

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Σκοπός της εργασίας αυτής αποτελεί η καταγραφή, κατηγοριοποίηση και ανάλυση διαφόρων τύπων ηλιακών συλλεκτών.

Πιο αναλυτικά, το πρώτο μέρος της διπλωματικής εργασίας ασχολείται με τους μη συγκεντρωτικούς συλλέκτες, δηλαδή τους επίπεδους και τους σωλήνες κενού. Οι επίπεδοι σωλήνες διακρίνονται σε αυτούς που χρησιμοποιούν ως εργαζόμενο μέσο το νερό και αυτούς με εργαζόμενο μέσο τον αέρα. Οι σωλήνες κενού, από την άλλη, διαχωρίζονται σε συλλέκτες άμεσης ροής και θερμικούς σωλήνες.

Αντικείμενο του δεύτερου μέρους αποτελούν οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες, ήτοι οι παραβολικοί, τα ηλιακά πιάτα και οι πυργοί ισχύος. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στους παραβολικούς συλλέκτες (CPC και σχήματος σκάφης) καθώς είναι και τα πιο διαδεδομένα.

Το τρίτο και τελευταίο μέρος αναλύει συστήματα τύπου ICS με δύο δεξαμενές αποθήκευσης του νερού. Αντικείμενο της ανάλυσης αποτελούν ο βαθμός απόδοσης και οι θερμικές απώλειες κατά την διάρκεια της νύχτας.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Εισαγωγή .....	σελ. 4
Ιστορική Αναδρομή.....	σελ. 5
Ηλιακοί Συλλέκτες .....	σελ. 10

### ΣΧΕΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

Είδη μη Συγκεντρωτικών - Επίπεδοι Συλλέκτες.....	σελ. 11
Είδη μη Συγκεντρωτικών - Σωλήνες Κενού .....	σελ. 12
Είδη Συγκεντρωτικών - Παραβολικά Κάτοπτρα .....	σελ. 13
Είδη Συγκεντρωτικών - Παραβολικά Πιάτα και Πύργοι Ισχύος.....	σελ. 14

### ΜΕΡΟΣ 1<sup>ο</sup> : ΜΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΙ ΗΛΙΑΚΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ

1. Επίπεδοι Ηλιακοί Συλλέκτες.....	σελ. 15
1.1. Επίπεδοι Ηλιακοί Συλλέκτες με εργαζόμενο μέσο αέρα.....	σελ. 18
1.1.1. Ανάστροφος Επίπεδος Ηλιακός Συλλέκτης.....	σελ. 18
1.1.2. Επίπεδος Συλλέκτης συνεχούς ροής αέρα .....	σελ. 27
1.1.3. Επίπεδος Συλλέκτης με διαιρούμενο κανάλι αέρα.....	σελ. 30
1.1.4. Επίπεδος διάτρητος Συλλέκτης χωρίς υαλοπίνακα .....	σελ. 34
1.1.5. Πορώδης Επίπεδος Ηλιακός Συλλέκτης.....	σελ. 40
1.2. Επίπεδοι Ηλιακοί Συλλέκτες με εργαζόμενο μέσο νερό .....	σελ. 46
1.2.1. Επίπεδος Ηλιακός Συλλέκτης μέλανος υγρού .....	σελ. 46
1.2.2. Επίπεδος Ηλιακός Συλλέκτης παράλληλων σωλήνων .....	σελ. 49
1.2.3. Επίπεδος Ηλιακός Συλλέκτης με ελικοειδείς σωλήνες.....	σελ. 52
1.2.4. Επίπεδος Ηλιακός Συλλέκτης μικρής ροής νερού.....	σελ. 53
1.2.5. Επίπεδος Κεραμικός Συλλέκτης μικρής ροής νερού.....	σελ. 58
1.2.6. Επίπεδος Ηλιακός Συλλέκτης διπλών παράλληλων πλακών.....	σελ. 61
1.2.7. Επίπεδος Κυλινδρικός Ηλιακός Συλλέκτης.....	σελ. 64
2. Σωλήνες κενού .....	σελ. 67
2.1. Συλλέκτες άμεσης ροής .....	σελ. 72
2.1.1. Ομόκεντροι σωλήνης εισόδου-εξόδου (γυαλί-μέταλλο) .....	σελ. 72
2.1.2. Συλλέκτες τύπου Σίδνεϋ (γυαλί-γυαλί).....	σελ. 77
2.1.2.1 Τυπικός Συλλέκτης .....	σελ. 77
2.1.2.2. Κατακόρυφος Συλλέκτης τύπου Σίδνεϋ.....	σελ. 80
2.1.2.3. Συλλέκτης τύπου Σίδνεϋ με ανάκλαση .....	σελ. 84

2.2. Συλλέκτες Θερμικών Σωλήνων.....	σελ. 87
2.2.1. Τυπικός Συλλέκτης Θερμικών Σωλήνων.....	σελ. 87
2.2.2. Θερμικός Σωλήνας λεπτής μεμβράνης.....	σελ. 92
2.2.3. Ομοαξονικός Θερμικός Σωλήνας.....	σελ. 96
2.2.4. Φυγοκεντρικός Θερμικός Σωλήνας.....	σελ. 98
2.2.5. Κυρτός Θερμικός Σωλήνας.....	σελ. 99

