda}$  δηλαδή το  $Q_{USEFUL} + Q_{LOSS}$ . Σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο 2.4.1 για την επίλυση του προβλήματός μας θα θεωρήσουμε ότι  $Q_{LOSS} = 0.075 * E_{\eta\lambda}$  οπότε και

$$Q_{USEFUL} = 0.925 * E_{\eta\lambda} \quad \text{ή} \quad E_{\eta\lambda} = 1.08 * Q_{USEFUL} \quad (3.4)$$

Το  $Q_{USEFUL}$  με τη σειρά του θα υπολογιστεί σύμφωνα με το ισοδύναμο πρόβλημα, απ' όπου έχουμε ότι:

$$Q_{USEFUL} = Q_{USEFULA} + Q_{USEFULB} \quad (3.5)$$

Και από τον συνδυασμό των σχέσεων 2.17 με 2.19 και 2.18 με 2.20 προκύπτει ότι

$$Q_{USEFULA} = \rho_{\alpha} * C_p * \dot{Q} * \Delta T_{\alpha} \quad (3.6)$$

και:

$$Q_{USEFULB} = \rho_{\beta} * C_p * \dot{Q} * \Delta T_{\beta} \quad (3.7)$$



Στις σχέσεις 3.6 και 3.7 γνωρίζουμε ότι  $\Delta T_{\alpha} = \Delta T_{\beta} = 35^{\circ}\text{C}$  σύμφωνα με την παραδοχή ότι η θέρμανση του νερού είναι η ίδια και για τα δύο τμήματα του σωλήνα. Για τον εσωτερικό σωλήνα η μέση θερμοκρασία του νερού είναι

$$T_{am} = \frac{T_{in1} + T_{out1}}{2} = \frac{45 + 10}{2} = 27.5^{\circ}\text{C} \quad \text{και αντίστοιχα για τον σωλήνα 2 προκύπτει}$$

$T_{\beta m} = 62.5^{\circ}\text{C}$ . Με τη χρήση της εξίσωση 2.21 προκύπτουν οι αντίστοιχες πυκνότητες  $\rho_{\alpha}$  και  $\rho_{\beta}$  όπου  $\rho_{\alpha} = 997,686 \text{ kg/m}^3$  και  $\rho_{\beta} = 986,91 \text{ kg/m}^3$ . Οπότε για να μπορέσουν να προσδιοριστούν τα  $Q_{USEFULA}$  και  $Q_{USEFULB}$  θα πρέπει να γνωρίζουμε την παροχή  $Q$ . Η παροχή δίνεται από τη σχέση :

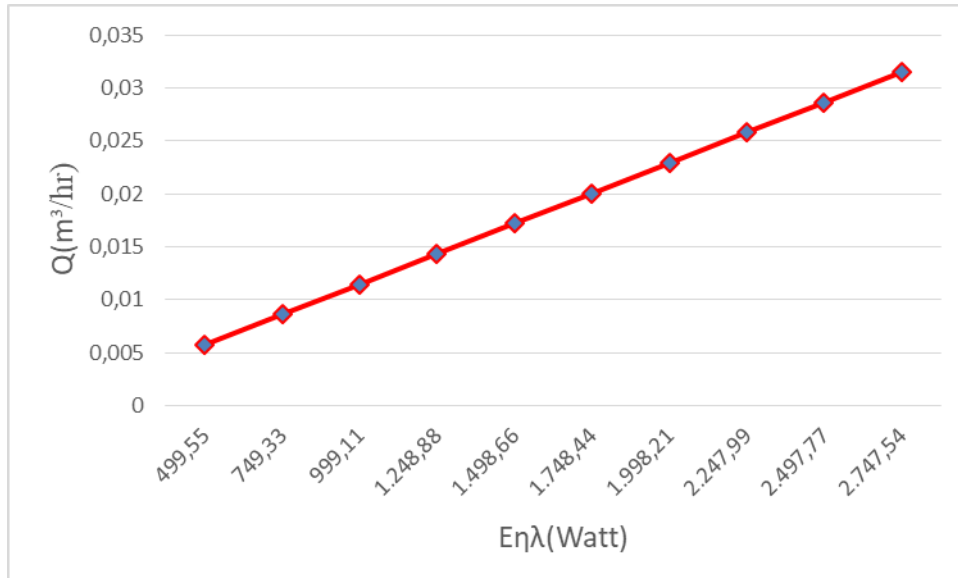
$$\dot{Q} = U * A \quad (3.8)$$

Όπου το  $U$  είναι η ταχύτητα στον αγωγό και  $A$  η διατομή του αγωγού. Για τον εσωτερικό αγωγό 1 η διατομή του δίνεται από τον τύπο  $A_{\alpha} = \frac{\pi * d_{in}^2}{4}$  όπου  $d_{in}$  είναι η εσωτερική διάμετρος του αγωγού. Το φάσμα των ταχυτήτων στις οποίες θα λειτουργεί η διάταξή μας ορίζεται ως το διάστημα από 0.1-0.5m/sec. Για αυτό το διάστημα και με βήμα 0.05m/sec υπολογίζουμε 10 διαφορετικές παροχές σε  $\text{m}^3/\text{sec}$ , με γνωστή την παροχή υπολογίζονται από τις σχέσεις 3.6,3.7 τα μεγέθη  $Q_{USEFULA}$ ,  $Q_{USEFULB}$ , και από την 3.4 το  $E_{\eta\lambda}$  όπως φαίνεται και στον ακόλουθο πίνακα.

U (m/sec)	Q (m <sup>3</sup> /sec)	Q <sub>USEFULA</sub> (Watt)	Q <sub>USEFULB</sub> (Watt)	E <sub>ηλ</sub> (Watt)
0.1	1,59043E-06	232,5304287	230,018869	499,5532415
0.15	2,38565E-06	348,795643	345,0283035	749,3298622
0.2	3,18086E-06	465,0608573	460,037738	999,1064829
0.25	3,97608E-06	581,3260716	575,0471725	1248,883104
0.3	4,77129E-06	697,591286	690,056607	1498,659724
0.35	5,56651E-06	813,8565003	805,0660415	1748,436345
0.4	6,36173E-06	930,1217146	805,0660415	1874,002777
0.45	7,15694E-06	1046,386929	1035,084911	2247,989587
0.5	7,95216E-06	1162,652143	1150,094345	2497,766207
0.55	8,74737E-06	1278,917358	1265,10378	2747,542828

**Πίνακας 3.1:** Υπολογισμός Q (m<sup>3</sup>/sec), Q<sub>USEFULA</sub>(Watt), Q<sub>USEFULB</sub>(Watt), E<sub>ηλ</sub> (Watt)

Από τον παραπάνω πίνακα φαίνεται πως με την αύξηση της παροχής, αυξάνεται και η ενέργεια που απαιτείται για την θέρμανση του νερού. Αυτό είναι λογικό διότι η αύξηση της παροχής σημαίνει και μεγαλύτερη ποσότητα νερού, συνεπώς στον ίδιο χρόνο απαιτείται και περισσότερη θερμότητα για την επίτευξη του ίδιου αποτελέσματος.



**Εικόνα 3.2:** Διάγραμμα απαιτούμενης ηλιακής ενέργειας συναρτήσει της παροχής.

Με γνωστό πλέον το  $E_{\eta\lambda}$ , γίνεται φανερό πως για τον υπολογισμό του  $A_{col}$  θα πρέπει να είναι γνωστό το  $I_a$ . Το  $I_a$  είναι η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει κάθετα στο επίπεδο του συλλέκτη. Πρόκειται όμως για το ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας που θεωρητικά προσπίπτει στον συλλέκτη μετά από τις ανακλάσεις που έχει υποστεί στο παραβολικό κάτοπτρο. Για το  $I_a$  υποθέσαμε ένα εύρος τιμών από  $900-1350\text{W/m}^2$ , και ακολουθεί η αιτιολόγηση αυτής της επιλογής.

Από την τεχνική οδηγία του TEE TOTEE-20701-3<sup>rd</sup> Edition έχουμε τον πίνακα 3.2 στον οποίο δίνεται η μέση μηνιαία ολική ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο για διάφορες πόλεις σε όλη την Ελλάδα.

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
Αγχιάλος	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
Αργος (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

Πίνακας 3.2: Μέση μηνιαία ολική ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο για διάφορες πόλεις της Ελλάδας σε  $Kwh/m^2.mo$

Επίσης στο παράρτημα Α της ίδιας τεχνικής οδηγίας [15] δίνεται η μέση διάρκεια της ηλιοφάνειας για τους μήνες Ιανουάριο, Φεβρουάριο, Αύγουστο και Ιούλιο, όπως φαίνονται στον πίνακα 3.3.

ΣΤΑΘΜΟΣ	ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ	ΜΗΝΑΣ	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ				ΑΝΕΜΟΙ			ΗΛΙΟΦΑΝΕΙΑ		ΥΨΟΣ ΥΨΕΙΟΥ	ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ
			ΑΠΟΛΥΤΗ ΕΛΑΧΙΣΤΗ	ΜΕΣΗ ΕΛΑΧΙΣΤΗ	ΜΕΣΗ ΜΕΓΙΣΤΗ	ΑΠΟΛΥΤΗ ΜΕΓΙΣΤΗ	ΕΠΙΚΡ/ΣΑ Δί/νση	ΜΕΣΗ ΕΝΤΑΣΗ	ΔΙΑΡΚΕΙΑ	ΜΕΣΗ ΝΕΦΩΣΗ			
Αθήνα Ελληνικό	37° 54'	ΙΟΥΛ	15,5	22,9	31,9	42,0	Β	2,7	383,4	1,1	6,3	1955 - 2001	
		ΑΥΓ	16,0	22,9	31,9	41,9	Β	2,7	359,1	1,1	6,4		
	23° 45'	ΙΑΝ	-2,9	7,0	13,6	22,1	Β	2,4	120,2	4,8	46,0		
		ΦΕΒ	-3,2	7,2	14,2	22,0	Β	2,5	122,7	4,7	39,1		
Αθήνα Ν. Φιλαδέλφεια	38° 03'	ΙΟΥΛ	14,0	20,9	33,6	45,0	ΒΑ	2,2	378,2	1,2	6,2	1955 - 2000	
		ΑΥΓ	13,8	20,8	33,3	43,6	ΒΑ	2,1	359,3	1,1	5,8		
	23° 40'	ΙΑΝ	-5,8	5,2	12,5	21,4	ΒΑ	1,8	120,0	4,8	54,7		
		ΦΕΒ	-5,2	5,4	13,6	25,8	ΒΑ	1,9	126,3	4,6	44,7		

Πίνακας 3.3: Μέση μηνιαία διάρκεια ηλιοφάνειας

Όπως παρατηρούμε από τον πίνακα 3.2 η μέγιστη τιμή παρατηρείται για τον μήνα Ιούλιο όπου  $\bar{I}_\alpha = 222.4kWh / (m^2.mo)$  και η ελάχιστη για τους μήνες Δεκέμβριο και Ιανουάριο όπου  $\bar{I}_\alpha = 55.7kWh / (m^2.mo)$  και  $\bar{I}_\alpha = 63.0kWh / (m^2.mo)$  αντίστοιχα. Από

τον πίνακα 3.3 έχουμε τη διάρκεια της ηλιοφάνειας για αυτούς του μήνες, σύμφωνα με τον οποίο η διάρκεια της ηλιοφάνειας για τον μήνα Ιούλιο είναι 383,4 h ενώ για τον μήνα Ιανουάριο 120,2hr. Διαιρώντας λοιπόν τις παραπάνω τιμές της μέσης τιμής της μηνιαίας ολικής ακτινοβολίας με την αντίστοιχη διάρκεια της ηλιοφάνειας προκύπτει ότι  $I_1 = 580.1W / m^2$  για τον Ιούλιο και  $I_2 = 524.1W / m^2$  για τον μήνα Ιανουάριο. Οι τιμές αυτές είναι ουσιαστικά η άμεση ηλιακή ακτινοβολία που θα προσέπιπτε στο οριζόντιο επίπεδο. Με βάση τη σχέση 2.28 οι τιμές αυτές θα πρέπει να πολλαπλασιαστούν με τον συντελεστή οπτικής απόδοσης προκειμένου να βρούμε πιο ποσοστό τελικά καταλήγει στον συλλέκτη. Θεωρούμε για το σύστημά μας ότι :

$$\eta_{opt} = \rho * \gamma * \tau * \alpha = 0.93 * 0.96 * 0.91 * 0.92 = 0.764$$

Προκύπτει ότι  $I_1' = 443.2W / m^2$  και  $I_2' = 400.41W / m^2$  αντίστοιχα. Οι τιμές του  $\eta_{opt}$  διαμορφώνονται ως εξής : υποθέσαμε  $\rho=0,93$  που αντιστοιχεί σε καθαρά επαργυρωμένα κάτοπτρα,  $\gamma=0.96$  δηλαδή για έναν καλώς συναρμολογημένο συλλέκτη,  $\tau=0,91$  που αντιστοιχεί στο borosilicate glass που έχουμε και τέλος  $\alpha=0,92$  που είναι το κάτω όριο της απορρόφησης που δίνει ο κατασκευαστής.

Για να προκύψουν οι τιμές της ακτινοβολίας που προσπίπτει κάθετα στον συλλέκτη δηλαδή το  $I_a$ , θα πρέπει οι παραπάνω τιμές να πολλαπλασιαστούν με τον συντελεστή συγκέντρωσης C, δηλαδή ουσιαστικά οι τιμές αυτές να προσαυξηθούν σύμφωνα με το κέρδος που έχουμε από τη χρήση του παραβολικού κατόπτρου.

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία η τιμή αυτή του συντελεστή μπορεί να πάρει αρκετά υψηλές τιμές έως και 70. Επειδή το σύστημα μας αποτελείται από έναν σωλήνα με μήκος  $L=1930mm$ , το οποίο είναι πολύ μικρό σε σχέση με τα μεγέθη που χρησιμοποιούνται στα συνήθη συστήματα PTC θα μεταβάλουμε τις τιμές του C για ένα εύρος από 2 έως 4. Συνεπώς για τον Ιανουάριο οι τιμές του  $I_a$  κυμαίνονται από 800.8 έως 1601,6  $W/m^2$  ενώ για τον Ιούλιο από 886.4 έως 1772,8  $W/m^2$ . Οπότε τα όρια του  $I_a$  που επιλέχθηκαν αρχικά (900 έως 1350 $W/m^2$ ) βρίσκονται εντός του αναμενόμενου εύρους των πραγματικών τιμών.

Με προσδιορισμένο το εύρος του  $I_a$  και με βήμα τα 50 $W/m^2$  για κάθε τιμή της  $E_{ηλ}$  προσδιορίζονται 10 επιφάνειες  $A_{col}$ . Οπότε συνολικά υπολογίζονται 100 τιμές για το  $A_{col}(m^2)$ . Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

A/A	<b>E<sub>ηλ</sub> 499,55W</b>	<b>E<sub>ηλ</sub> 749,3W</b>	<b>E<sub>ηλ</sub> 999,10W</b>	<b>E<sub>ηλ</sub> 1248,88W</b>	<b>E<sub>ηλ</sub> 1498,66W</b>	<b>E<sub>ηλ</sub> 1748,44W</b>	<b>E<sub>ηλ</sub> 1874,00W</b>	<b>E<sub>ηλ</sub> 2247,99W</b>	<b>E<sub>ηλ</sub> 2497,766W</b>	<b>E<sub>ηλ</sub> 2747,54W</b>
<b>I<sub>a1</sub>=900W/m<sup>2</sup></b>	0,55505	0,83258	1,110118	1,387647893	1,665177472	1,94270705	2,082225307	2,497766207	2,775295786	3,052825
<b>I<sub>a2</sub>=950W/m<sup>2</sup></b>	0,52584	0,78876	1,051691	1,314613793	1,577536552	1,840459311	1,972634502	2,366304828	2,629227587	2,89215
<b>I<sub>a3</sub>=1000W/m<sup>2</sup></b>	0,49955	0,74933	0,999106	1,248883104	1,498659724	1,748436345	1,874002777	2,247989587	2,497766207	2,747543
<b>I<sub>a4</sub>=1050W/m<sup>2</sup></b>	0,47576	0,71364	0,95153	1,18941248	1,427294976	1,665177472	1,784764549	2,140942463	2,378824959	2,616707
<b>I<sub>a5</sub>=1100W/m<sup>2</sup></b>	0,45413	0,68120	0,908279	1,135348276	1,362417931	1,589487586	1,703638888	2,043626897	2,270696552	2,497766
<b>I<sub>a6</sub>=1150W/m<sup>2</sup></b>	0,43439	0,65159	0,868788	1,085985308	1,303182369	1,520379431	1,629567632	1,954773554	2,171970615	2,389168
<b>I<sub>a7</sub>=1200W/m<sup>2</sup></b>	0,41629	0,62444	0,832589	1,04073592	1,248883104	1,457030288	1,56166898	1,873324655	2,081471839	2,289619
<b>I<sub>a8</sub>=1250W/m<sup>2</sup></b>	0,39964	0,59946	0,799285	0,999106483	1,19892778	1,398749076	1,499202221	1,798391669	1,998212966	2,198034
<b>I<sub>a9</sub>=1300W/m<sup>2</sup></b>	0,38427	0,57640	0,768543	0,960679311	1,152815173	1,344951035	1,441540597	1,729222759	1,921358621	2,113494
<b>I<sub>a10</sub>=1350W/m<sup>2</sup></b>	0,37003	0,55505	0,740079	0,925098595	1,110118314	1,295138033	1,388150205	1,665177472	1,850197191	2,035217

**Πίνακας 3.4:** Υπολογισμός της επιφάνειας A<sub>col</sub> (m<sup>2</sup>) για ολόκληρο το εύρος τιμών των παροχών και των ακτινοβολιών.

Στη συνέχεια με γνωστό το  $A_{col}$  για το μήκος του δοθέντος συλλέκτη υπολογίζεται το άνοιγμα  $d$  της παραβολής. Για κάθε άνοιγμα  $d$  υπολογίζεται το εστιακό ύψος  $f$  σύμφωνα με τη σχέση του δευτέρου κεφαλαίου λύνοντας ως προς  $f$  :

$$f = \frac{1}{4 \tan(\Psi_{rim}/2)} * d \quad (3.9)$$

Το  $\Psi_{rim}$  δηλαδή η οριακή γωνία του συλλέκτη μας δίνει την βέλτιστη παραβολή όταν οι τιμές της κυμαίνονται από  $90^\circ$  έως  $98^\circ$ . Για τους υπολογισμούς μας επιλέχθηκε η τιμή των  $96^\circ$ .

Έπειτα από τη σχέση 2.25 υπολογίζεται το  $h$  δηλαδή η μέγιστη κατακόρυφη απόσταση της παραβολής από την αρχή των αξόνων, που δίνεται από τη σχέση :

$$h = \frac{d^2}{16 * f} \quad (3.10)$$

Και στη συνέχεια το μέγεθος  $P$  καθώς και το μήκος τόξου ( $s$ ) της παραβολής αντίστοιχα από τις σχέσεις 2.23 και 2.26 αντίστοιχα.