## **Μέρος 2<sup>ο</sup> : ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΙ ΗΛΙΑΚΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ**

3. Παραβολικά Κάτοπτρα.....	σελ. 104
3.1. Παραβολικά Κάτοπτρα σχήματος σκάφης.....	σελ. 104
3.1.1. Ηλιακά Πάρκα.....	σελ. 105
3.1.2. Τυπικό παραβολικό κάτοπτρο.....	σελ. 108
3.1.3. Βελτιωμένα κάτοπτρα.....	σελ. 114
3.1.3.1. Παραβολικός Συλλέκτης σχήματος σκάφης γραμμικής εστίασης.....	σελ. 116
3.1.3.2. Παραβολικός Συλλέκτης σχήματος σκάφης με πορώδη απορροφητή.....	σελ. 121
3.1.3.3. Παραβολικός Συλλέκτης σχήματος σκάφης με δευτερεύοντες ανακλαστές.....	σελ. 126
3.1.3.4. Παραβολικό Κάτοπτρο με δύο δεξαμενές αποθήκευσης.....	σελ. 130
3.2 Παραβολικοί Συγκεντρωτικοί Συλλέκτες CPC.....	σελ. 134
3.2.1. Συγκεντρωτικοί Παραβολικοί Συλλέκτες με επίπεδους απορροφητές διπλών επιφανειών (CPC).....	σελ. 135
3.2.2. Βελτιωμένοι τρισδιάστατοι (3-D) CPC ηλιακοί συλλέκτες.....	σελ. 139
3.2.3. Ηλιακοί συμμετρικοί συλλέκτες CPC τύπου ICS.....	σελ. 147
3.2.4. Ηλιακοί ασύμμετροι συλλέκτες CPC τύπου ICS.....	σελ. 154
3.2.5. Συστήματα ICS με οριζόντια και κατακόρυφη διάταξη κυλινδρικής δεξαμενής αποθήκευσης.....	σελ. 161
4. Παραβολικά Πιάτα.....	σελ. 171
4.1. Τυπικό Παραβολικό Πιάτο.....	σελ. 171
5. Πύργοι Ισχύος.....	σελ. 172
5.1. Πύργοι Ισχύος με δευτερεύοντα ανακλαστή.....	σελ. 173
5.2. Πύργοι Ισχύος με ‘τερματικό’ συλλέκτη.....	σελ. 177
5.3. Πύργοι Ισχύος με ηλιοστάτες μεμβράνης.....	σελ. 178
5.4. Πύργοι Ισχύος οπτικών ινών.....	σελ. 180

<b>ΜΕΡΟΣ 3<sup>ο</sup> : ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ICS ΜΕ ΔΥΟ ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ ΝΕΡΟΥ.....</b>	<b>σελ. 184</b>
---	-----------------

<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>σελ. 202</b>
--------------------------	-----------------

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο ήλιος είναι το μόνο άστρο που επηρεάζει φανερά την ζωή μας, όχι μόνο την ημέρα αλλά και την νύχτα, με ηλιοφάνεια αλλά και τις νεφοσκεπείς ημέρες. Ο ήλιος παράγει και ακτινοβολεί τεράστιες ποσότητες ενέργειας και παρέχει σχεδόν όλη την ενέργεια που χρησιμοποιούμε στη γη. Ακόμη και ο άνεμος και τα νέφη είναι αποτέλεσμα της επίδρασης της ηλιακής ενέργειας στη γη. Από την ηλιακή ενέργεια προέρχεται η αιολική ενέργεια, ο κύκλος του νερού, η βιομάζα, το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο, ο άνθρακας και σχεδόν όλη η ενέργεια στο ηλιακό σύστημα.

Ο ήλιος είναι μια σφαίρα θερμής αέριας μάζας, διαμέτρου  $1.39 \times 10^9 \text{m}$ . Η θερμοκρασία στην επιφάνειά του είναι 5762 K ενώ στο εσωτερικό υπολογίζεται σε  $8-40 \times 10^6 \text{K}$ . Η παραγωγή ηλιακής ενέργειας ανέρχεται σε  $3.8 \times 10^{20} \text{MW}$ , η οποία όμως διαχέεται προς όλες τις κατευθύνσεις και μόνο ένα πολύ μικρό ποσοστό φθάνει στη γη.

Ο άνθρωπος συνειδητοποίησε τα οφέλη της χρήσης της ηλιακής ακτινοβολίας από τα προϊστορικά κιόλας χρόνια. Ο Έλληνας ιστορικός Ξενοφώντας κατέγραψε κάποιες διδαχές του φιλοσόφου Σωκράτη (470-399 π.Χ.) οι οποίες αφορούσαν τον σωστό προσανατολισμό των κατοικιών έτσι ώστε τα σπίτια να διατηρούνται δροσερά τους καλοκαιρινούς μήνες και ζεστά τους χειμερινούς. Επιπρόσθετα, ο ήλιος χρησιμοποιήθηκε για την αποξήρανση και διατήρηση τροφίμων, την εξάτμιση θαλασσινού νερού και κατά συνέπεια παραγωγή αλατιού.

Οι προαναφερθείσες χρήσεις της ηλιακής ακτινοβολίας σε συνδυασμό με την ολοένα συρρίκνωση των αποθεμάτων πετρελαίου καθώς επίσης και των σοβαρών περιβαλλοντικών προβλημάτων των τελευταίων δεκαετιών κατέστησαν επιτακτική την ανάγκη στροφής του ενδιαφέροντος στην ηλιακή ενέργεια. Το σημαντικότερο πλεονέκτημά της είναι η άμεση διαθεσιμότητά της και ότι δεν ρυπαίνει το περιβάλλον.

## ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Στην ενότητα αυτή αναφέρονται οι σημαντικότεροι σταθμοί της ιστορίας όσον αφορά την εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας.

### **7<sup>ος</sup> αιώνας π.Χ.**

Μεγεθυντικοί φακοί χρησιμοποιούνται για την συγκέντρωση των ακτίνων του ηλίου με σκοπό την δημιουργία φλόγας και το κάψιμο εντόμων.

### **3<sup>ος</sup> αιώνας π.Χ.**

Οι Έλληνες και οι Ρωμαίοι χρησιμοποιούν φλεγόμενους καθρέπτες για να ανάψουν δαυλούς σε θρησκευτικές τελετές.

### **2<sup>ος</sup> αιώνας π.Χ.**

Το 212 π.Χ. ο Έλληνας επιστήμονας Αρχιμήδης εκμεταλλεύεται την ανακλαστικότητα των μεταλλικών επιφανειών για να συγκεντρώσει την ηλιακή ακτινοβολία και να πυρπολήσει τα ξύλινα πλοία των Ρωμαίων που εισέβαλαν στις Συρακούσες.

### **1<sup>ος</sup> έως και 4<sup>ος</sup> αιώνας μ.Χ.**

Τα περίφημα ρωμαϊκά μπάνια κατασκευάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να εκμεταλλεύονται την ηλιακή ακτινοβολία για θερμαντικούς σκοπούς.

### **1200 μ.Χ.**

Μια φυλή της βόρειας Αμερικής, οι Ανασάζι, κατοικούν σε νότια προσανατολισμένες κατοικίες έτσι ώστε να αιχμαλωτίζουν τον ήλιο κατά την διάρκεια του χειμώνα.



### **15<sup>ος</sup> αιώνας**

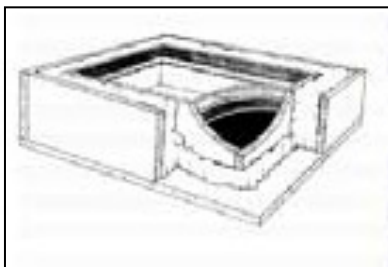
Άραβες αλχημιστές χρησιμοποιούν τον ήλιο για απόσταξη, γεγονός που καταγράφηκε από τον Γάλλο μαθηματικό Mouchot το 1869.

### **18<sup>ος</sup> αιώνας**

Κατά τη διάρκεια του 18<sup>ου</sup> αιώνα, κατασκευάζονται ηλιακοί κλίβανοι ικανοί να λιώνουν σίδηρο, χαλκό και άλλα μέταλλα σε όλη την Ευρώπη και στην Μέση Ανατολή. Ένας τέτοιος ηλιακός κλίβανος σχεδιάστηκε από τον Γάλλο Lavoisier, ο οποίος έφτανε την θερμοκρασία των 1750°C. Για την επίτευξη αυτής της θερμοκρασίας χρησιμοποιήθηκε φακός 1.32m καθώς επίσης και ένας δεύτερος φακός 0.2m. Η θερμοκρασία αυτή αποδείχθηκε ότι ήταν η μέγιστη που μπορούσε να επιτευχθεί για έναν αιώνα.

### **1767**

Ο Ελβετός επιστήμονας Horace de Saussure κατασκευάζει τον πρώτο ηλιακό συλλέκτη, ο οποίος στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε από τον Sir John Herschel για μαγειρικούς σκοπούς κατά τη διάρκεια παραμονής του στην νότια Αφρική το 1830.



### **1816**

Στις 27 Σεπτεμβρίου 1816, ο Robert Stirling στον Εδιμβούργο της Σκωτίας κατασκευάζει την πρώτη θερμική μηχανή, η οποία αργότερα χρησιμοποιήθηκε σε σύστημα παραβολικού πιάτου – μηχανής Stirling.

### **1862**

Ο Lavoisier χρησιμοποιεί τεράστιους γυάλινους φακούς για την συγκέντρωση των ηλιακών ακτινών και την εκμετάλλευσή τους για διύλιστικούς σκοπούς.