Τέλος με γνωστό το μήκος τόξου της παραβολής μπορούμε να υπολογίσουμε τη συνολική επιφάνεια του παραβολοειδούς κατόπτρου  $A_s$  όπου :

$$A_s = L * s \quad (3.11)$$

Με αυτόν τρόπο λοιπόν έχουμε προσδιορίσει πλήρως τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κάθε παραβολής για την αντίστοιχη επιφάνεια  $A_{col}$ . Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή της μεθόδου παρουσιάζονται στον πίνακα 3.5 που ακολουθεί.

a/a	I <sub>a1</sub>	I <sub>a2</sub>	I <sub>a3</sub>	I <sub>a4</sub>	I <sub>a5</sub>	I <sub>a6</sub>	I <sub>a7</sub>	I <sub>a8</sub>	I <sub>a9</sub>	I <sub>a10</sub>	
Q <sub>1</sub>	A <sub>col</sub>	0,555059	0,525846	0,499553	0,475764992	0,45413931	0,434394123	0,416294368	0,399642593	0,384271724	0,370039
	d	0,287595	0,272459	0,258836	0,246510358	0,235305342	0,225074675	0,215696564	0,207068701	0,19910452	0,19173
	f	0,064738	0,061331	0,058264	0,055489731	0,05296747	0,050664537	0,048553515	0,046611374	0,044818629	0,043159
	p	0,14459	0,13698	0,130131	0,123934103	0,118300735	0,113157225	0,10844234	0,104104647	0,100100622	0,096393
	h	0,079852	0,075649	0,071867	0,068444372	0,065333264	0,062492688	0,059888826	0,057493273	0,055281993	0,053235
	s	0,338871	0,321036	0,304984	0,290461132	0,277258354	0,265203643	0,254153491	0,243987351	0,234603222	0,225914
	As	0,654022	0,619599	0,588619	0,560589986	0,535108623	0,51184303	0,490516237	0,470895588	0,452784219	0,436014
Q <sub>2</sub>	A <sub>col</sub>	0,832589	0,788768	0,74933	0,713647488	0,681208966	0,651591185	0,624441552	0,59946389	0,576407586	0,555059
	d	0,431393	0,408688	0,388254	0,369765538	0,352958013	0,337612013	0,323544846	0,310603052	0,29865678	0,287595
	f	0,097107	0,091996	0,087396	0,083234596	0,079451206	0,075996805	0,072830272	0,069917061	0,067227943	0,064738
	p	0,216885	0,20547	0,195196	0,185901155	0,177451102	0,169735837	0,16266351	0,15615697	0,150150933	0,14459
	h	0,119778	0,113474	0,1078	0,102666558	0,097999897	0,093739032	0,089833239	0,086239909	0,08292299	0,079852
	s	0,508307	0,481554	0,457476	0,435691699	0,41588753	0,397805464	0,381230236	0,365981027	0,351904833	0,338871
	As	0,981032	0,929399	0,882929	0,840884978	0,802662934	0,767764545	0,735774356	0,706343382	0,679176329	0,654022
Q <sub>3</sub>	A <sub>col</sub>	1,110118	1,051691	0,999106	0,951529984	0,908278621	0,868788246	0,832588736	0,799285186	0,768543448	0,740079
	d	0,575191	0,544918	0,517672	0,493020717	0,470610684	0,45014935	0,431393127	0,414137402	0,398209041	0,383461
	f	0,129476	0,122662	0,116528	0,110979462	0,105934941	0,101329074	0,097107029	0,093222748	0,089637258	0,086317
	p	0,28918	0,27396	0,260262	0,247868206	0,23660147	0,226314449	0,216884681	0,208209293	0,200201244	0,192786

	h	0,159704	0,151298	0,143733	0,136888745	0,130666529	0,124985375	0,119777652	0,114986545	0,110563986	0,106469
	s	0,677743	0,642072	0,609968	0,580922265	0,554516707	0,530407285	0,508306982	0,487974702	0,469206445	0,451828
	As	1,308043	1,239199	1,177239	1,121179971	1,070217245	1,023686061	0,981032475	0,941791176	0,905568438	0,872029
Q <sub>4</sub>	A <sub>col</sub>	1,387648	1,314614	1,248883	1,18941248	1,135348276	1,085985308	1,04073592	0,999106483	0,960679311	0,925099
	d	0,718989	0,681147	0,64709	0,616275896	0,588263355	0,562686688	0,539241409	0,517671753	0,497761301	0,479326
	f	0,161845	0,153327	0,145661	0,138724327	0,132418676	0,126661342	0,121383786	0,116528435	0,112046572	0,107897
	p	0,361474	0,342449	0,325327	0,309835258	0,295751837	0,282893062	0,271105851	0,260261617	0,250251555	0,240983
	h	0,199629	0,189123	0,179666	0,171110931	0,163333161	0,156231719	0,149722064	0,143733182	0,138204983	0,133086
	s	0,847178	0,80259	0,76246		0,693145884	0,663009107	0,635383727	0,609968378	0,586508056	0,564786
	As	1,635054	1,548999	1,471549		1,337771556	1,279607576	1,226290593	1,17723897	1,131960548	1,090036
Q <sub>5</sub>	A <sub>col</sub>	1,665177	1,577537	1,49866	1,427294976	1,362417931	1,303182369	1,248883104	1,19892778	1,152815173	1,110118
	d	0,862786	0,817376	0,776508	0,739531075	0,705916027	0,675224025	0,647089691	0,621206103	0,597313561	0,575191
	f	0,194214	0,183992	0,174793	0,166469193	0,158902411	0,151993611	0,145660544	0,139834122	0,134455886	0,129476
	p	0,433769	0,410939	0,390392	0,37180231	0,354902205	0,339471674	0,325327021	0,31231394	0,300301866	0,28918
	h	0,239555	0,226947	0,2156	0,205333117	0,195999793	0,187478063	0,179666477	0,172479818	0,165845979	0,159704
	s	1,016614	0,963108	0,914953	0,871383397	0,831775061	0,795610928	0,762460473	0,731962054	0,703809667	0,677743
	As	1,962065	1,858798	1,765858	1,681769957	1,605325868	1,535529091	1,471548712	1,412686764	1,358352657	1,308043
Q <sub>6</sub>	A <sub>col</sub>	1,942707	1,840459	1,748436	1,665177472	1,589487586	1,520379431	1,457030288	1,398749076	1,344951035	1,295138
	d	1,006584	0,953606	0,905926	0,862786255	0,823568698	0,787761363	0,754937973	0,724740454	0,696865821	0,671056



	f	0,226583	0,214658	0,203925	0,194214058	0,185386147	0,177325879	0,169937301	0,163139809	0,156865201	0,151055
	p	0,506064	0,479429	0,455458	0,433769361	0,414052572	0,396050286	0,379548191	0,364366263	0,350352176	0,337376
	h	0,279481	0,264772	0,251533	0,239555303	0,228666426	0,218724407	0,20961089	0,201226455	0,193486976	0,186321
	s	1,18605	1,123626	1,067445	1,016613963	0,970404238	0,928212749	0,889537218	0,853955729	0,821111278	0,7907
	As	2,289076	2,168598	2,060168	1,962064949	1,872880179	1,791450606	1,716806831	1,648134558	1,584744767	1,526051
Q7	A <sub>col</sub>	2,082225	1,972635	1,874003	1,784764549	1,703638888	1,629567632	1,56166898	1,499202221	1,441540597	1,38815
	d	1,078873	1,02209	0,970986	0,924748471	0,88271445	0,844335561	0,809154912	0,776788716	0,746912227	0,719249
	f	0,242855	0,230074	0,21857	0,208161816	0,198699915	0,190060788	0,182141589	0,174855925	0,168130697	0,161904
	p	0,542408	0,51386	0,488167	0,464921122	0,443788344	0,424493198	0,406805982	0,390533743	0,375513214	0,361605
	h	0,299553	0,283787	0,269597	0,256759306	0,245088429	0,23443241	0,224664393	0,215677817	0,207382517	0,199702
	s	1,271227	1,204321	1,144105	1,089623534	1,040095192	0,994873662	0,953420593	0,915283769	0,880080547	0,847485
	As	2,453469	2,324339	2,208122	2,102973422	2,007383721	1,920106167	1,840101744	1,766497674	1,698555456	1,635646
Q8	A <sub>col</sub>	2,497766	2,366305	2,24799	2,140942463	2,043626897	1,954773554	1,873324655	1,798391669	1,729222759	1,665177
	d	1,294179	1,226065	1,164761	1,109296613	1,05887404	1,012836038	0,970634537	0,931809155	0,895970341	0,862786
	f	0,291321	0,275988	0,262189	0,249703789	0,238353617	0,227990416	0,218490816	0,209751183	0,20168383	0,194214
	p	0,650654	0,616409	0,585589	0,557703465	0,532353307	0,509207511	0,487990531	0,46847091	0,450452798	0,433769
	h	0,359333	0,340421	0,3234	0,307999675	0,29399969	0,281217095	0,269499716	0,258719727	0,248768969	0,239555
	s	1,524921	1,444662	1,372429	1,307075096	1,247662591	1,193416392	1,143690709	1,097943081	1,0557145	1,016614
	As	2,943097	2,788198	2,648788	2,522654935	2,407988802	2,303293636	2,207323068	2,119030145	2,037528986	1,962065
Q9	A <sub>col</sub>	2,775296	2,629228	2,497766	2,378824959	2,270696552	2,171970615	2,081471839	1,998212966	1,921358621	1,850197

	d	1,437977	1,362294	1,294179	1,232551792	1,176526711	1,125373376	1,078482818	1,035343506	0,995522602	0,958651
	f	0,32369	0,306654	0,291321	0,277448655	0,264837352	0,253322685	0,242767573	0,23305687	0,224093144	0,215793
	p	0,722949	0,684899	0,650654	0,619670516	0,591503674	0,565786123	0,542211702	0,520523234	0,500503109	0,481966
	h	0,399259	0,378245	0,359333	0,342221861	0,326666322	0,312463439	0,299444129	0,287466364	0,276409965	0,266173
	s	1,694357	1,60518	1,524921	1,452305662	1,386291768	1,326018213	1,270767454	1,219936756	1,173016112	1,129571
	As	3,270108	3,097997	2,943097	2,802949928	2,675543113	2,559215151	2,452581187	2,354477939	2,263921095	2,180072
Q <sub>10</sub>	A <sub>col</sub>	3,052825	2,89215	2,747543	2,616707455	2,497766207	2,389167677	2,289619023	2,198034262	2,113494483	2,035217
	d	1,581775	1,498523	1,423597	1,355806972	1,294179382	1,237910713	1,1863311	1,138877856	1,095074862	1,054517
	f	0,356059	0,337319	0,320453	0,30519352	0,291321087	0,278654953	0,26704433	0,256362557	0,246502459	0,237373
	p	0,795244	0,753389	0,715719	0,681637568	0,650654042	0,622364736	0,596432872	0,572575557	0,55055342	0,530163
	h	0,439185	0,41607	0,395266	0,376444048	0,359332955	0,343709783	0,329388542	0,316213	0,304050962	0,29279
	s	1,863792	1,765698	1,677413	1,597536228	1,524920945	1,458620034	1,3978442	1,341930432	1,290317723	1,242528
	As	3,597119	3,407797	3,237407	3,083244921	2,943097424	2,815136667	2,697839305	2,589925733	2,490313205	2,398079

**Πίνακας 3.5:** Υπολογισμός γεωμετρικών χαρακτηριστικών κατόπτρων για όλο το εύρος τιμών της ηλιακής ακτινοβολίας και της παροχής.

### 3.1.1 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΤΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ

Προκειμένου να γίνει ο υπολογισμός των θερμικών απωλειών θα πρέπει να υπολογιστεί η θερμοκρασία του απορροφητή  $T_r$ . Ο απορροφητής όπως και ο εξωτερικός σωλήνας του νερού θεωρούνται λεπτότοιχοι. Η θερμότητα μεταφέρεται με αγωγή από το τοίχωμα του απορροφητή στην εξωτερική επιφάνεια του σωλήνα του ζεστού νερού, από εκεί με αγωγή στο εσωτερικό του τοίχωμα. Από εκεί ένα ποσό θερμότητας ζεσταίνει το νερό που κινείται στον εξωτερικό σωλήνα μέσω συναγωγής και ένα ποσό με συναγωγή από το νερό καταλήγει στον αγωγό του κρύου νερού, όπου από εκεί αντίστοιχα με αγωγή και συναγωγή καταλήγει να θερμάνει το νερό που εισέρχεται από το δίκτυο μέχρι την θερμοκρασία των  $45^\circ\text{C}$ . Άρα με βάση τα παραπάνω και με την παραδοχή των λεπτών τοιχωμάτων των αγωγών, προκύπτει ότι:

$$Q_u = h_w * A * (T_r - T_{fm}) \quad (3.12)$$

Όπου

$h_w$ : ο συντελεστής συναγωγής του νερού ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ )

$A$ : η διατομή του εξωτερικού σωλήνα του νερού

$T_r$ : η θερμοκρασία του απορροφητή

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

Οπότε λύνοντας ως προς  $T_r$  προκύπτει ότι :

$$T_r = T_{fm} + \frac{Q_u}{h_w * A} \quad (3.13)$$

Όπου η διατομή υπολογίζεται με βάση την υδραυλική διάμετρο δηλαδή

$$A = \pi * D_{2,h} * L \quad (3.14)$$

με την υδραυλική διάμετρο εξορισμού να προκύπτει από

$$D_{2,h} = D_{2,in} - D_{1,out} = 10 - 6 = 4\text{mm} = 0.004\text{m} \quad (3.15)$$

Ενώ ο συντελεστής συναγωγής προκύπτει από την :

$$h_w = \frac{Nu * k_w}{D_{2,h}} \quad (3.16)$$

Όπου ο  $Nu=4.36$  επειδή θεωρήσαμε ομοιόμορφη και σταθερή ροή θερμότητας [5] και

$k_w$  ο συντελεστής αγωγής για τη μέση θερμοκρασία του νερού  $\frac{(80+10)}{2} = 45^\circ\text{C}$  η τιμή του οποίου προκύπτει ίση με  $0,634 \text{ W/mK}$ .

Έτσι από την σχέση 3.16 υπολογίζεται το  $h_w = 691.06 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Θεωρώντας λοιπόν το  $Q_u = 1155 \text{ Watt}$ , ποσό θερμότητας που αντιστοιχεί στην παροχή  $Q_4 = 0.0143 \text{ m}^3/\text{h}$  προκύπτει ότι έχουμε  $T_r = 113.91^\circ\text{C}$  ή  $386,9\text{K}$ .

Με γνωστή την θερμοκρασία του απορροφητή θα κάνουμε χρήση των σχέσεων 2.11.1-2.13 για τον υπολογισμό των απωλειών  $Q_{\text{loss}}$ . Η μέθοδος εργασίας είναι η εξής:

Αρχικά υποθέτουμε μια θερμοκρασία περιβάλλοντος στην οποία θα λειτουργεί ο συλλέκτης μας. Στη συνέχεια υποθέτουμε τη θερμοκρασία που θα έχει το εξωτερικό τοίχωμα του γυάλινου σωλήνα  $T_{co}$ . Από την σχέση 2.13 υπολογίζουμε το ποσό των απωλειών. Με γνωστές πλέον τις απώλειες από τη σχέση 2.11.2 υπολογίζεται η θερμοκρασία του εσωτερικού τοιχώματος του γυαλιού  $T_{ci}$ . Έπειτα από την σχέση 2.11.1 υπολογίζεται ξανά το  $Q_{\text{loss}}$ . Αν τα δύο ποσά που έχουν προκύψει από τις 2.13 και 2.11.1 ταυτίζονται τότε η υπόθεση του  $T_{co}$  ήταν σωστή και έχει υπολογιστεί το  $Q_{\text{loss}}$ . Εάν δεν ταυτίζονται τότε υποθέτουμε μια καινούργια τιμή για το  $T_{co}$  και επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία μέχρι να έχουμε σύγκλιση. Για λόγους πληρότητας ξαναδίνονται οι σχέσεις 2.1.11 έως 2.13.

$$Q_{\text{loss}} = \frac{2\pi k_{\text{eff}} * L}{\ln\left(\frac{D_{ci}}{D_r}\right)} * (T_r - T_{ci}) + \frac{\pi D_r * L * \sigma * (T_r^4 - T_{ci}^4)}{1/\varepsilon_r + \frac{1-\varepsilon_c}{\varepsilon_c} * \left(\frac{D_r}{D_{ci}}\right)}$$

$$Q_{\text{loss}} = \frac{2\pi k_c * L * (T_{ci} - T_{co})}{\ln\left(\frac{D_{co}}{D_{ci}}\right)}$$

$$Q_{\text{loss}} = \pi D_{co} * L * h_w * (T_{co} - T_a) + \varepsilon_c * \pi * D_{co} * L * \sigma * (T_{co}^4 - T_a^4)$$

Για το  $Q_u$  που υποθέσαμε για θερμοκρασία περιβάλλοντος  $T_a = 10^\circ\text{C}$  ακολουθούμε την παρακάτω διαδικασία: Αρχικά υποθέτουμε μια θερμοκρασία για το εξωτερικό τοίχωμα του γυάλινου σωλήνα  $T_{co} = 15^\circ\text{C}$ . Για να κάνουμε χρήση της σχέσης 2.13 θα πρέπει να υπολογιστεί ο συντελεστής συναγωγής  $h_w$ . Η θερμοκρασία υπολογισμού του παραπάνω συντελεστή είναι η μέση τιμή της θερμοκρασίας του ατμοσφαιρικού αέρα και της εξωτερικής επιφάνειας του γυαλιού, δηλαδή η  $T_m = \frac{(10+15)}{2} = 12.5^\circ\text{C}$  ή  $285,5\text{K}$ .

Η εξίσωση που μας δίνει το  $h_w$  είναι η:

$$h_w = \frac{Nu * k}{D_{co}} \tag{3.17}$$

Όπου το  $k$  είναι ο συντελεστής αγωγής ο οποίος εξαρτάται από τη θερμοκρασία σύμφωνα με τη σχέση :

$$k=1.52*10^{-11} *T^3 -4.8574*10^{-8}*T^2 + 1.018*10^{-4}*T-3.993*10^{-4} \quad (3.18)$$

ενώ ο αριθμός Nusselt στην περίπτωση του αέρα δίνεται από τη σχέση:

$$Nu = \begin{cases} 0.4 + 0.54*Re^{0.52} & \text{για } 0.1 < Re < 1000 \\ 0.3*Re^{0.6} & \text{για } 1000 < Re < 10.000 \end{cases} \quad (3.19)$$

Με τον αριθμό Reynolds (Re) να δίνεται από τη σχέση:

$$Re = \frac{\rho * V * D_{co}}{\mu} \quad (3.20)$$

Όπου

$\rho$ : η πυκνότητα του αέρα

$V$ : η ταχύτητα του αέρα και

$\mu$ : η δυναμική συνεκτικότητα του αέρα.

Τα παραπάνω μεγέθη της δυναμικής συνεκτικότητας και της πυκνότητας παρουσιάζουν θερμοκρασιακή εξάρτηση σύμφωνα με τις σχέσεις :

$$\rho = 360,77819 * T^{-1,00336} \quad (3.21)$$

και

$$\mu = \mu_o * \left( \frac{T}{T_o} \right)^{1,5} * \left( \frac{T_o + 198,72}{T + 198,72} \right) \quad (3.22)$$

Όπου το  $\mu_o = 3,62 * 10^{-7} \text{ lb-s/ft}^2$  και  $T_o = 518,7 \text{ }^\circ\text{R}$ .

Η σχέση 3.17 μπορεί να γραφεί και ως :

$$h_w = \frac{k}{D_{co}} * 0.3 * \left( \frac{\rho * V * D_{co}}{\mu} \right)^{0,6} \quad (3.23)$$

Οπότε για μέση θερμοκρασία  $T_m = 285.5\text{K}$  και ταχύτητα αέρα  $V = 1\text{m/sec}$  προκύπτει ότι  $h_w = 15,39709 \text{ W/m}^2\text{k}$ .