### **1864**

Ο Γάλλος μαθηματικός August Mouchot προτείνει την ιδέα των ατμογεννητριών που τροφοδοτούνται από ηλιακή ενέργεια. Μεταξύ 1864 – 1878 κατασκευάζει αρκετές γεννήτριες, μια εκ των οποίων στην Αλγερία. Ανασταλτικός παράγοντας στην εξέλιξη αυτών των γεννητριών υπήρξε το μεγάλο κόστος, ώσπου το 1875 ο Mouchot κατασκευάζει έναν ανακλαστή σχήματος κόλουρου κώνου, διαμέτρου 5.4m και συγκεντρωτική επιφάνεια ίση με 18.6m<sup>2</sup>. Διάδοχος του Mouchot υπήρξε ο βοηθός του, Pifre, ο οποίος κατασκεύασε παραβολικούς ανακλαστές που αποτελούνταν από πολύ μικρούς καθρέπτες. Σχηματικά, έμοιαζαν πολύ με αυτούς του Mouchot.

### **1874**

Ηλιακοί αποστακτήρες χρησιμοποιούνται για την εξάτμιση αλμυρού νερού. Το πρώτο τέτοιο πάρκο κατασκευάστηκε στην Χιλή και λειτούργησε για 40 χρόνια. Ο κάθε ηλιακός αποστακτήρας ήταν επιφάνειας 4700m<sup>2</sup> και παρήγαγε 23000 lt καθαρού νερού ημερησίως.

### **1891**

Ο Clarence Kemp σχεδιάζει τον πρώτο εμπορικό ηλιακό θερμαντή νερού.

### **1901**

Ο A.G. Eneas εγκαθιστά έναν συγκεντρωτικό συλλέκτη διαμέτρου 10m σε μια καλιφορνέζικη φάρμα. Η συσκευή είχε άνοιγμα σχήματος ομπρέλας το οποίο συνέκλινε σε μια γωνία έτσι ώστε να δέχεται τη μέγιστη ποσότητα των ηλιακών ακτινών πάνω στους 1788 καθρέπτες, οι οποίοι κάλυπταν την εσωτερική επιφάνεια. Οι ηλιακές ακτίνες, εν συνεχεία, συγκεντρώνονταν σε ένα εστιακό σημείο, όπου ήταν τοποθετημένη μια δεξαμενή με νερό, το οποίο θερμαινόταν, παρήγαγε ατμό και τροφοδοτούσε την γεννήτρια.

### **1904**

Ένας Πορτογάλος ιερέας, ο Himalaya, κατασκευάζει έναν τεράστιο ηλιακό κλίβανο, ο οποίος αποτελείται από έναν παραβολικό συλλέκτη.

### **1908**

Ο William J. Bailey της εταιρίας “Canergie Steel Company” εφεύρει έναν ηλιακό συλλέκτη σχήματος μονωμένου κουτιού.

### **1912**

Ο Shuman κατασκευάζει το μεγαλύτερο πάρκο άντλησης στην Αίγυπτο. Το πάρκο αποτελείται από παραβολικούς κυλίνδρους μεγάλου μήκους, οι οποίοι απορροφούσαν την ηλιακή ακτινοβολία σε έναν απορροφητικό σωλήνα. Κάθε κύλινδρος είχε μήκος 62m και η συνολική επιφάνεια ήταν ίση με 1200m<sup>2</sup>. Η γεννήτρια παρήγαγε 37 – 45kW κατά την 5ωρη λειτουργία της. Η λειτουργία του πάρκου άρχισε το 1913 και παρά την επιτυχία του, έκλεισε δυο χρόνια μετά εξαιτίας του πρώτου Παγκοσμίου πολέμου και των φτηνών τιμών του πετρελαίου.

### **1935**

Εισάγεται η ιδέα χρησιμοποίησης του ήλιου για θέρμανση νερού καθώς επίσης και κατοικιών. Πραγματικό ενδιαφέρον εκδηλώθηκε στο δεύτερο μισό του 1940. Μέχρι τότε, εκατομμύρια σπίτια θερμαίνονταν μέσω καυστήρων που λειτουργούσαν με κάρβουνο.

### **1960**

Στις αρχές του 1960, ξεκινά η μαζική παραγωγή ηλιακών θερμαντών νερού. Τυπική μορφή αυτών είναι οι θερμαντές τύπου θερμοσίφωνου, οι οποίοι αποτελούνται από δυο επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες, απορροφητικής επιφάνειας 3 – 4m<sup>2</sup>, δεξαμενής αποθήκευσης της τάξης των 150 – 180 lt και μιας ψυχρής δεξαμενής αποθήκευσης νερού.

### **1982**

Το αμερικανικό υπουργείο ενέργειας σε συνεργασία με μια μεγάλη βιομηχανία ξεκινούν την λειτουργία του ηλιακού πάρκου Solar One, το οποίο αποτελείται από συγκεντρωτικούς συλλέκτες.