Έτσι λοιπόν από τη σχέση 2.13, για μήκος συλλέκτη  $L=1.93\text{m}$ , εξωτερική διάμετρο γυάλινου σωλήνα  $D_{co}=0.102\text{m}$  και συντελεστή εκπομπής  $\epsilon_c=0.91$ , προκύπτει  $Q_{loss}=61.97\text{Watt}$ . Αντικαθιστώντας στη σχέση 2.11.2, λαμβάνοντας ως συντελεστή αγωγής

$k_{cgl\text{aass}}=1.2\text{W/Mk}$  για το Borocilicate Glass της διάταξής μας, έχουμε ότι  $T_{ci}=288,24\text{K}$  και από τη σχέση 2.11.2 προκύπτει ότι  $Q_{loss}=12,31\text{Watt}$ . Δηλαδή τα δύο μεγέθη δεν ταυτίζονται άρα απαιτείται η υπόθεση διαφορετικής θερμοκρασίας  $T_{co}$  μέχρι τη σύγκλιση τους. Τα αποτελέσματα της επαναληπτικής διαδικασίας δίνονται στον πίνακα που ακολουθεί:

2 <sup>η</sup> Επανάληψη	3 <sup>η</sup> Επανάληψη	4 <sup>η</sup> Επανάληψη
Υπόθεση $T_{co}=13^\circ\text{C}$	Υπόθεση $T_{co}=12^\circ\text{C}$	Υπόθεση $T_{co}=11^\circ\text{C}$
$T_m=284,5\text{K}$	$T_m=284\text{K}$	$T_m=283.5\text{K}$
$h_w=15,407\text{W/m}^2\text{K}$	$h_w=15,4112\text{W/m}^2\text{K}$	$h_w=15,417\text{W/m}^2\text{K}$
$Q_{loss}=37,11\text{Watt}$	$Q_{loss}=24.72\text{Watt}$	$Q_{loss}=12,34\text{Watt}$
$T_{ci}=286,14\text{K}$	$T_{ci}=285,1\text{K}$	$T_{ci}=284,05\text{K}$
$Q_{loss}=12.46657$	$Q_{loss}=12.54\text{Watt}$	$Q_{loss}=12.42\text{Watt}$

**Πίνακας 3.6:** Αποτελέσματα επαναληπτικής διαδικασίας

Έτσι όπως φαίνεται από τον πίνακα 3.6 η σύγκλιση της μεθόδου γίνεται για  $T_{co}=11^\circ\text{C}$  και οι απώλειες του συλλέκτη είναι περίπου  $12,4\text{Watt}$ , δηλαδή σε σχέση με την ωφέλιμη ισχύ είναι σε ποσοστό περίπου  $\frac{12,44}{1155} = 1,1\%$ . Δηλαδή  $Q_{loss}=1.1\% * Q_u$ .

Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και για  $T_a=25^\circ\text{C}$  (298K). Τα αποτελέσματα της επαναληπτικής διαδικασίας παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

1 <sup>η</sup> Επανάληψη	2 <sup>η</sup> Επανάληψη	3 <sup>η</sup> Επανάληψη	4 <sup>η</sup> Επανάληψη
Υπόθεση $T_{co}=30^\circ\text{C}$	Υπόθεση $T_{co}=26^\circ\text{C}$	Υπόθεση $T_{co}=25,8^\circ\text{C}$	Υπόθεση $T_{co}=25,9^\circ\text{C}$
$T_m=300,5\text{K}$	$T_m=298,5\text{K}$	$T_m=298.4\text{K}$	$T_m=298,45\text{K}$
$h_w=15,244\text{W/m}^2\text{K}$	$h_w=15,271\text{W/m}^2\text{K}$	$h_w=15,2737\text{W/m}^2\text{K}$	$h_w=15,2737\text{W/m}^2\text{K}$
$Q_{loss}=63,91\text{Watt}$	$Q_{loss}=12,78\text{Watt}$	$Q_{loss}=10,18\text{Watt}$	$Q_{loss}=11,45\text{Watt}$
$T_{ci}=303,24\text{K}$	$T_{ci}=299,05\text{K}$	$T_{ci}=298,84\text{K}$	$T_{ci}=298,94\text{K}$
$Q_{loss}=11,075\text{Watt}$	$Q_{loss}=11.43\text{Watt}$	$Q_{loss}=11.45\text{Watt}$	$Q_{loss}=11.45\text{Watt}$

**Πίνακας 3.7:** Αποτελέσματα επαναληπτικής διαδικασίας

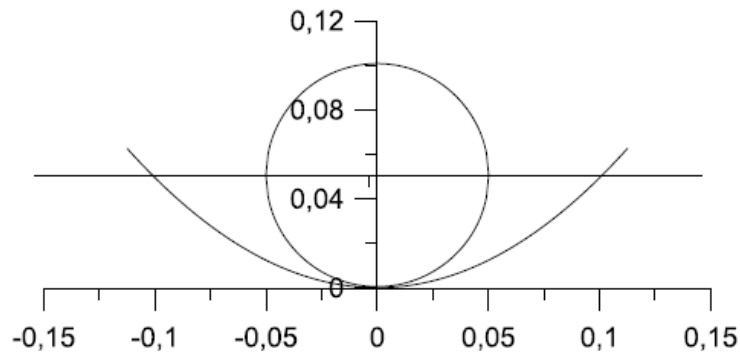
Όπου βλέπουμε ότι για το δεδομένο  $Q_u$  και θερμοκρασία περιβάλλοντος  $25^{\circ}\text{C}$  οι απώλειες που εμφανίζει ο συλλέκτης είναι  $11,45\text{Watt}$  δηλαδή περίπου το  $1,1\%$  της συνολικής ωφέλιμης θερμότητας που προσδίδεται στο ρευστό.

Συνεπώς η παραδοχή πως οι συνολικές απώλειες του συστήματος ανέρχονται στο  $7,5\%$  της ωφέλιμης ηλιακής ακτινοβολίας δικαιολογείται πλήρως και μάλιστα υπερεκτιμήθηκε το ποσοστό προκειμένου να εξαλείφει το περιθώριο λάθους στην εκλογή και κατασκευή του κατόπτρου.

### 3.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

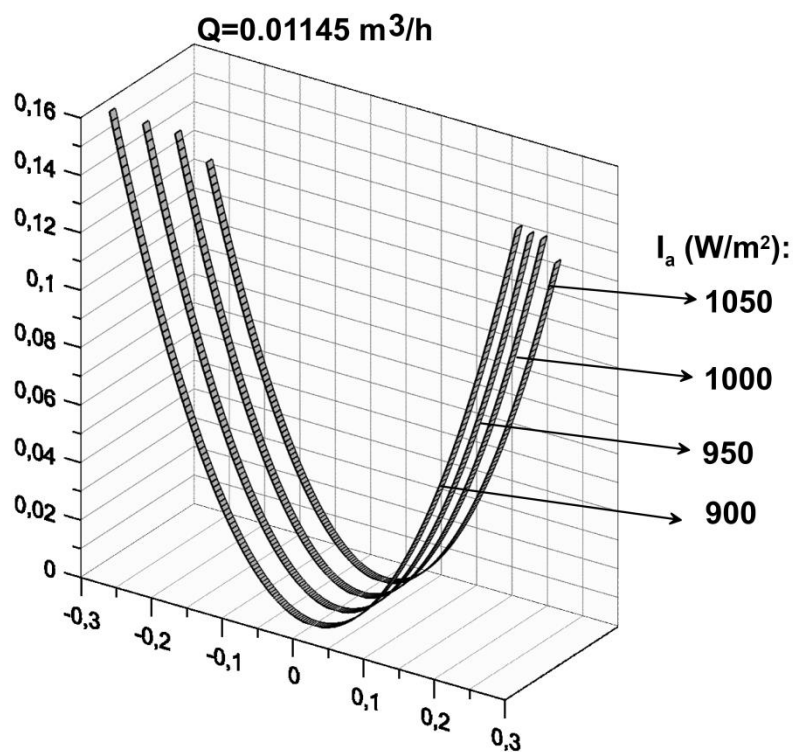
Τα αποτελέσματα που πήραμε από την εφαρμογή της μεθόδου της ανάλυσης για την διάταξη του συγκεντρωτικού συλλέκτη θα πρέπει να επεξεργαστούν προκειμένου να εξάγουμε κάποια συμπεράσματα σχετικά με την συμπεριφορά του συστήματος αλλά και να γίνει ο προσδιορισμός του εργονομικού κατόπτρου το οποίο τελικά θα κατασκευαστεί.

Αρχικά στον πίνακα 3.5 υπάρχουν τιμές οι οποίες σημειώνονται με κόκκινο χρώμα. Οι τιμές αυτές αντιστοιχούν σε παραβολές τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των οποίων δεν είναι σύμφωνα με τον υπάρχων συλλέκτη. Για παράδειγμα για την παροχή  $Q_2$  και για άμεση ηλιακή ακτινοβολία  $I_{a6}=1150\text{W}/\text{m}^2$  το  $f$ , δηλαδή η εστιακή απόσταση, είναι ίση με  $0,0506\text{m}$ , το οποίο σημαίνει ότι η εστιακή απόσταση από την κορυφή της παραβολής θα είναι  $0,0506\text{m}$ . Στην εστιακή απόσταση θα τοποθετηθεί όμως ο συλλέκτης ο οποίος έχει εξωτερική διάμετρο  $0,102\text{m}$ , δηλαδή ακτίνα  $0,0501\text{m}$  το οποίο σημαίνει πως αν κατασκευαστεί το συγκεκριμένο κάτοπτρο η απόσταση του συλλέκτη από το κάτοπτρο θα είναι  $0,0005\text{m}$ . Ουσιαστικά κάτοπτρο και συλλέκτης σχεδόν θα εφάπτονταν, χωρίς να υπάρχει διαθέσιμος χώρος για την συγκέντρωση της ακτινοβολίας ενώ στην κάτω πλευρά του συλλέκτη θα αναπτύσσονται πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Συνεπώς ορίστηκε ως ελάχιστη αποδεκτή, εστιακή απόσταση, ίση τουλάχιστον με την εξωτερική διάμετρο του συλλέκτη. Ο παραπάνω σχεδιασμός δίνεται στην εικόνα που ακολουθεί.



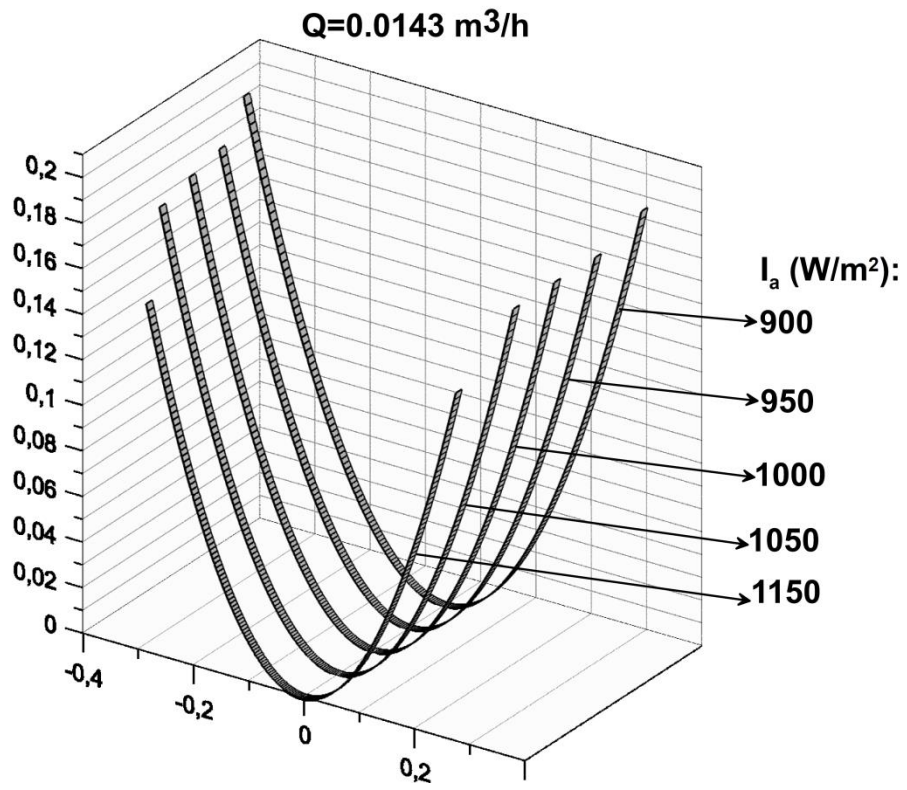
Εικόνα 3.3: Σχεδιασμός κατόπτρου συλλέκτη για πολύ μικρή διαφορά εστιακής απόστασης και εξωτερικής διαμέτρου γυάλινου σωλήνα του συλλέκτη.

Στη συνέχεια με τη χρήση του λογισμικού Grapher8 κατασκευάστηκαν οι παραβολές για κάθε παροχή ξεχωριστά που δίνονται στο πίνακα 3.5 με πράσινο χρώμα, για διάφορες τιμές της ακτινοβολίας αλλά με σταθερή την τιμή της παροχής. Τα διαγράμματα παρουσιάζονται αναλυτικά στη συνέχεια :

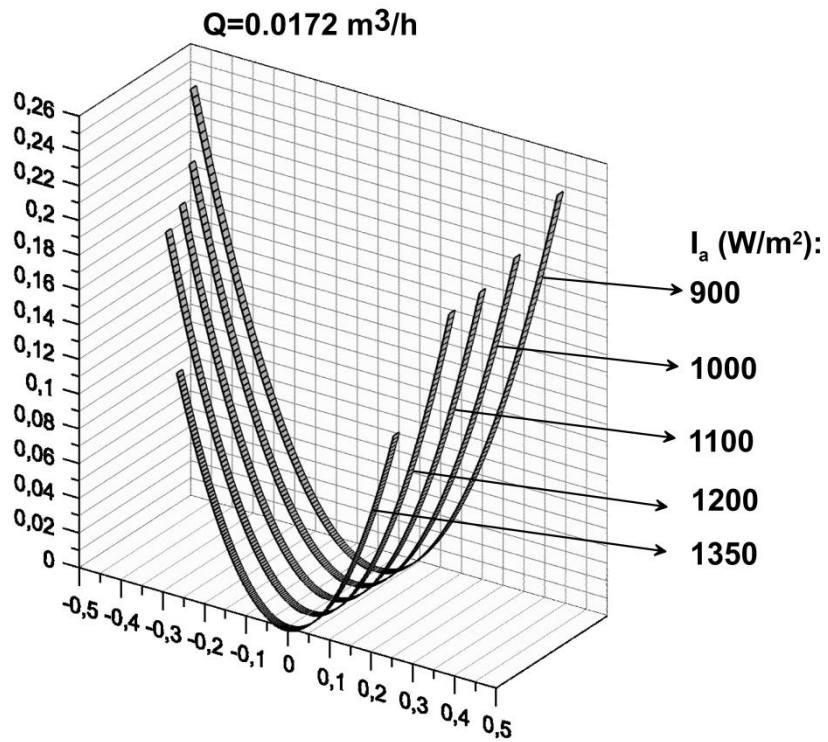


Εικόνα 3.4: Παραβολές που αντιστοιχούν στην παροχή  $Q_2$  για διάφορες τιμές της ακτινοβολίας

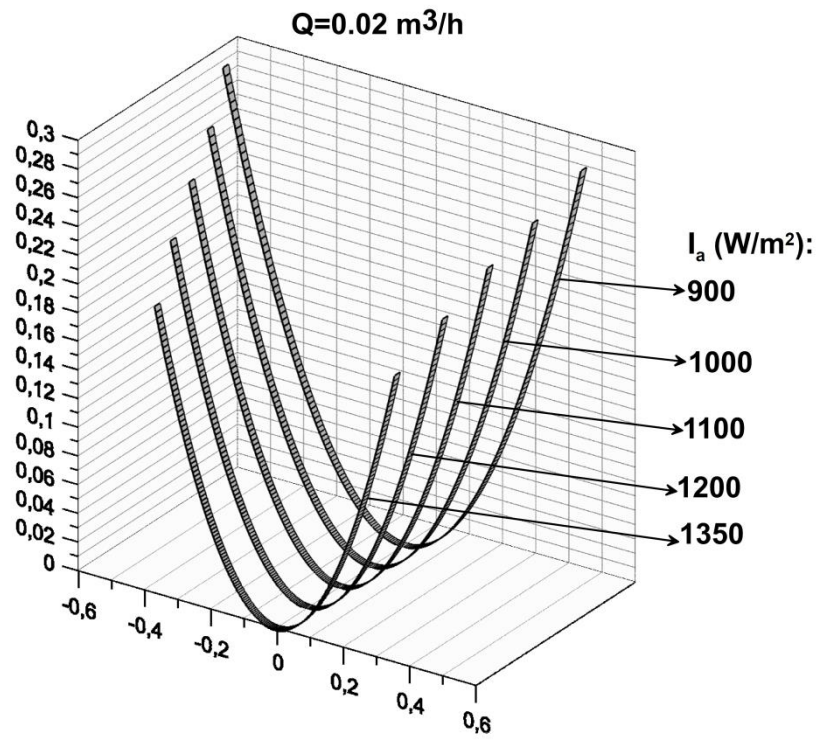




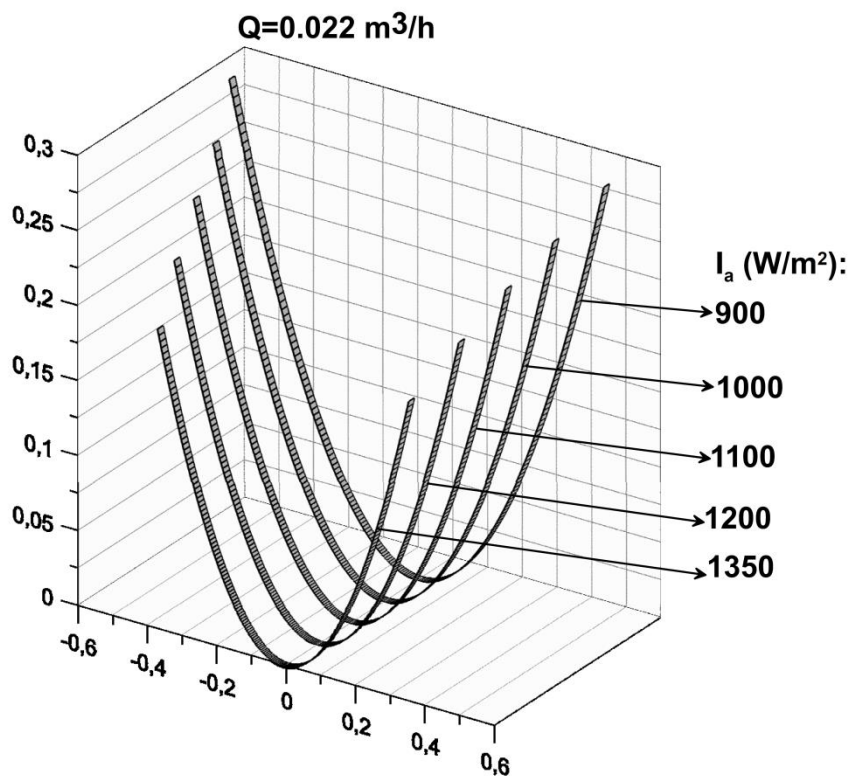
Εικόνα 3.5: Παραβολές που αντιστοιχούν στην παροχή Q<sub>4</sub> για διάφορες τιμές της ακτινοβολίας



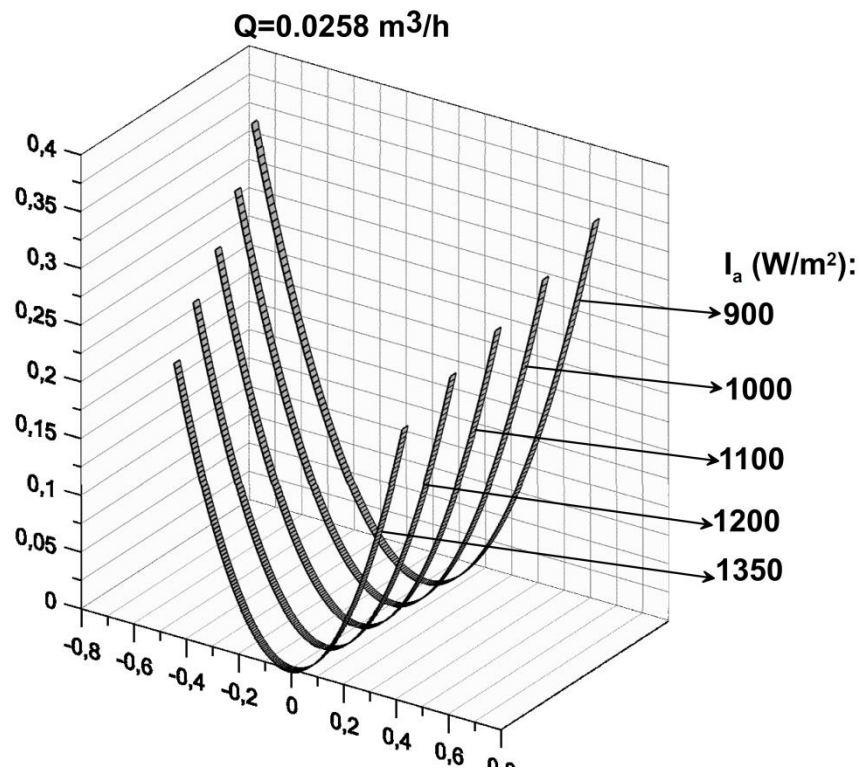
Εικόνα 3.6: Παραβολές που αντιστοιχούν στην παροχή Q<sub>5</sub> για διάφορες τιμές της ακτινοβολίας



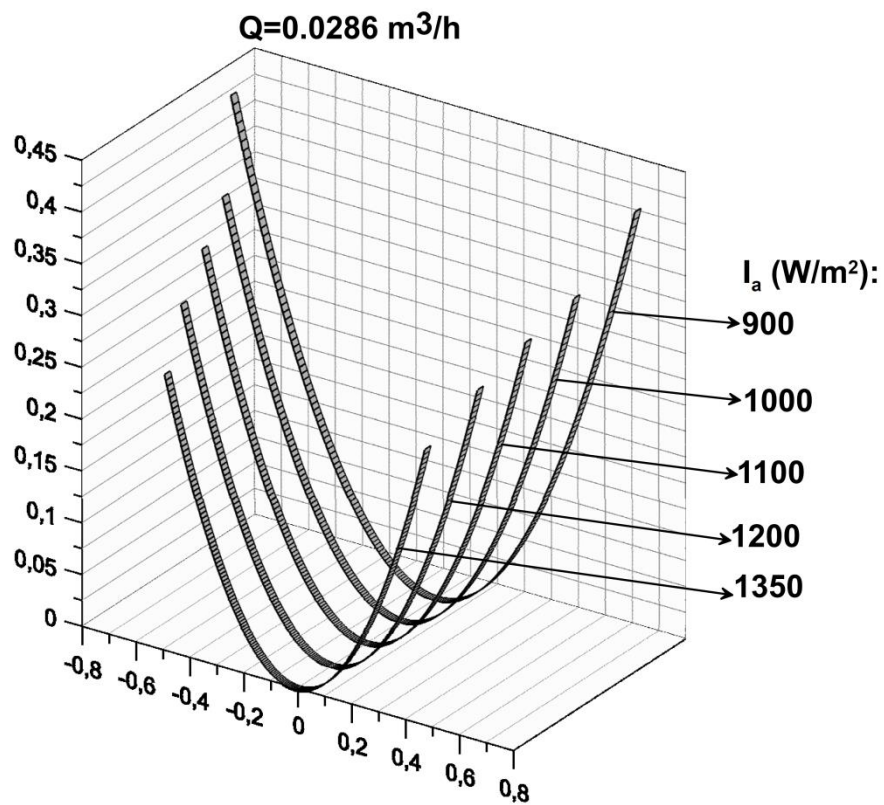
Εικόνα 3.7: Παραβολές που αντιστοιχούν στην παροχή Q<sub>6</sub> για διάφορες τιμές της ακτινοβολίας



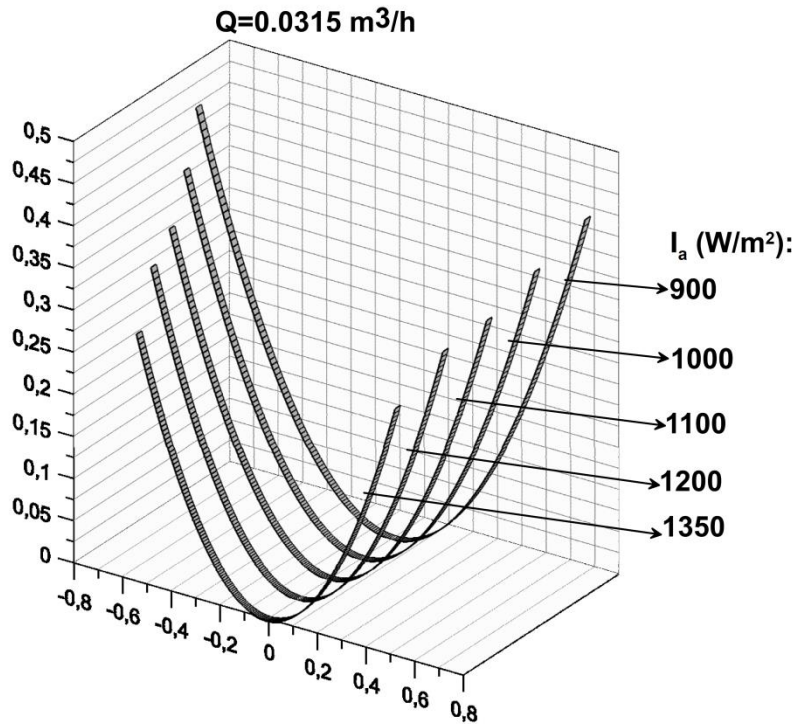
Εικόνα 3.8: Παραβολές που αντιστοιχούν στην παροχή Q<sub>7</sub> για διάφορες τιμές της ακτινοβολίας



Εικόνα 3.9: Παραβολές που αντιστοιχούν στην παροχή  $Q_8$  για διάφορες τιμές της ακτινοβολίας



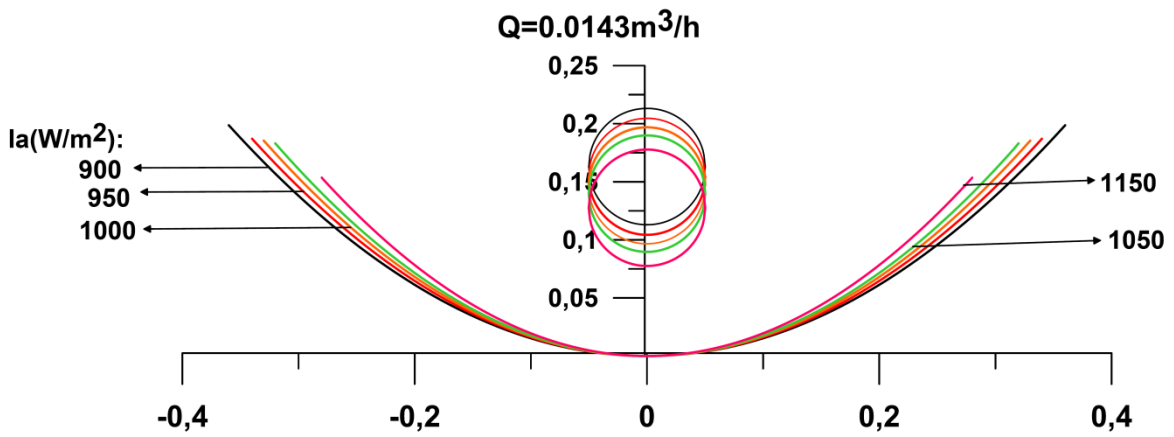
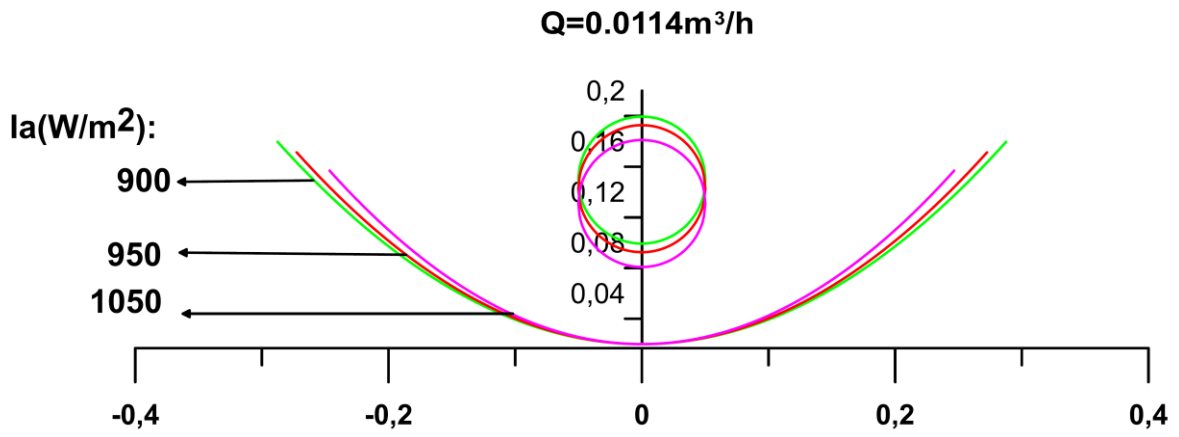
Εικόνα 3.10: Παραβολές που αντιστοιχούν στην παροχή  $Q_9$  για διάφορες τιμές της ακτινοβολίας



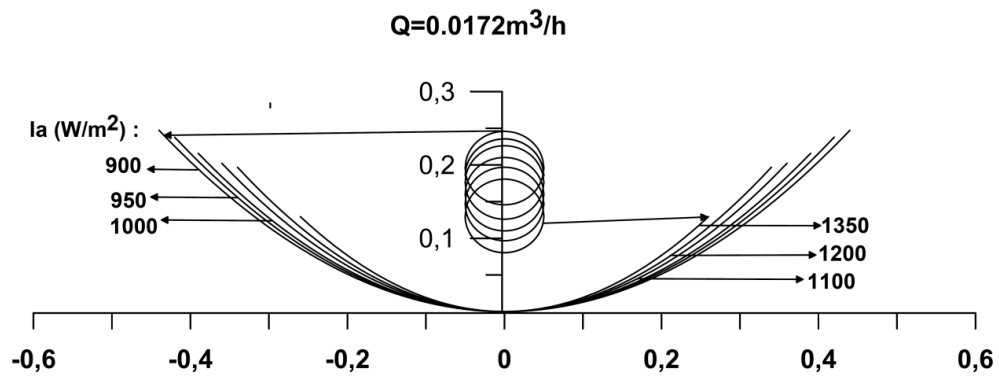
Εικόνα 3.11: Παραβολές που αντιστοιχούν στην παροχή  $Q_{10}$  για διάφορες τιμές της ακτινοβολίας

Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει ότι με την αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας για δεδομένη παροχή έχουμε μείωση του ανοίγματος της παραβολής  $d$  καθώς και μείωση του  $r$  που είναι η απόσταση από την εστία έως το άκρο της παραβολής. Δηλαδή ουσιαστικά καθώς η ακτινοβολία αυξάνεται μειώνεται και το άνοιγμα αλλά και το ύψος της παραβολής. Αυτό διότι με βάση τον θερμοκρασιακό περιορισμό που έχουμε αν η γεωμετρία του κατόπτρου παρέμενε η ίδια τότε καθώς το μεταβιβαζόμενο ποσό θερμότητας που απορροφάται από την ηλιακή ακτινοβολία αυξανόταν θα είχαμε επίτευξη μεγαλύτερης θερμοκρασιακής διαφοράς.

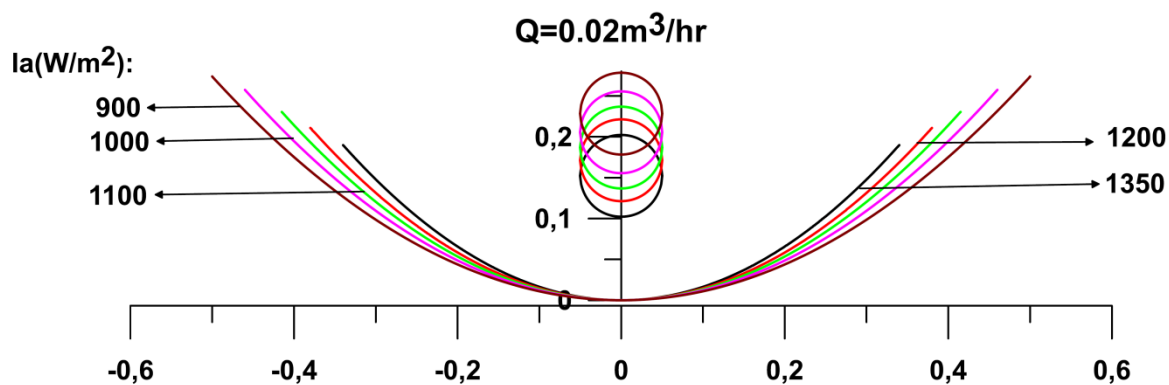
Στη συνέχεια με τη χρήση του Grapher έγινε μια 2-d απεικόνιση των κατόπτρων ανά παροχή τοποθετώντας και τον σωλήνα του συλλέκτη προκειμένου να έχουμε μια πιο ρεαλιστική εικόνα για τη διάταξη.



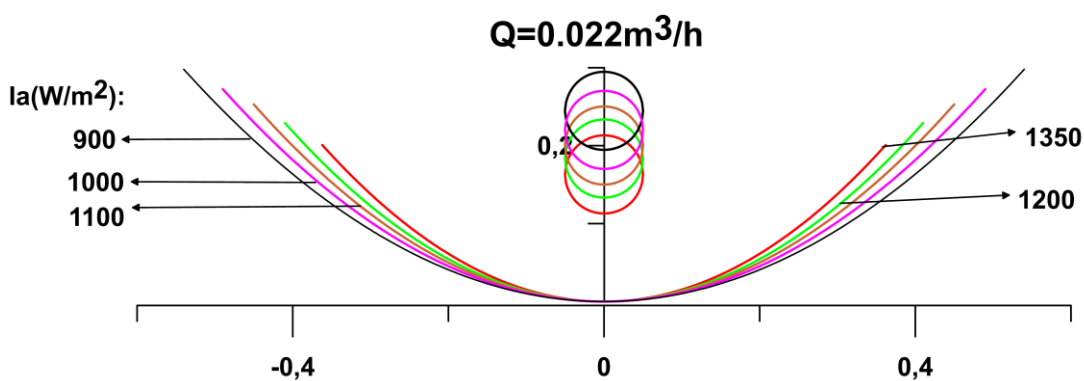
**Εικόνα 3.12a,b:** Παραβολές με την αντίστοιχη εστιακή απόσταση που αντιστοιχούν στην παροχή  $Q_3$  και  $Q_4$  για διάφορες τιμές της ακτινοβολίας. Στο σχήμα σημειώνονται με διαφορετικό χρώμα οι παραβολές και οι αντίστοιχες θέσεις τοποθέτησης του συλλέκτη για μεγαλύτερη ευκολία ανάγνωσης.



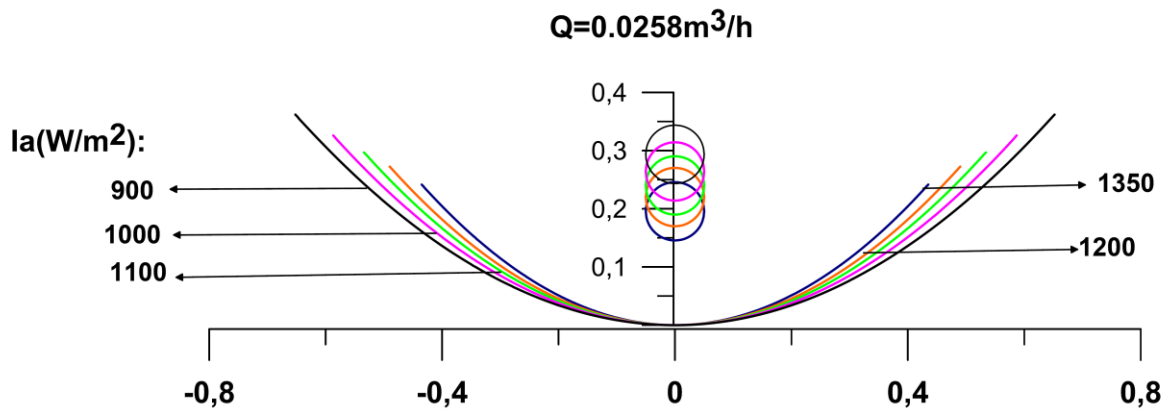
**Εικόνα 3.13:** Παραβολές με την αντίστοιχη εστιακή απόσταση που αντιστοιχούν στην παροχή  $Q_5$  για διάφορες τιμές της ακτινοβολίας. Στο σχήμα σημειώνονται οι θέσεις της εστιακής απόστασης για τις δύο ακραίες τιμές της ακτινοβολίας.



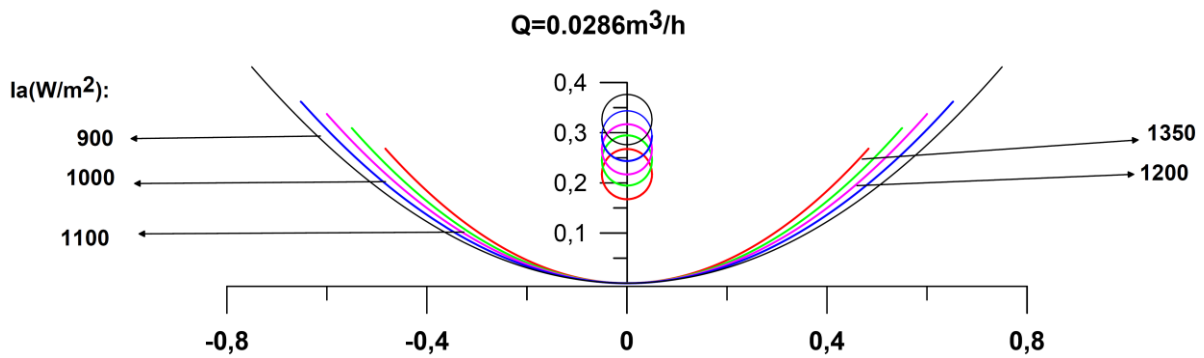
**Εικόνα 3.14:** Παραβολές με την αντίστοιχη εστιακή απόσταση που αντιστοιχούν στην παροχή  $Q_6$  για διάφορες τιμές της ακτινοβολίας. Στο σχήμα σημειώνονται με διαφορετικό χρώμα οι παραβολές και οι αντίστοιχες θέσεις τοποθέτησης του συλλέκτη για μεγαλύτερη ευκολία ανάγνωσης. Παρατηρείται η μεταβολή της εστιακής απόστασης με την αύξηση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.