### **1986**

Το μεγαλύτερο ηλιακό πάρκο, εγκατεστημένο στην Καλιφόρνια, ξεκινά τη λειτουργία του. Αποτελείται από σειρές καθρεπτών που συλλέγουν την ηλιακή



ακτινοβολία και την μεταφέρουν σε σύστημα σωλήνων, στο εσωτερικό των οποίων κυκλοφορεί το εργαζόμενο μέσο. Το εργαζόμενο μέσο χρησίμευε στην παραγωγή ατμού, ο οποίος τροφοδοτούσε τη γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρισμού.

### **1996**

Το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ αποφασίζει την αναβάθμιση του ηλιακού πάρκου Solar One και την κατασκευή του ηλιακού πάρκου Solar Two, που χρησιμοποιεί συλλέκτες τεχνολογίας πύργων ισχύος. Η παραγωγή ενέργειας ακόμη και υπό δυσμενείς ηλιακές συνθήκες, καθώς επίσης και το ελάχιστο κόστος στρέφουν το εμπορικό ενδιαφέρον προς τους πύργους ισχύος. Η λειτουργία του πάρκου αυτού λήγει το 1999.

### **2000**

Τα διεθνή εργαστήρια Sandia αναπτύσσουν έναν καινούριο εναλλάκτη για ηλιακά συστήματα, ο οποίος παρέχει μεγαλύτερη ασφάλεια κατά την μετατροπή του συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο.

## ΗΛΙΑΚΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ

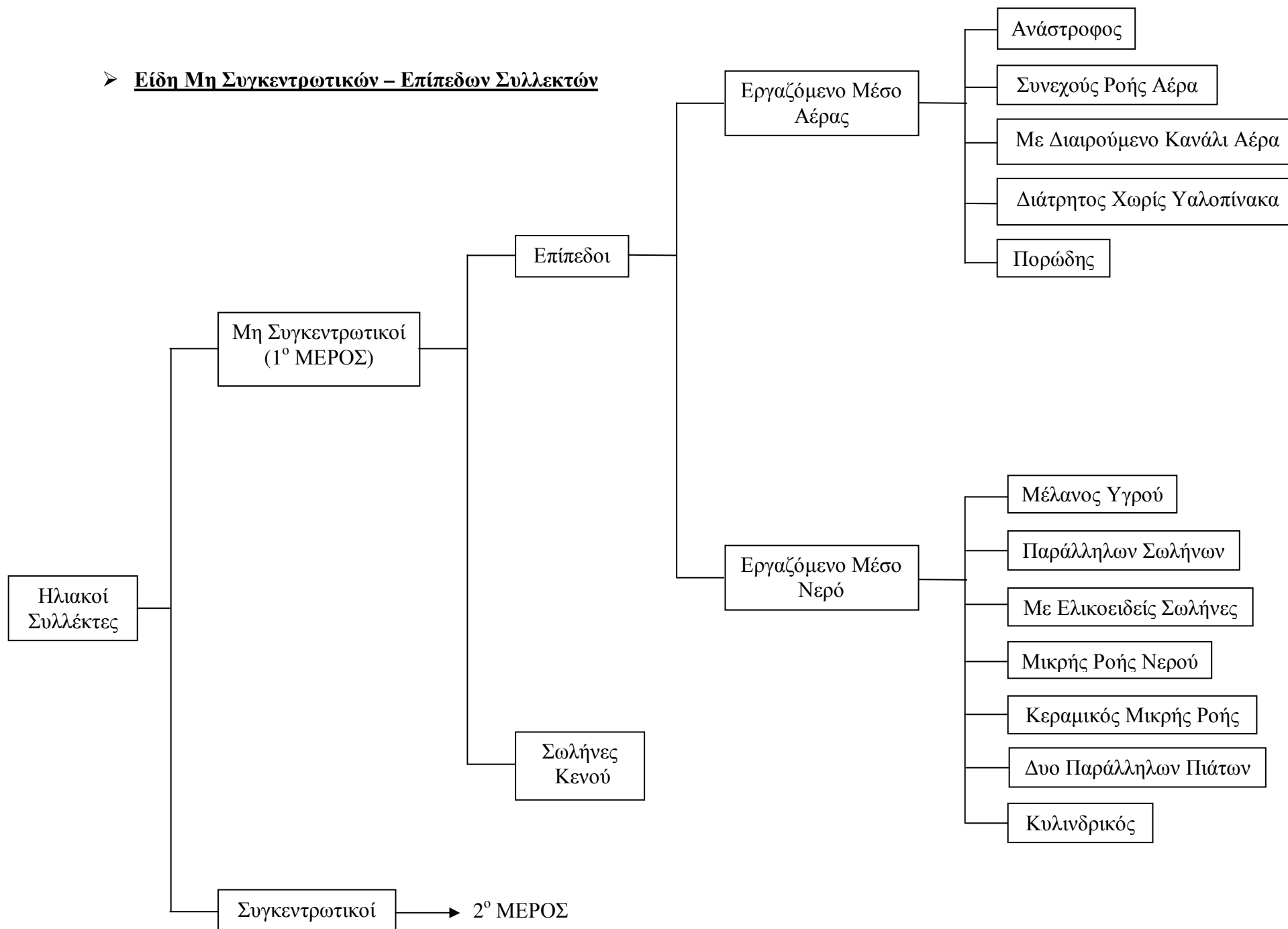
Οι ηλιακοί συλλέκτες αποτελούν ένα είδος θερμικού εναλλάκτη, ο οποίος μετατρέπει την ηλιακή ακτινοβολία σε ενέργεια. Απορροφά την εισερχόμενη ακτινοβολία, την μετατρέπει σε θερμότητα και την μεταφέρει στο εργαζόμενο μέσο (συνήθως είναι αέρας, νερό ή λάδι) που ρέει στο εσωτερικό του συλλέκτη. Στη συνέχεια, η ηλιακή ενέργεια μεταφέρεται από το εργαζόμενο μέσο είτε κατευθείαν στο θερμό νερό είτε σε μια δεξαμενή αποθήκευσης.