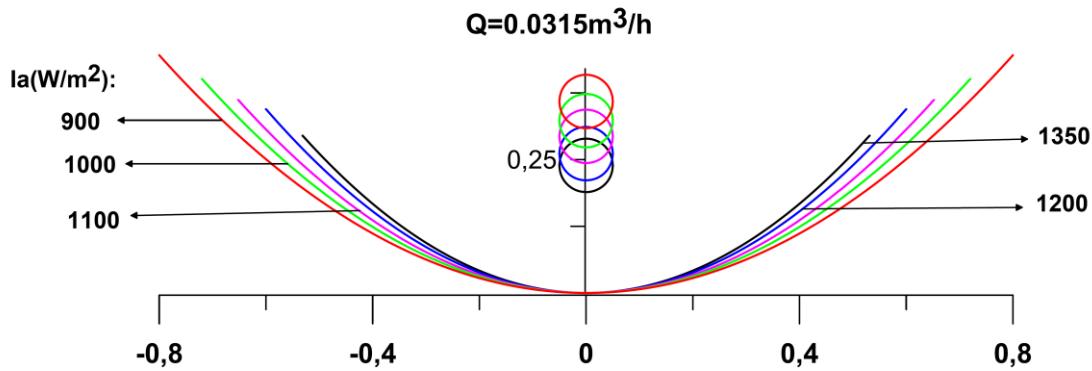
**Εικόνα 3.15:** Παραβολές με την αντίστοιχη εστιακή απόσταση που αντιστοιχούν στην παροχή  $Q_7$  για διάφορες τιμές της ακτινοβολίας. Στο σχήμα σημειώνονται με διαφορετικό χρώμα οι παραβολές και οι αντίστοιχες θέσεις τοποθέτησης του συλλέκτη για μεγαλύτερη ευκολία ανάγνωσης. Παρατηρείται η μεταβολή της εστιακής απόστασης με την αύξηση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.



**Εικόνα 3.16:** Παραβολές με την αντίστοιχη εστιακή απόσταση που αντιστοιχούν στην παροχή  $Q_8$  για διάφορες τιμές της ακτινοβολίας. Στο σχήμα σημειώνονται με διαφορετικό χρώμα οι παραβολές και οι αντίστοιχες θέσεις τοποθέτησης του συλλέκτη για μεγαλύτερη ευκολία ανάγνωσης. Παρατηρείται η μεταβολή της εστιακής απόστασης με την αύξηση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.



**Εικόνα 3.17:** Παραβολές με την αντίστοιχη εστιακή απόσταση που αντιστοιχούν στην παροχή  $Q_9$  για διάφορες τιμές της ακτινοβολίας. Στο σχήμα σημειώνονται με διαφορετικό χρώμα οι παραβολές και οι αντίστοιχες θέσεις τοποθέτησης του συλλέκτη για μεγαλύτερη ευκολία ανάγνωσης. Παρατηρείται η μεταβολή της εστιακής απόστασης με την αύξηση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.



**Εικόνα 3.18:** Παραβολές με την αντίστοιχη εστιακή απόσταση που αντιστοιχούν στην παροχή  $Q_{10}$  για διάφορες τιμές της ακτινοβολίας. Στο σχήμα σημειώνονται με διαφορετικό χρώμα οι παραβολές και οι αντίστοιχες θέσεις τοποθέτησης του συλλέκτη για μεγαλύτερη ευκολία ανάγνωσης. Παρατηρείται η μεταβολή της εστιακής απόστασης με την αύξηση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

Από τις παραπάνω απεικονίσεις προκύπτει ότι καθώς η ηλιακή ακτινοβολία αυξάνεται, για σταθερή παροχή, μειώνεται η εστιακή απόσταση της παραβολής. Με βάση τα όσα είπαμε για τον συντελεστή συγκέντρωσης  $C$ , γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι όσο η ακτινοβολία αυξάνεται ο συντελεστής συγκέντρωσης μειώνεται προκειμένου η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία να είναι όση ακριβώς απαιτείται για την επίτευξη του θερμοκρασιακού στόχου. Επίσης τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των παραβολών αυξάνουν με την αύξηση της παροχής. Δηλαδή για παράδειγμα το άνοιγμα της παραβολής για  $I_a=900\text{W/m}^2$ , για την παροχή  $Q_4$  είναι πολύ μικρότερο σε σχέση με την παροχή  $Q_7$ . Αυτό συμβαίνει διότι για το ίδιο ποσό ακτινοβολίας το νερό με μεγάλη παροχή θα απαιτούσε περισσότερο χρόνο για να θερμανθεί. Αυξάνοντας όμως το άνοιγμα της παραβολής  $d$  μεταβάλλεται ο λόγος συγκέντρωσης και έτσι ο συλλέκτης απορροφά μεγαλύτερο ποσό θερμότητας, πετυχαίνοντας τον θερμοκρασιακό στόχο που απαιτείται.

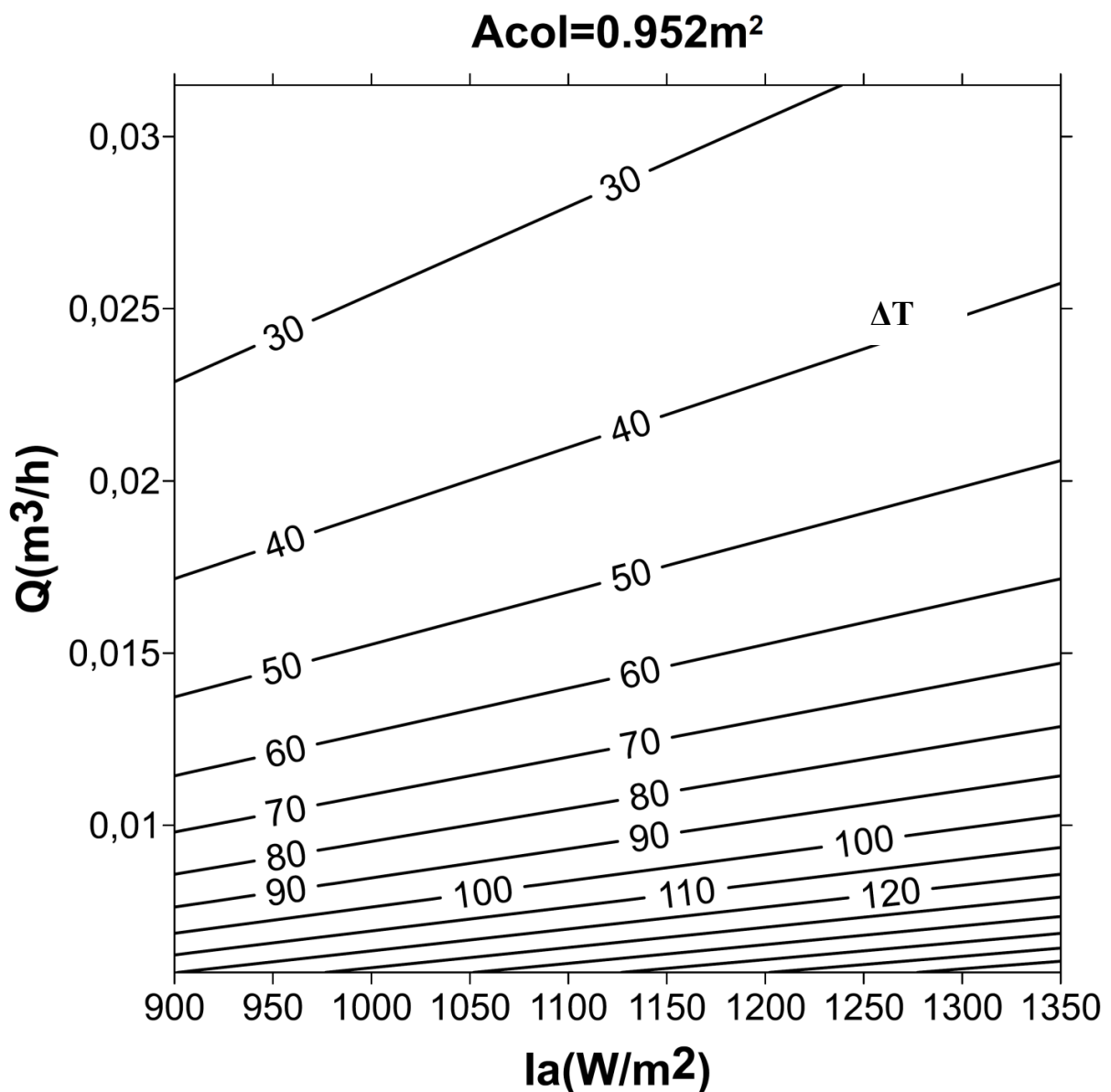
Στη συνέχεια της ανάλυσης και της επεξεργασίας των αποτελεσμάτων δημιουργήθηκε το ερώτημα του τι θα συνέβαινε στο θερμοκρασιακό εύρος σε κάθε μια δεδομένη παραβολή, δηλαδή σε κάθε  $A_{col}$ , αν οι παροχή και η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία μπορούσαν να μεταβληθούν αυθαίρετα για το εύρος των τιμών που είχαμε ορίσει. Συνδυάζοντας λοιπόν τις εξισώσεις 3.2, 3.6 και 3.8 και θεωρώντας μια ενιαία τιμή πυκνότητας για το νερό που αντιστοιχεί στη μέση θερμοκρασία θέρμανσης του νερού της διάταξης, έχουμε ότι :

$$\Delta T = \frac{A_{col} * I_a * 3600}{1.08 * Q * \rho * C_p} \quad (3.24)$$

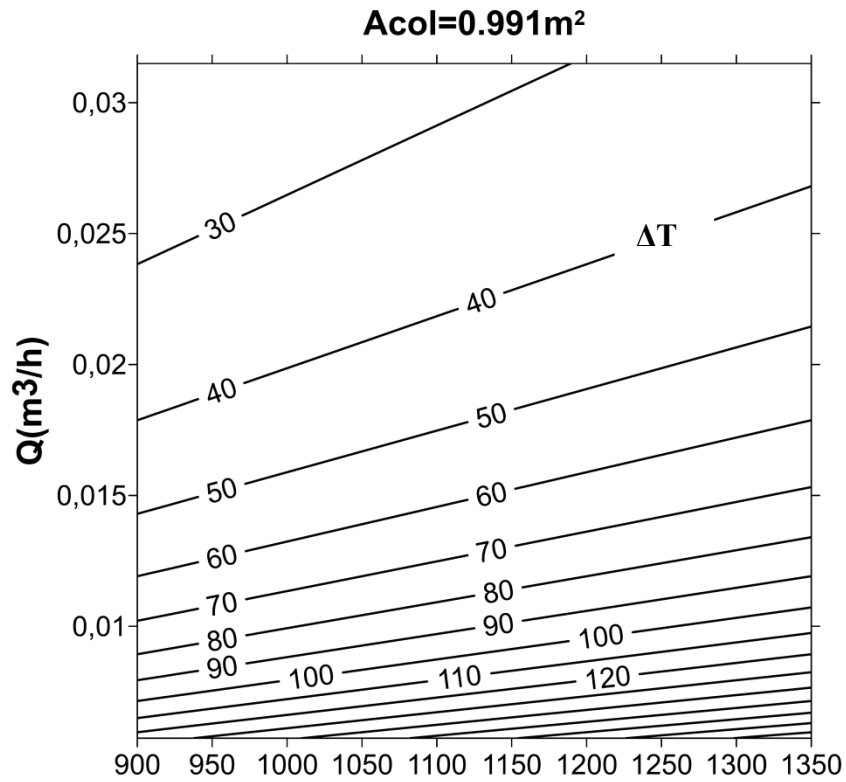


όπου το  $\bar{\rho}$  αντιστοιχεί στην πυκνότητα του νερού για θερμοκρασία  $\frac{(80-10)}{2} = 35^\circ C$  και αντικαθιστώντας στην εξίσωση 2.21 προκύπτει  $\bar{\rho} = 994.063 \text{Kg/m}^3$ .

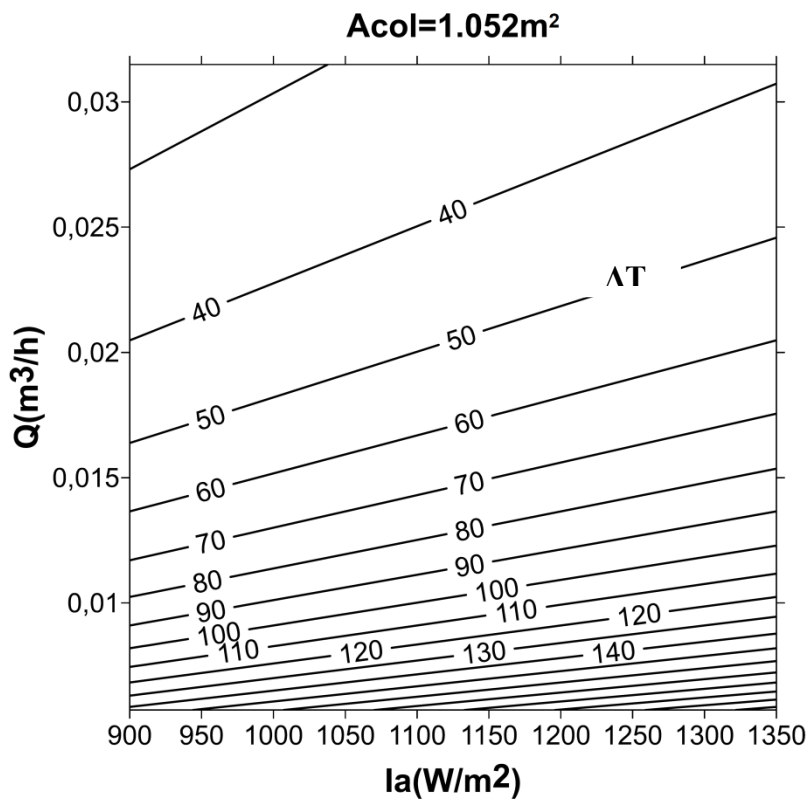
Δηλαδή στην εξίσωση 3.12 για κάθε τιμή του  $A_{col}$  με τη χρήση του προγράμματος Surfer δημιουργείται ένα πλέγμα στο οποίο για κάθε πιθανό συνδυασμό από το εύρος τιμών του  $Q$ ,  $I_a$ , δίνοντας το αντίστοιχο  $\Delta T$ . Δημιουργείται έτσι για κάθε παραβολή ένας χάρτης λειτουργίας, ο οποίος μας δείχνει για ποιο συνδυασμό  $Q$ ,  $I_a$  έχω το επιθυμητό  $\Delta T$  ή και αντίστροφα αν έχω ένα συγκεκριμένο θερμοκρασιακό εύρος που θέλω να επιτύχω, πώς θα πρέπει να ρυθμιστεί η παροχή από τον κυκλοφορητή ανάλογα με την ηλιοφάνεια. Οι χάρτες παρουσιάζονται στη συνέχεια:



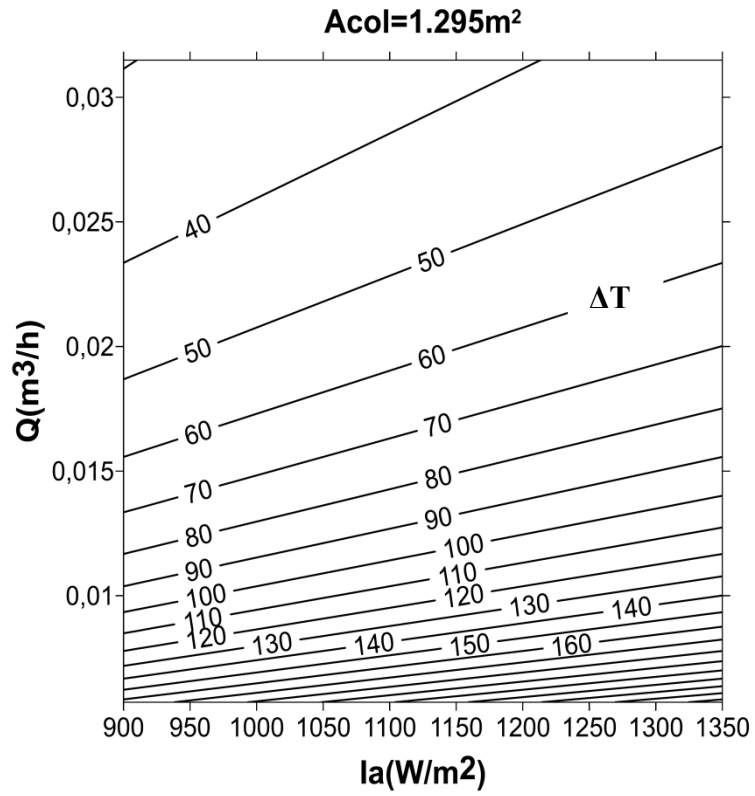
Εικόνα 3.19: Χάρτης λειτουργίας του κατόπτρου με επιφάνεια  $A_{col} = 0.952 \text{m}^2$



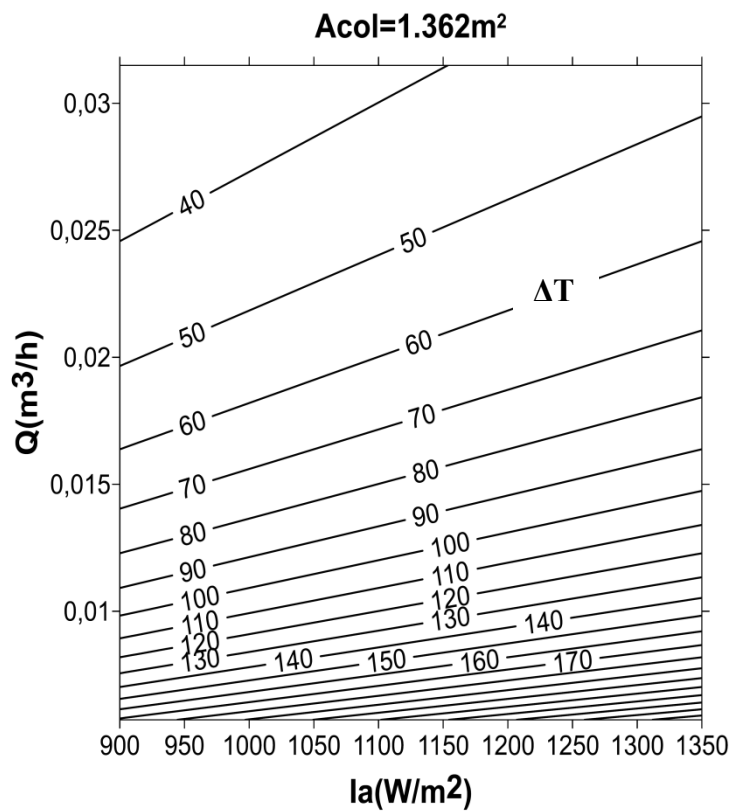
Εικόνα 3.20 : Χάρτης λειτουργίας του κατόπτρου με επιφάνεια  $A_{col}=0.991m^2$



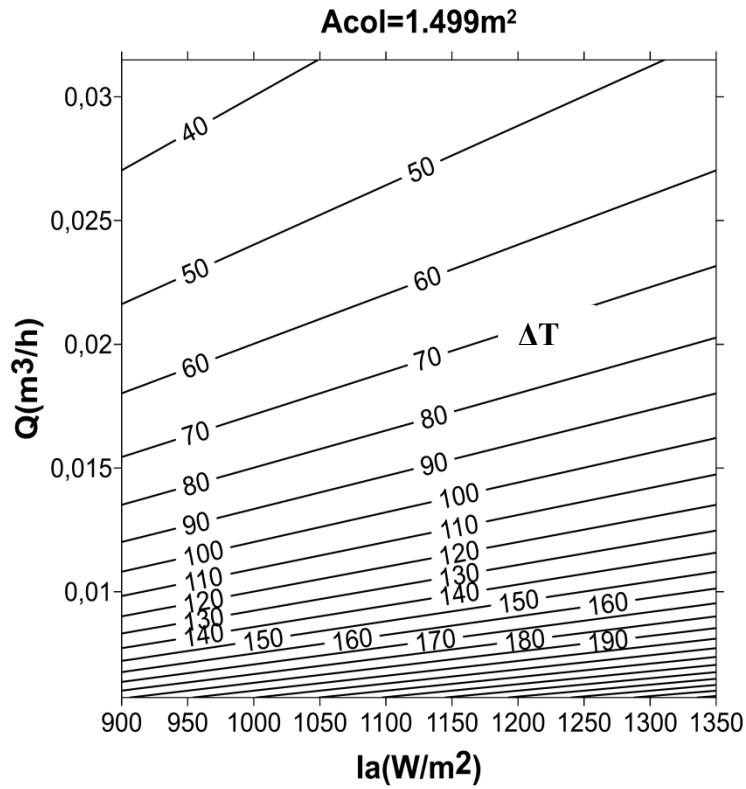
Εικόνα 3.21 : Χάρτης λειτουργίας του κατόπτρου με επιφάνεια  $A_{col}=1.052m^2$



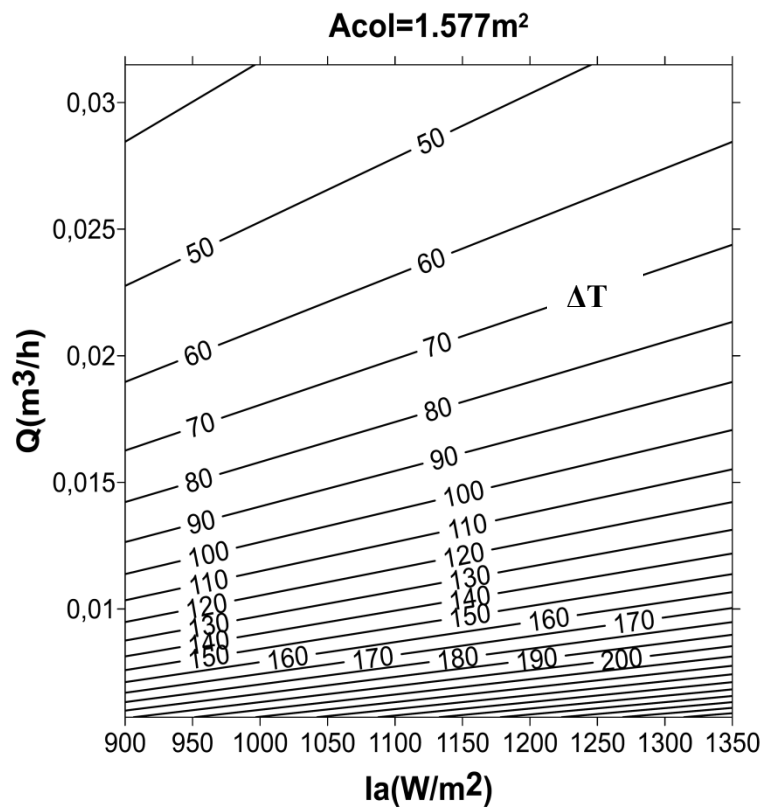
Εικόνα 3.22 : Χάρτης λειτουργίας του κατόπτρου με επιφάνεια  $A_{col}=1.295m^2$



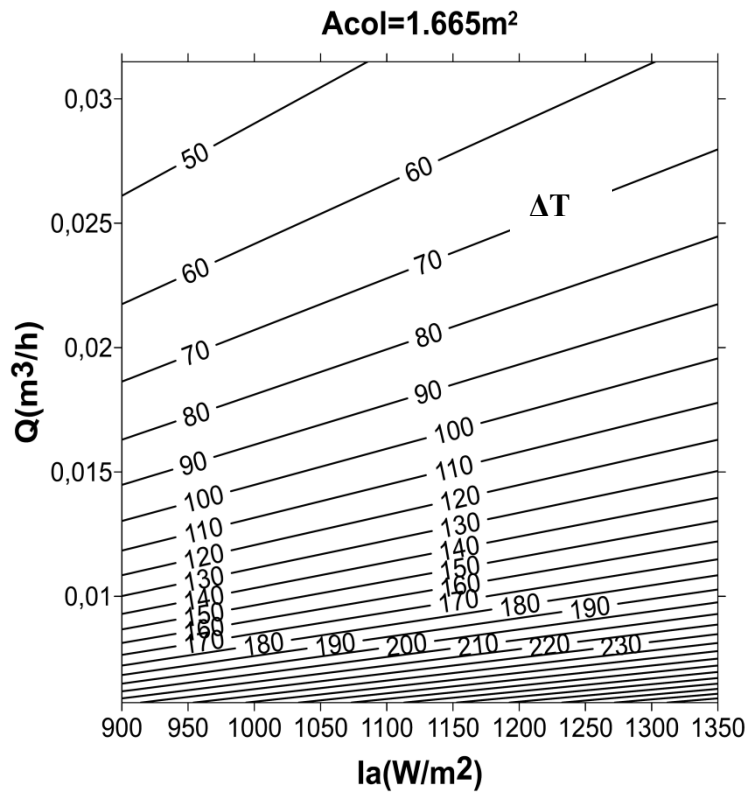
Εικόνα 3.23 : Χάρτης λειτουργίας του κατόπτρου με επιφάνεια  $A_{col}=1.295m^2$



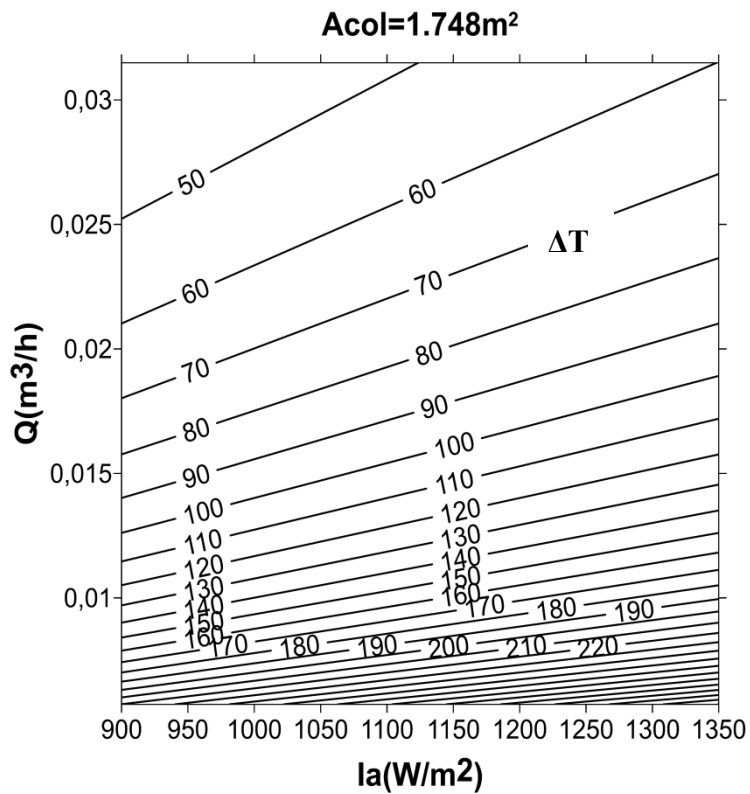
Εικόνα 3.24 : Χάρτης λειτουργίας του κατόπτρου με επιφάνεια A<sub>col</sub>=1.499m<sup>2</sup>



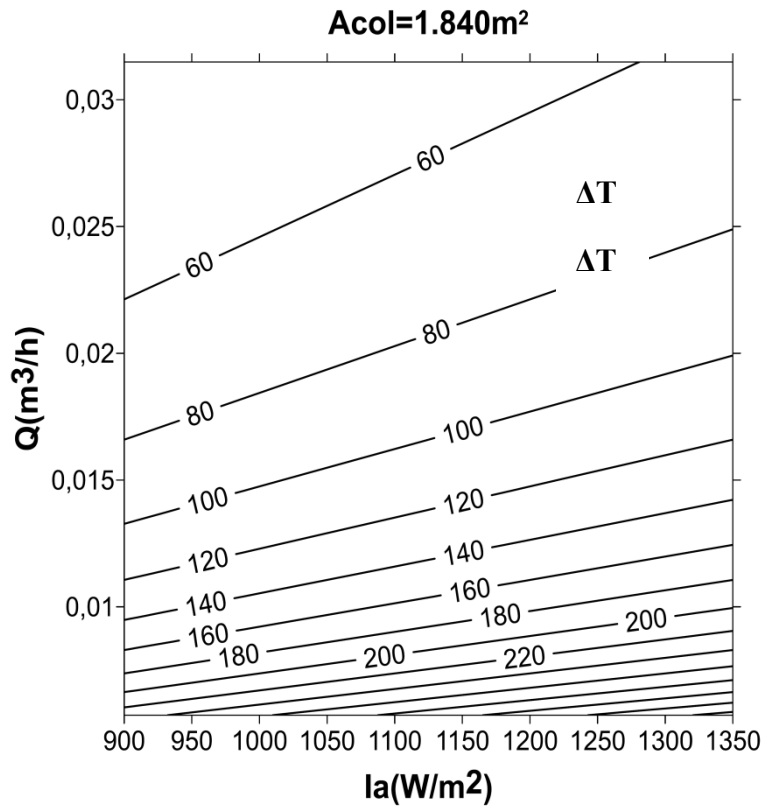
Εικόνα 3.25 : Χάρτης λειτουργίας του κατόπτρου με επιφάνεια A<sub>col</sub>=1.577m<sup>2</sup>



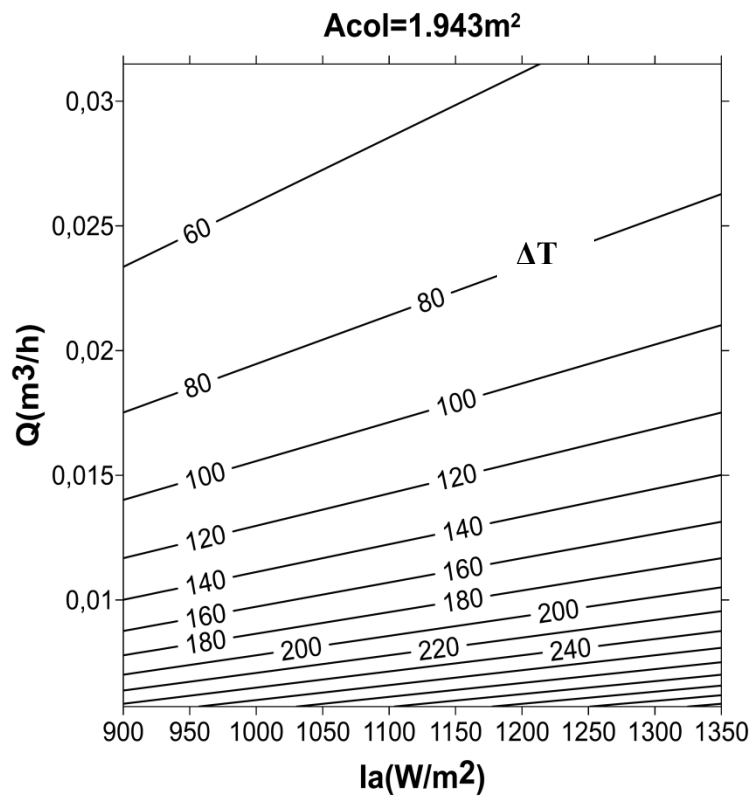
Εικόνα 3.26 : Χάρτης λειτουργίας του κατόπτρου με επιφάνεια  $A_{col}=1.655m^2$



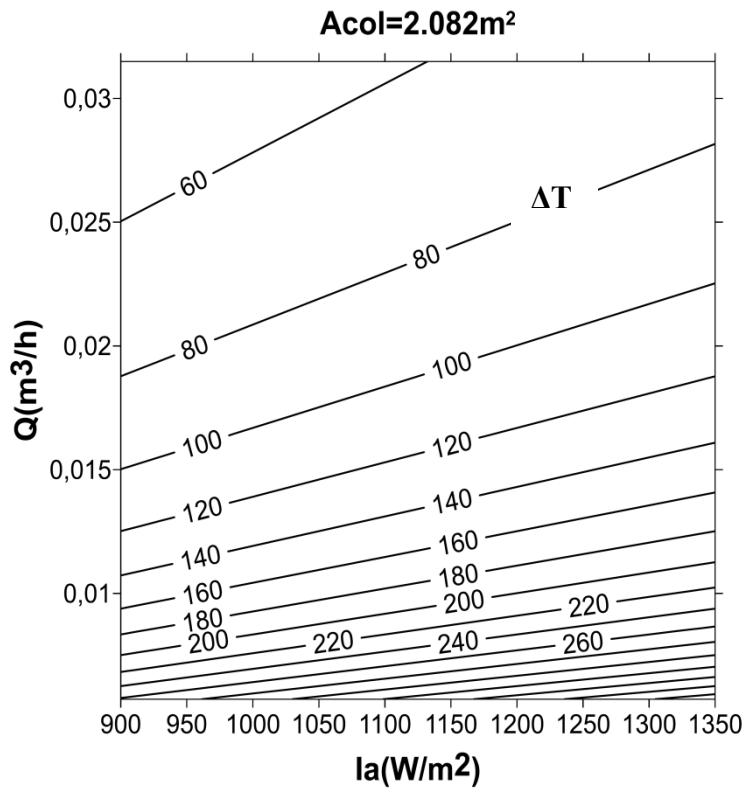
Εικόνα 3.27 : Χάρτης λειτουργίας του κατόπτρου με επιφάνεια  $A_{col}=1.748m^2$



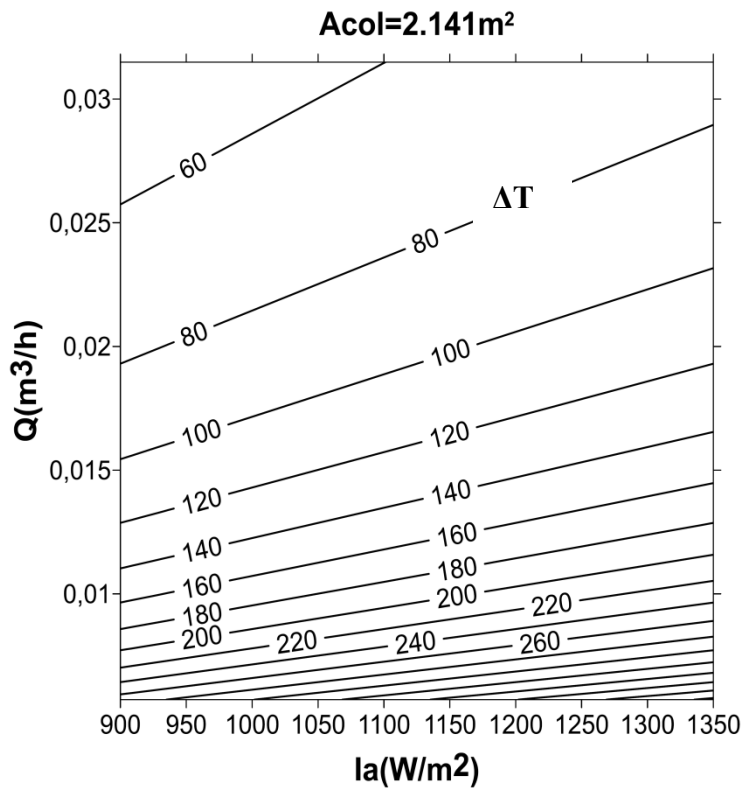
Εικόνα 3.28 : Χάρτης λειτουργίας του κατόπτρου με επιφάνεια  $A_{col}=1.840m^2$



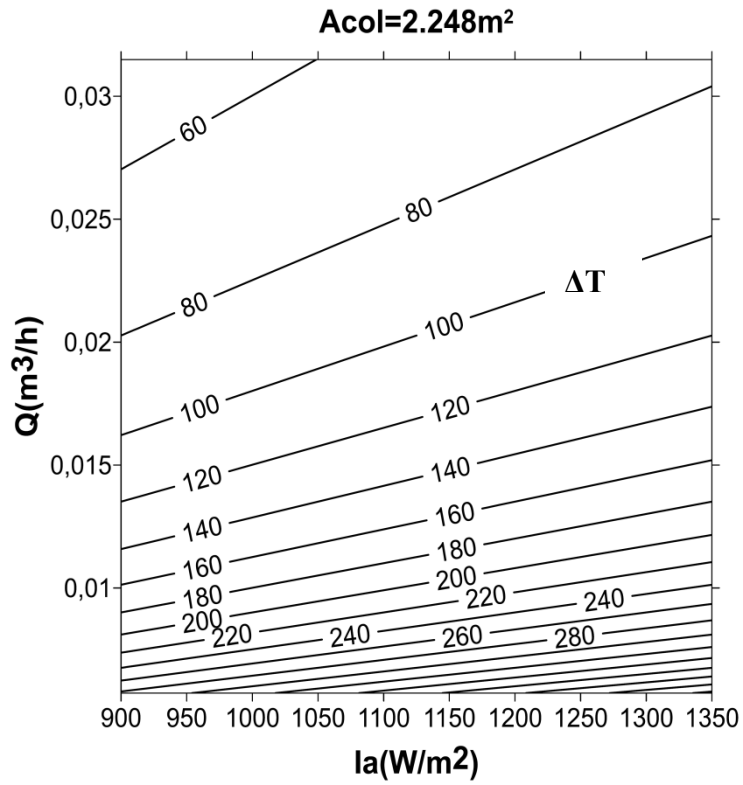
Εικόνα 3.29 : Χάρτης λειτουργίας του κατόπτρου με επιφάνεια  $A_{col}=1.943m^2$



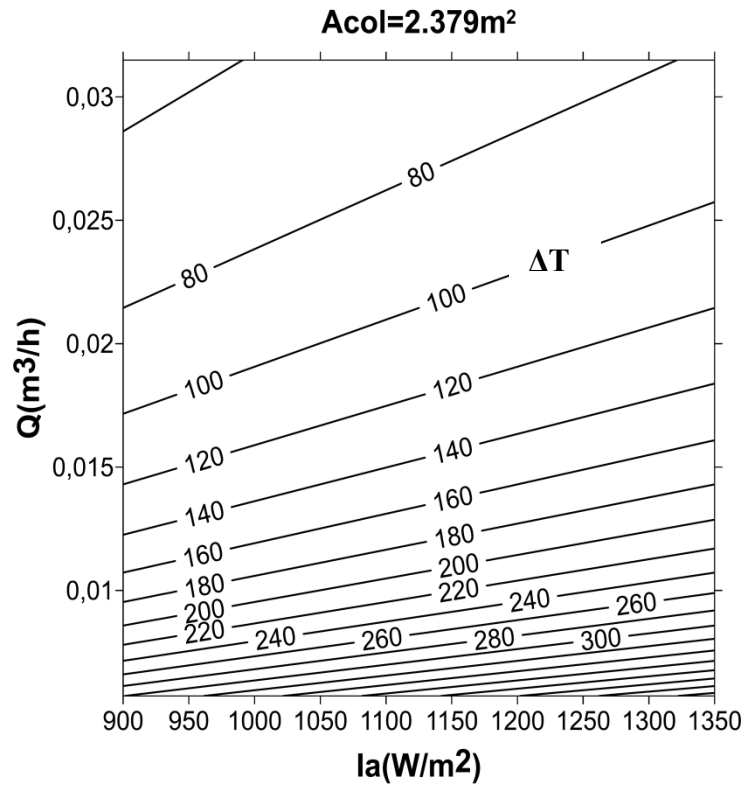
Εικόνα 3.30: Χάρτης λειτουργίας του κατόπτρου με επιφάνεια  $A_{col}=2.082m^2$