Οι ηλιακοί συλλέκτες διακρίνονται σε δυο βασικές κατηγορίες: μη συγκεντρωτικοί και συγκεντρωτικοί. Ο μη συγκεντρωτικός συλλέκτης χρησιμοποιεί την ίδια επιφάνεια για τη συλλογή και απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ ο συγκεντρωτικός αποτελείται από κοίλες ανακλαστικές επιφάνειες για τη συλλογή της ακτινοβολίας, την οποία και συγκεντρώνει σε μια μικρότερη επιφάνεια αυξάνοντας κατά αυτόν τον τρόπο τη ροή ενέργειας.

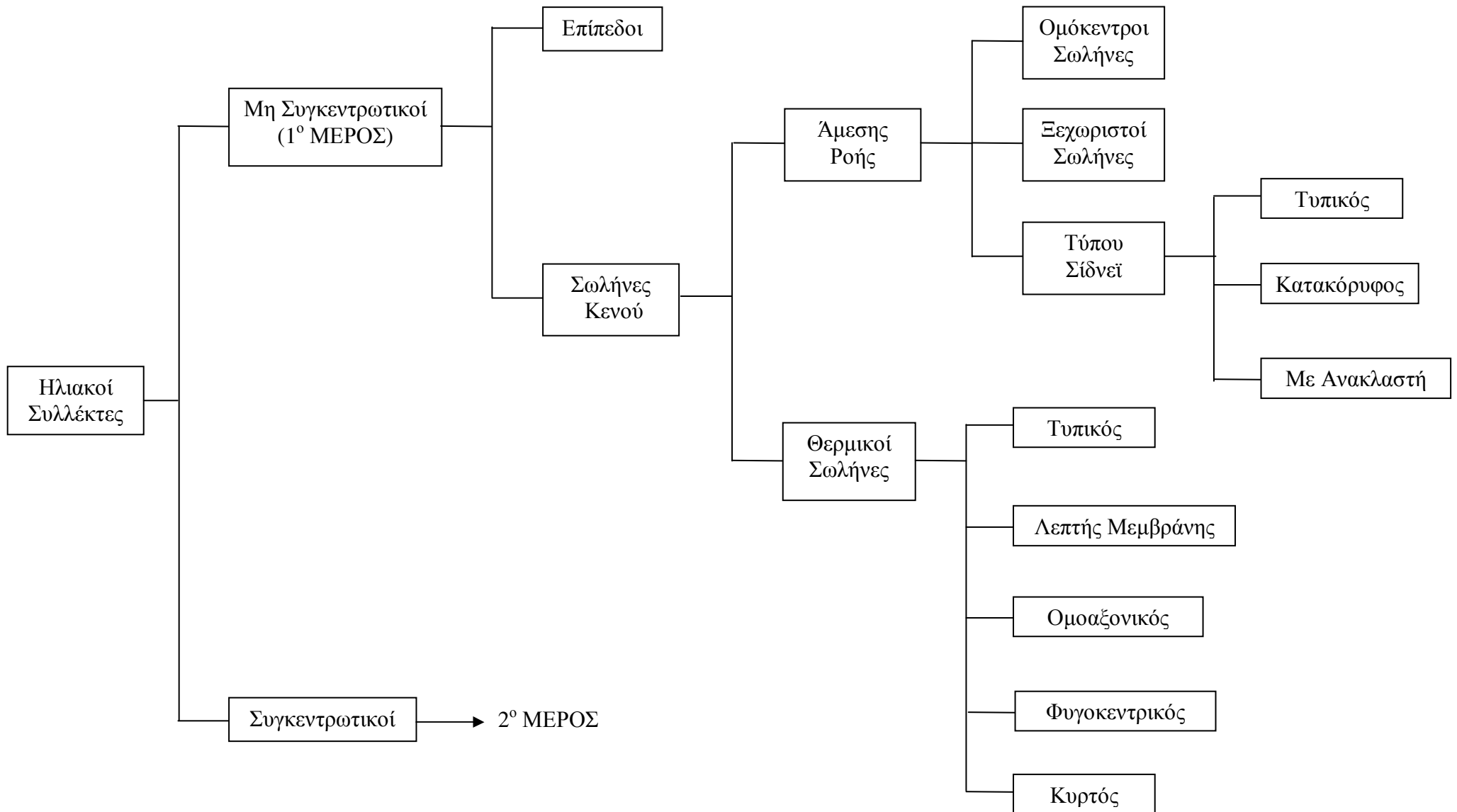
Στους μη συγκεντρωτικούς συλλέκτες ανήκουν οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες (FPC) και οι σωλήνες κενού (ETC).

Οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες χωρίζονται σε μονού και διπλού άξονα εντοπισμού. Στην πρώτη κατηγορία συναντούμε τον γραμμικό ανακλαστή Fresnel (LFR) και τον παραβολικό συλλέκτη σχήματος σκάφης (PTC), υποκατηγορία του οποίου αποτελούν οι σύνθετοι παραβολικοί συλλέκτες (CPC) και ο κυλινδρικός συλλέκτης σχήματος σκάφης (CTC). Όλοι οι συλλέκτες έχουν σωληνοειδή απορροφητή. Στην κατηγορία του διπλού εντοπισμού ανήκουν οι παραβολικοί δίσκοι (PDR) και οι ηλιοστάτες (HFC). Και οι δυο συλλέκτες έχουν σημειακό απορροφητή.

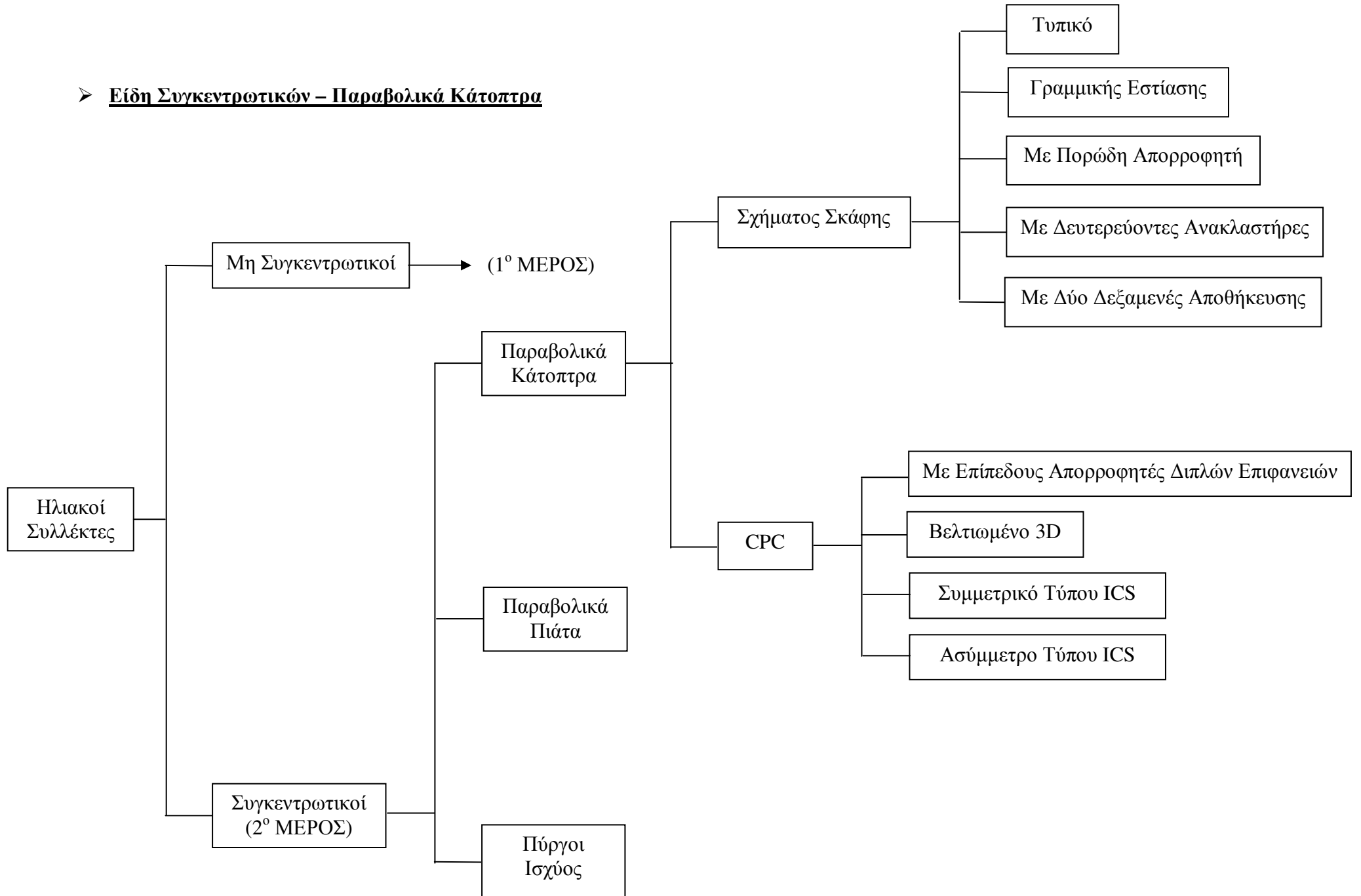
➤ Είδη Μη Συγκεντρωτικών – Επίπεδων Συλλεκτών