Εικόνα 3.31 : Χάρτης λειτουργίας του κατόπτρου με επιφάνεια  $A_{col}=2.141m^2$

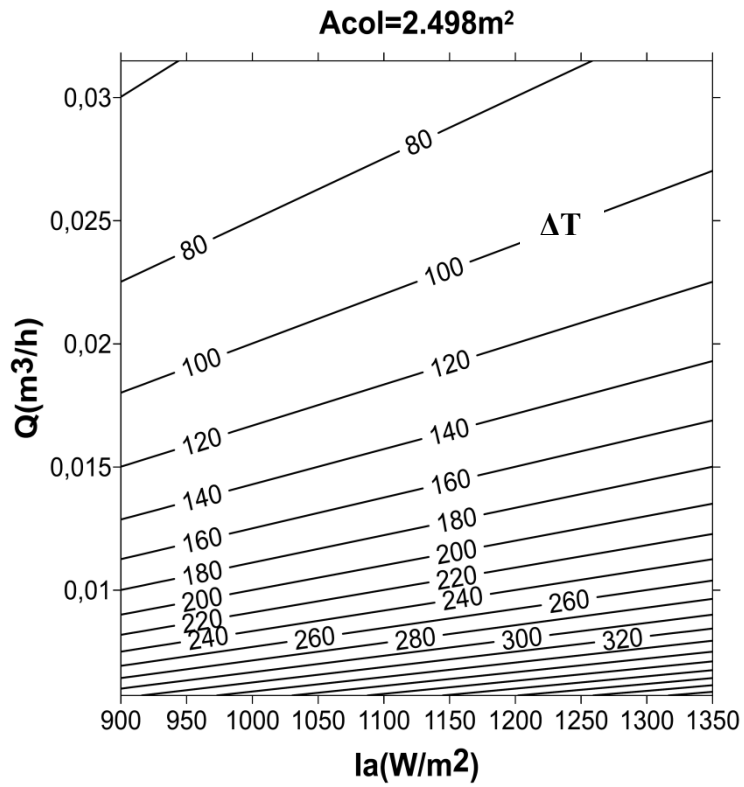


Εικόνα 3.32 : Χάρτης λειτουργίας του κατόπτρου με επιφάνεια  $A_{col}=2.248 m^2$

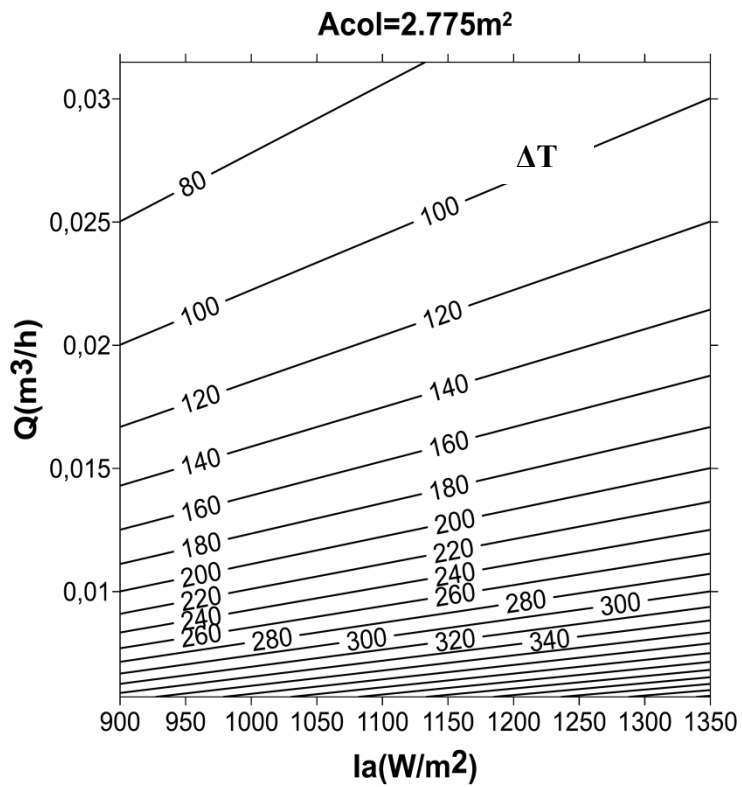


Εικόνα 3.33 : Χάρτης λειτουργίας του κατόπτρου με επιφάνεια  $A_{col}=2.379m^2$

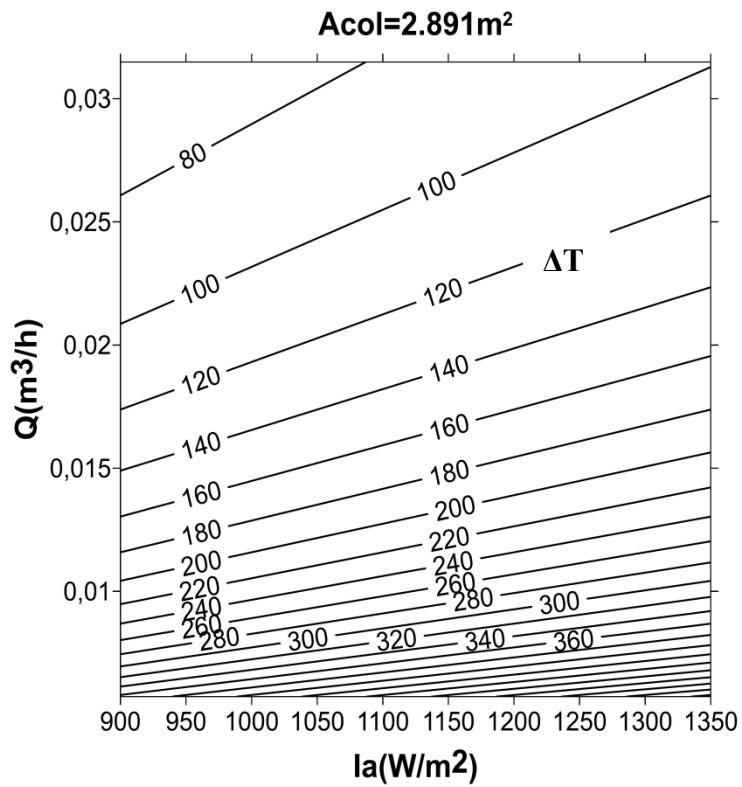




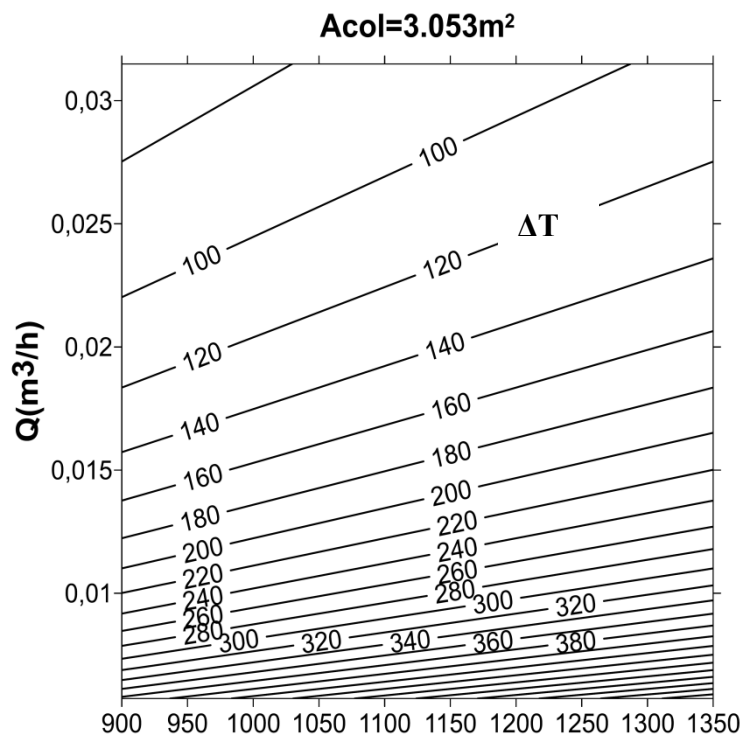
Εικόνα 3.34 : Χάρτης λειτουργίας του κατόπτρου με επιφάνεια  $A_{col}=2.498m^2$



Εικόνα 3.35 : Χάρτης λειτουργίας του κατόπτρου με επιφάνεια  $A_{col}=2.775m^2$



Εικόνα 3.36: Χάρτης λειτουργίας του κατόπτρου με επιφάνεια  $A_{col}=2.891m^2$



Εικόνα 3.37: Χάρτης λειτουργίας του κατόπτρου με επιφάνεια  $A_{col}=3.053m^2$

Από τα παραπάνω διαγράμματα αναζητούμε την εργονομική παραβολή για τον υπάρχων συλλέκτη. Παρατηρούμε ότι για το εύρος των τιμών της παροχής και της ηλιακής ακτινοβολίας που ορίσαμε η θερμοκρασιακή διαφορά που δίνεται στους χάρτες λειτουργίας εμφανίζει μεγάλη διακύμανση. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι χάρτες για τις παραβολές που αντιστοιχούν σε τιμές του  $A_{col}$  μεγαλύτερες των  $2,379m^2$ , στις οποίες η θερμοκρασιακή διαφορά που θέλουμε να πετύχουμε τοποθετείται στο άκρο των διαγραμμάτων περιορίζοντας σημαντικά την περιοχή λειτουργίας του συστήματός μας. Για παράδειγμα στην καμπύλη με  $A_{col}=2,379m^2$  η θερμοκρασιακή διαφορά των  $70^{\circ}C$  επιτυγχάνεται για παροχές από  $0,025$  έως  $0,354m^3/h$  και για ακτινοβολία από  $900$  έως περίπου  $1100W/m^2$ . Δηλαδή εάν κατασκευαζόταν αυτό το κάτοπτρο τότε μόλις η ηλιακή ακτινοβολία ξεπερνούσε το όριο των  $1100W/m^2$ , πράγμα πολύ πιθανό κατά τους θερινούς μήνες, θα έπρεπε ο κυκλοφορητής του συστήματος να διακόπτει την παροχή, σταματώντας την λειτουργία της εγκατάστασης. Συνεπώς μπορούμε να πούμε ότι το επιθυμητό κάτοπτρο θα αντιστοιχεί σε οριζόντια επιφάνεια η οποία θα έχει τιμή από  $0,952$  έως  $1,577m^2$ . Τα όρια αυτά επιλέγονται έτσι ώστε αφενός να πετυχαίνουμε το επιθυμητό  $\Delta T$  που ορίσαμε για την εγκατάσταση, αλλά αφετέρου να μην περιορίζονται και οι συνδυασμοί ( $I_a, Q$ ) που μπορούν να δώσουν μικρότερες θερμοκρασιακές διαφορές οι οποίες θα είναι χρήσιμες για τον χρήστη. Για παράδειγμα αν υποθέσουμε ότι το σύστημα μας συνδυάζεται με την ηλιακή θέρμανση χωρίς την ύπαρξη ψύκτη, τότε κατά τους θερινούς μήνες η επιθυμητή θερμοκρασία εξόδου δεν θα είναι οι  $80^{\circ}C$ , αλλά οι  $50$  ή  $60^{\circ}C$ . Καλούμαστε λοιπόν να επιλέξουμε και να κατασκευάσουμε εκείνο το κάτοπτρο που θα καλύπτει το θερμοκρασιακό εύρος που ορίσαμε, αλλά ταυτόχρονα θα εμφανίζει και μια ευελιξία ως προς τη χρήση του, ενώ θα αντιστοιχεί και σε μια μεγάλη περιοχή λειτουργίας.

Με βάση τα παραπάνω κριτήρια αποφασίζεται η κατασκευή της παραβολής που αντιστοιχεί επιφάνεια  $A_{col}=1,052m^2$  καθώς βλέπουμε ότι η επιθυμητή διαφορά θερμοκρασίας βρίσκεται περίπου στο μέσον του διαγράμματος ενώ υπάρχει η δυνατότητα μια πληθώρας συνδυασμών των μεγεθών  $I, Q$  για την θέρμανση του νερού από τους  $30-80^{\circ}C$ .

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κατόπτρου δίνονται στον πίνακα που ακολουθεί :

$A_{col}$	1,051691
d	0,544918
f	0,122662
p	0,27396
h	0,151298
s	0,642072
As	1,239199

**Πίνακας 3.6:** Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του επιλεγμένου για κατασκευή κατόπτρου.

Προκειμένου να γίνει η κατασκευή θα δοθούν στο μηχανουργείο όλα τα ζεύγη των συντεταγμένων  $(x, y)$  για της παραβολής, τα οποία προκύπτουν από το Grapher σαν δεδομένα για την καμπύλη του σχήματος 3.12α που φαίνεται με κόκκινο χρώμα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΣΥΜΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η μελέτη και η κατασκευή ενός παραβολικού κατόπτρου το οποίο θα συνεργάζεται με τον συλλέκτη κενού SEIDO 2 που παραχωρήθηκε από την εταιρία AVATEC. Προκειμένου να προχωρήσουμε στο σχεδιασμό και στην κατασκευή του κατόπτρου έπρεπε πρώτα να μελετηθεί και να κατανοηθεί ο τρόπος λειτουργίας του συλλέκτη κενού. Γι' αυτό μετά την σύντομη παρουσίαση και καταγραφή στο Κεφάλαιο 1 της υπάρχουσας τεχνολογίας των ηλιακών συλλεκτών, ακολούθησε στο Κεφάλαιο 2 μια εκτενής ανάλυση των κατασκευαστικών στοιχείων του κατόπτρου, αλλά και των κατασκευαστικών και θερμοδυναμικών χαρακτηριστικών του συλλέκτη. Έτσι στο κεφάλαιο 2 αρχικά αναλύθηκαν οι βασικές αρχές της, μεταφοράς θερμότητας όπου ειδικεύτηκαν για τους σωληνοειδείς συλλέκτες κενού και έπειτα για τον δικό μας σωλήνα αντιρροής. Παρουσιάστηκαν θέματα απόδοσης και λειτουργίας της συγκεκριμένης ομάδας συλλεκτών με την αναφορά και τον προσδιορισμό των βασικότερων δεικτών απόδοσης. Στη συνέχεια αναλύθηκαν και μαθηματικοποιήθηκαν οι βασικές αρχές σχεδιασμού των παραβολικών κατόπτρων και καταστρώθηκαν οι εξισώσεις μέσα από τις οποίες θα μπορούσαμε να προσδιορίσουμε τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κατόπτρου που θα θέλουμε να κατασκευάσουμε. Ενώ στο τέλος του κεφαλαίου έχουμε την παρουσίαση των υλικών και του τρόπου κατασκευής των κατόπτρων καθώς και την παρουσίαση των βασικών αρχών λειτουργίας των σερβομηχανισμών για την βελτιστοποίηση της απόδοσης των ηλιακών συλλεκτών με την παρακολούθηση της τροχιάς του ήλιου. Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τον προσδιορισμό της βέλτιστης παραβολής που τελικά θα κατασκευαστεί. Αρχικά υποθέσαμε ένα εύρος ταχυτήτων ροής μέσα στους σωλήνες κυκλοφορίας του νερού. Για κάθε ταχύτητα υπολογίζεται η αντίστοιχη παροχή και με βάση το ισοδύναμο πρόβλημα για κάθε τμήμα του συλλέκτη για την θερμοκρασιακή διαφορά που θέλουμε να επιτύχουμε, υπολογίζεται η ωφέλιμη θερμότητα που θα πρέπει ο συλλέκτης να απορροφήσει από την ηλιακή ακτινοβολία. Επιλέχθηκαν 10 ταχύτητες της ροής εισόδου από 0,1-0,5m/sec με βήμα 0,05. Έπειτα έπρεπε να ορίσουμε την ακτινοβολία που δέχεται πραγματικά ο συλλέκτης. Από τους πίνακες του TEE και της τεχνικής οδηγίας 20701/2010 προσδιορίστηκε με βάση τους δύο ακραίους μήνες το εύρος της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μια οριζόντια επιφάνεια για την περιοχή της Αθήνας. Στη συνέχεια το εύρος αυτό αναθεωρήθηκε με βάση τους συντελεστές της γεωμετρικής απόδοσης του συστήματός μας και πολλαπλασιάστηκε με το συντελεστή συγκέντρωσης του κατόπτρου για να προκύψει τελικώς το εύρος της ηλιακής ακτινοβολίας που κατά τη διάρκεια του έτους θα φθάνει στον συλλέκτη. Το εύρος που θεωρήθηκε ήταν από 900-1350W/m<sup>2</sup>. Με βήμα τα 50W/m<sup>2</sup> υπολογίζεται για κάθε ταχύτητα της ροής η κάθετη επιφάνεια του συλλέκτη  $A_{col}$ , υποθέτοντας πως οι απώλειες του συστήματός μας ανέρχονται στο 7,5% της συνολικής απορροφούμενης ηλιακής ακτινοβολίας. Η ορθότητα της υπόθεσης αυτής τεκμηριώνεται στο κεφάλαιο 3 όπου μελετώνται δύο περιπτώσεις υπολογισμού των θερμικών απωλειών για θερμοκρασίες περιβάλλοντος 10 και 20 °C αντίστοιχα.

Τελικά προκύπτουν 100 επιφάνειες κατόπτρων για κάθε μια από τις οποίες προσδιορίζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά (εστιακό βάθος, άνοιγμα, επιφάνεια) της εκάστοτε παραβολής. Από αυτές τις 100 επιφάνειες θα πρέπει να επιλέξουμε την μία εκείνη που θα κατασκευαστεί. Για το σκοπό αυτό κατασκευάζονται αρχικά για κάθε παροχή διαγράμματα όπου απεικονίζονται οι παραβολές που προέκυψαν για διαφορετικές τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας τοποθετώντας και τον σωλήνα του συλλέκτη στο αντίστοιχο εστιακό βάθος. Απορρίπτονται με αυτό τον τρόπο οι παραβολές εκείνες με μικρό εστιακό βάθος, καθώς δε θα μπορούσαν να συνεργαστούν γεωμετρικά με το συγκεκριμένο συλλέκτη. Έπειτα με τη χρήση του λογισμικού surfer, για το εύρος της παροχής και της ηλιακής ακτινοβολίας για κάθε επιφάνεια κατασκευάζεται το διάγραμμα της ισοθερμοκρασιακών καμπυλών λειτουργίας του συλλέκτη. Με βάση τα διαγράμματα αυτά επιλέγουμε την παραβολή αυτή η οποία έχει ένα μεγάλο αποδεκτό θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας ( $\Delta T < 100^{\circ}\text{C}$ , καθώς έχουμε να κάνουμε με ρευστό μέσο το νερό) για συνδυασμούς των I, Q που έχουν επιλεγθεί ήδη. Το κάτοπτρο τελικώς που επιλέγεται να κατασκευαστεί είναι η παραβολή που αντιστοιχεί σε επιφάνεια  $A_{\text{col}} = 1.052\text{m}^2$ . Το κάτοπτρο που προτείνεται θα κατασκευαστεί στο μηχανουργείο ΕΟΝ ΚΑΤΑΚΣΕΥΕΣ Α.Β.Ε.

Προτείνεται επίσης η μελέτη και η κατασκευή ενός συστήματος δύο αξόνων εντοπισμού της ηλιακής θέσης (dual axis solar tracker) προκειμένου να έχουμε τη βέλτιστη απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας κάθε ημέρα του έτους και συνεπώς και την καλύτερη δυνατή εκμετάλλευση των δυνατοτήτων του συστήματος κατόπτρου-συλλέκτη που μελετήθηκε.

Μελλοντικά μπορεί να δοκιμαστεί το κατασκευασμένο ηλιακό κάτοπτρο πειραματικά για διάφορες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας και παροχής νερού ώστε να φανεί η πραγματική απόδοση στη θέρμανση του νερού στο συλλέκτη. Οι πειραματικές τιμές μπορούν να προσεγγιστούν μέσω πιο αναλυτικών μοντέλων τα οποία θα μπορούν να προλέξουν πως κατανέμεται η θερμοκρασία σε ολόκληρο το συλλέκτη υποθέτοντας για παράδειγμα σταθερή ροή θερμότητας.

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

## **ΗΛΙΑΚΗ ΘΕΡΜΑΝΣΗ**

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια αύξηση στην αγορά της ενέργειας όσον αφορά τα θερμικά ηλιακά συστήματα. Η επένδυση σε ένα θερμικό ηλιακό σύστημα για παραγωγή ζεστού νερού χρήσης είναι οικονομικά αποδοτική για κάθε καταναλωτή. Η αξιόπιστη τεχνολογία στην οποία στηρίζεται προσφέρει μακροπρόθεσμη απόδοση με χαμηλή συντήρηση και σχετικά γρήγορη απόσβεση των χρημάτων της απόδοσης. Ανάλογα με το σύστημα επιλογής, ένα ηλιακό σύστημα είναι ικανό να προσφέρει το σύνολο ή τουλάχιστον ένα σημαντικό μέρος της αναγκαίας ποσότητας σε ζεστό νερό χρήσης για μία μεγάλη περίοδο του έτους. Για να υπάρξει μέγιστη απόδοση, είναι σημαντικό να δοθεί μεγάλη προσοχή στη διαστασιολόγηση και σχεδίαση ενός τέτοιου συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη το κλίμα της περιοχής και τις πραγματικές ανάγκες των καταναλωτών.

## **ΗΛΙΟΘΕΡΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ**

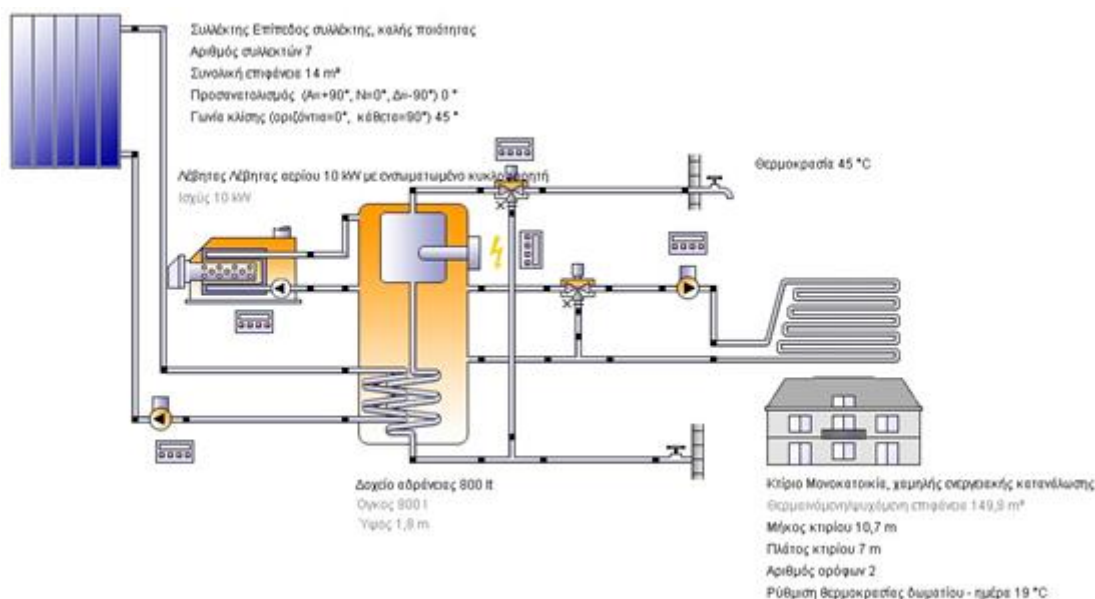
Ένα τυπικό σύστημα παραγωγής ζεστού νερού αποτελείται από τους ηλιακούς συλλέκτες, μία δεξαμενή αποθήκευσης του ζεστού νερού, τις απαραίτητες σωληνώσεις και το σύστημα ελέγχου. Η ηλιακή ακτινοβολία απορροφάται από το συλλέκτη και η συλλεγόμενη θερμότητα αντλείται, με φυσικό ή τεχνητό τρόπο στη δεξαμενή.

Το παραγόμενο ζεστό νερό χρήσης από θερμικά ηλιακά συστήματα αποθηκεύεται σε ειδικές δεξαμενές προκειμένου στη συνέχεια να καταναλωθεί σε διάφορα σημεία (ντους, κουζίνες, πλυντήρια κλπ.) του κτιρίου στο οποίο βρίσκεται η εγκατάσταση. Τα θερμικά ηλιακά συστήματα ποικίλουν από τα χαμηλού κόστους, συμβατικά θερμοσιφωνικά (χωρίς παρελκόμενο μηχανολογικό εξοπλισμό) έως τα πιο αποτελεσματικά, περίπλοκα και δαπανηρά κεντρικά ηλιακά συστήματα όπου χρησιμοποιούνται αντλίες, εναλλάκτες θερμότητας, αισθητήρες και συστήματα ελέγχου.



## ΗΛΙΟΘΕΡΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΧΩΡΩΝ

Τα ηλιοθερμικά συστήματα παραγωγής ζεστού νερού και θέρμανσης χώρων (Συστήματα combi), συνδυάζονται με συστήματα διανομής της θερμικής ενέργειας χαμηλών θερμοκρασιών, επειδή το εργαζόμενο μέσο (νερό ή αέρας) θερμαίνεται σε θερμοκρασίες 50 – 60 °C. Έτσι, ο καλύτερος συνδυασμός γίνεται με το ενδοδαπέδιο σύστημα θέρμανσης, τις τοπικές κλιματιστικές συσκευές (Fan coil units σε περίπτωση που συνδυάζεται και κλιματισμός) και τις κεντρικές κλιματιστικές μονάδες. Ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν κάθε στιγμή, το σύστημα αυτοματισμού της εγκατάστασης εξασφαλίζει τη σωστή εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας. Έτσι, αν υπάρχει διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια η κάλυψη των θερμικών αναγκών γίνεται απευθείας από τους ηλιακούς συλλέκτες. Σε περίπτωση που υπάρχει διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια αλλά δεν υπάρχουν θερμικές ανάγκες, η διαθέσιμη ενέργεια προστίθεται στο συσσωρευτή ενέργειας. Αν υπάρχει μόνο αποθηκευμένη ενέργεια, η κάλυψη των θερμικών αναγκών γίνεται απευθείας από το συσσωρευτή ενέργειας. Τέλος, αν δεν υπάρχει ούτε αποθηκευμένη ενέργεια, η κάλυψη των θερμικών αναγκών γίνεται από τη βοηθητική συμβατική πηγή ενέργειας.

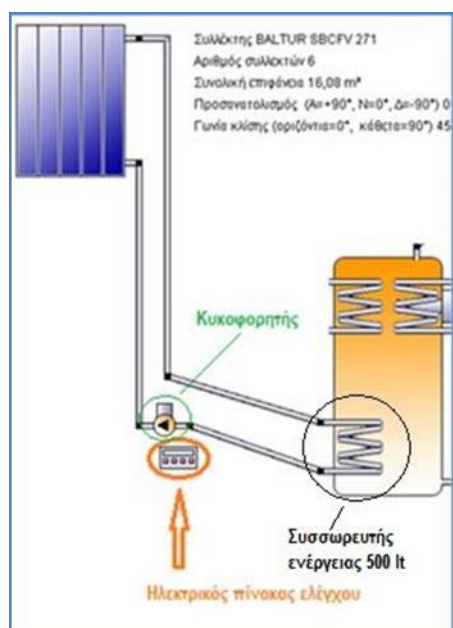


Εικόνα 2: Απεικόνιση συστήματος Combi.

Τα επιμέρους συστήματα της εγκατάστασης είναι:

### Α) Κλειστό κύκλωμα ηλιακών συλλεκτών

Το κλειστό κύκλωμα ηλιακών συλλεκτών αποτελείται συλλέκτες, τον κυκλοφορητή και τον εναλλάκτη θερμότητας, που βρίσκεται μέσα στο συσσωρευτή ενέργειας(boiler). Απαραίτητη, για την σωστή λειτουργία του κυκλώματος, είναι η ύπαρξη συσκευής ελέγχου. Σκοπός του κυκλώματος είναι η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας ώστε να γίνει η θέρμανση του νερού στο δοχείο αδρανείας της εγκατάστασης (boiler).



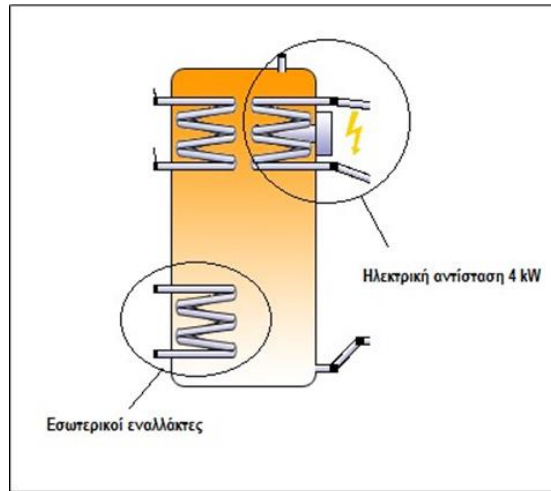
Εικόνα 3: Κλειστό κύκλωμα ηλιακών συλλεκτών

Ο κυκλοφορητής είναι συνήθως μίας ταχύτητας. Η λειτουργία του εξαρτάται από τον ηλεκτρικό πίνακα ελέγχου. Όταν δέχεται σήμα 0 τότε ο κυκλοφορητής δεν λειτουργεί, επομένως δεν υπάρχει κυκλοφορία του εργαζόμενου μέσου. Όταν το σήμα γίνει 1 τότε το ρευστό κυκλοφορεί στο κύκλωμα.

Ο ηλεκτρικός πίνακας ελέγχου είναι υπεύθυνος για τη λειτουργία του κλειστού κυκλώματος των ηλιακών συλλεκτών. Πρακτικά, ελέγχει την θερμοκρασία στην έξοδο του συλλέκτη ( $T_{coil}$ ), στον πυθμένα ( $T_{tank-b}$ ) και στην κορυφή της δεξαμενής ( $T_{tank-p}$ ) καθώς και την προηγούμενη κατάσταση και τελικά παράγει κάποιο σήμα,  $\gamma=0$  ή 1, το οποίο στέλνεται στον κυκλοφορητή.

## **B) Συσσωρευτής ενέργειας (boiler)**

Οι συσσωρευτές ενέργειας που χρησιμοποιούνται σε τέτοια συστήματα είναι τριπλής ενέργειας, Δηλαδή στο δοχείο υπάρχουν 3 εναλλάκτες, ένας για θέρμανση από τους ηλιακούς συλλέκτες, ένας για θέρμανση από τον λέβητα καυσίμου και τέλος εναλλάκτης αντίστασης για θέρμανση με τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας.

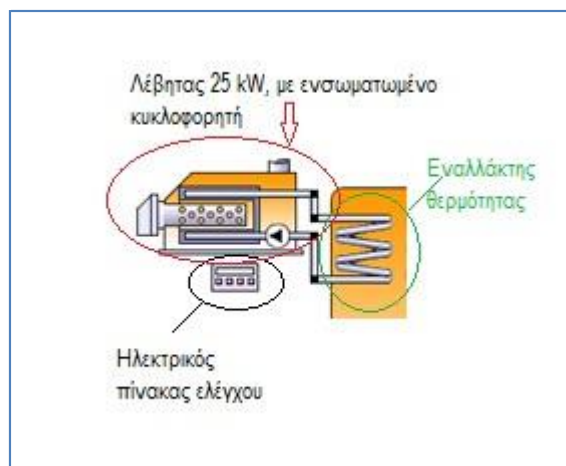


Εικόνα 4: Διάταξη συσσωρευτή ενέργειας 3-πλης ενέργειας

### Γ) Κλειστό κύκλωμα λέβητα

Το κλειστό κύκλωμα του λέβητα αποτελείται από ένα λέβητα φυσικού αερίου ή πετρελαίου, τον ηλεκτρικό πίνακα ελέγχου και τον εναλλάκτη θερμότητας (σερμπαντίνα), που βρίσκεται μέσα στο συσσωρευτή ενέργειας.

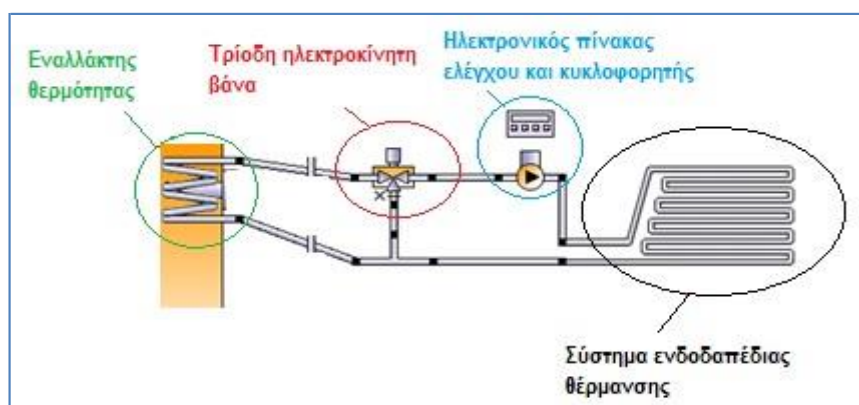
Ο λέβητας σε περίπτωση συνθηκών, που δεν επιτρέπουν τη λειτουργία του κυκλώματος των ηλιακών συλλεκτών, εργάζεται ως βοηθητική ενέργεια στο σύστημα. Ένας διαφορικός θερμοστάτης που βρίσκεται στον ηλεκτρικό πίνακα ελέγχου, είναι υπεύθυνος να θέσει σε λειτουργία το κλειστό κύκλωμα του λέβητα. Τα αισθητήρια, τα οποία καταλήγουν στο διαφορικό θερμοστάτη, παρακολουθούν τη θερμοκρασία στο 8<sup>ο</sup> στρώμα του συσσωρευτή και όπου έχουμε κατανάλωση, ώστε να καλύπτεται η ζήτηση σε απαίτηση ζεστού νερού χρήσης. Για να τεθεί το σύστημα σε λειτουργία πρέπει να τηρούνται οι παρακάτω προϋποθέσεις. Η θερμοκρασία του κτιρίου να βρίσκεται κάτω από 20 °C και η θερμοκρασία του νερού του συσσωρευτή που βρίσκεται στο πάνω στρώμα να μην υπερβαίνει τους 38 °C.



Εικόνα 5: Κλειστό κύκλωμα λέβητα

### Δ) Τρίοδη ηλεκτροκίνητη βάνα

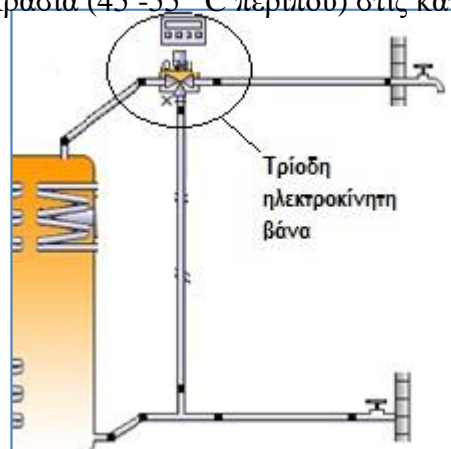
Η τρίοδη ηλεκτροκίνητη βάνα λειτουργεί ως εξής: Ζεστό νερό (60 – 65 °C), εξέρχεται από τον εναλλάκτη θερμότητας του συσσωρευτή και εισέρχεται στην τρίοδη ηλεκτροκίνητη βάνα. Το νερό που κινείται μέσα στο σύστημα της ενδοδαπέδιας, ψύχεται σχετικά και μία ποσότητα εισάγεται κατά την επιστροφή του στην τρίοδη βάνα, όπου αναμιγνύεται με το ζεστό νερό, ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος της ενδοδαπέδιας. Με αυτό τον τρόπο λειτουργίας επιτυγχάνεται μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας, αφού η ποσότητα καυσίμου που απαιτείται για τη θέρμανση του νερού εισαγωγής στην τρίοδη βάνα από τον εναλλάκτη θερμότητας είναι ελάχιστο λόγω της μικρής αύξησης της θερμοκρασίας που απαιτείται για το επιθυμητό αποτέλεσμα.



Εικόνα 6: Τρίοδη ηλεκτροβάννα ανάμειξης.

### Ε) Ανοιχτό κύκλωμα ζεστού νερού χρήσης

Το κύκλωμα τίθεται σε λειτουργία μέσω ωρολογιακού μηχανισμού, που υπάρχει στον ηλεκτρικό πίνακα ελέγχου και περιλαμβάνει την τρίοδη ηλεκτροκίνητη βάνα. Η βάνα αναμειγνύει το ζεστό νερό του συσσωρευτή με το κρύο νερό του δικτύου, καθορίζοντας έτσι μία επιθυμητή θερμοκρασία (45 -55 °C περίπου) στις καταναλώσεις ζεστού νερού.



Εικόνα 7: Κύκλωμα ανάμειξης ζεστού νερού χρήσης

# ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]. “Concetrating Solar Power Global outlook 09” Greenpeace International, SolarPACES and ESTELA
- [2]. Wikipedia“List of solar thermal power stations”
- [3]. A.Fernandez-Garcia, E.Zara, L.Valenzuela, M.Perez, ‘Parabolic trough collectors and their applications, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14, 2010
- [4]. L.M.Ayompe, A. Duffy, M. Keener, M. Colon, ‘Comperative field performance study of flat plate and heat pipe evacuated tube collectors (ETCs) for domestic water heating systems in a temperate climate, Applied Energy, 36, 2011
- [5].Theodore L. Bergman, Andriene S. Lavine, Fundamentals of heat and mass transfer, John Wiley and Sons, 2007
- [6]. Ξ. Κακάτσιος, Αρχές Μεταφοράς Θερμότητας και Μάζης, Εκδόσεις Συμμεών, 2006
- [7]. John H.Lienhard,Aheat transfer text book, third edition, Phlogiston Press,2001
- [8]. K.A.Αντωνόπουλου, Θερμικά-Ηλιακά Συστήματα Μέρος Πρώτο, Εκδόσεις Ε.Μ.Π,2011
- [9]. John A. Duffie, Solar Engineering of Thermal Processes, John Wiley and Sons, 2013
- [10].C.Tzivanidis, E.Bellos, D.Korres, K.A.Antonopoulos, G.Mitsopoulos, ‘Thermal and Optical Investigation of a Trough Collector’, Thermal Engineering, 6, 2015
- [11]. Ming Qu, David H .Archer, Hongxi Yin, ‘A Linear Parabolic Trough Solar Collector Performance Model, Energy Sustainability, 2007
- [12]. S.A. Kalogirou, S. Lloyd, J. Ward, P. Eleftheriou, “Design and Performance Characteristics of a Parabolic Trough Collector System, Applied Energy, 47, 1994
- [13]. M. Yaghoubi, F. Ahradi, M. Bandehee, “Analysis of Heat Losses of Absorber Tube of Parabolic Trough Collector of Shiraz (Iran) Solar Power Plant, Clean Energy Technologies, Vol.1, No.1, 2013
- [14]. Matthias Gunther, Michael Joemman, Simon Csambor, ‘Parabolic Trough Technology’ Enermena, 2012
- [15]. TOTEE 20701, ‘Κλιματικά δεδομένα Ελληνικών Περιοχών’, 3rd Edition, 2010