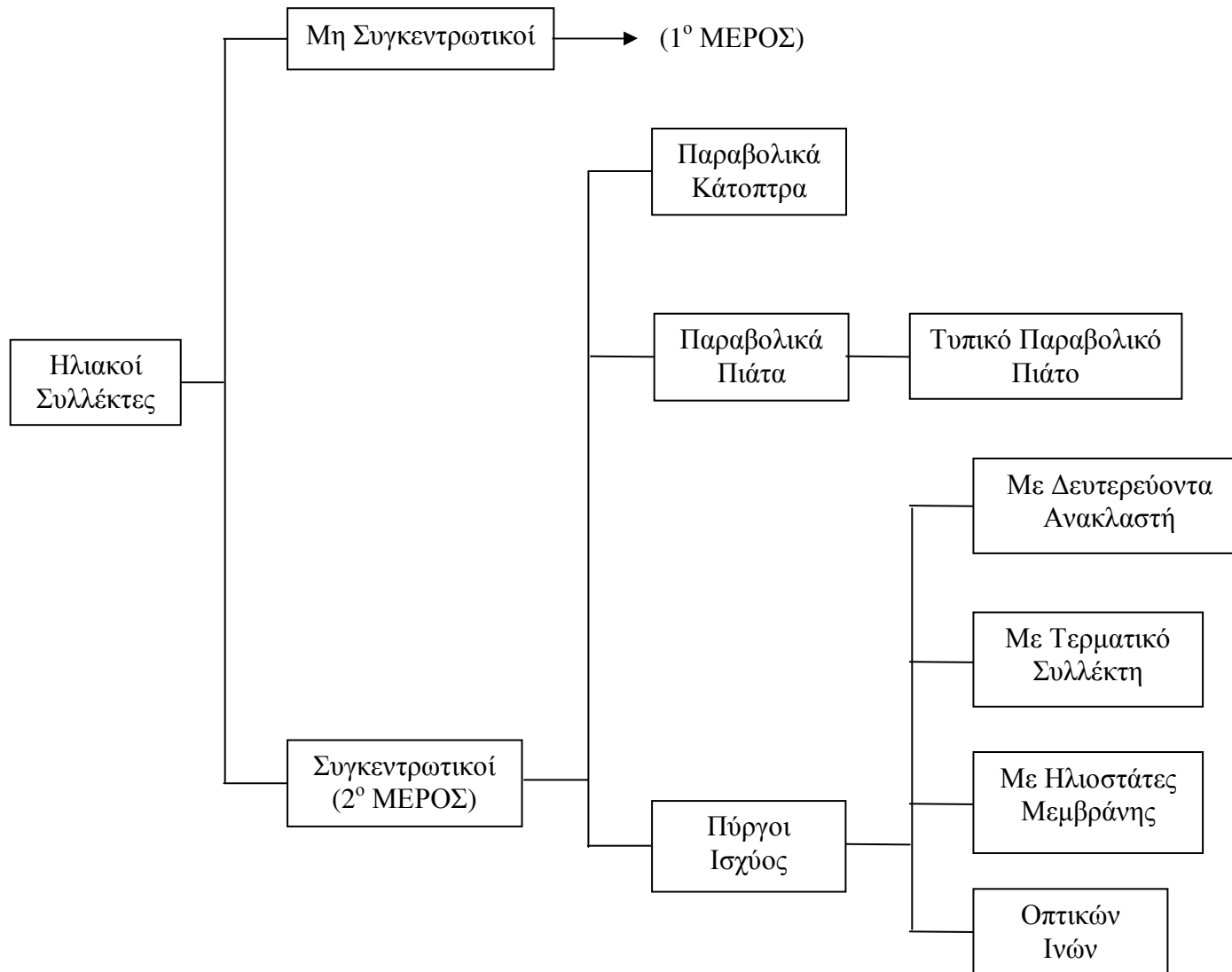
➤ Είδη Μη Συγκεντρωτικών – Σωλήνων Κενού



➤ Είδη Συγκεντρωτικών – Παραβολικά Κάτοπτρα



➤ Είδη Συγκεντρωτικών – Παραβολικά Πιάτα και Πύργοι Ισχύος



## ΜΕΡΟΣ 1<sup>ο</sup>

### ΜΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΙ ΗΛΙΑΚΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ

#### 1. ΕΠΙΠΕΔΟΙ ΗΛΙΑΚΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ

Ένας τυπικός επίπεδος ηλιακός συλλέκτης απεικονίζεται στο σχήμα 1. Αφού η ηλιακή ακτινοβολία προσπέσει στο διαφανές κάλυμμα και απορροφηθεί από την επιφάνεια απορρόφησης, ένα μεγάλο μέρος της απορροφάται από το πιάτο και μεταφέρεται στο εργαζόμενο μέσο που ρέει στις σωληνώσεις.

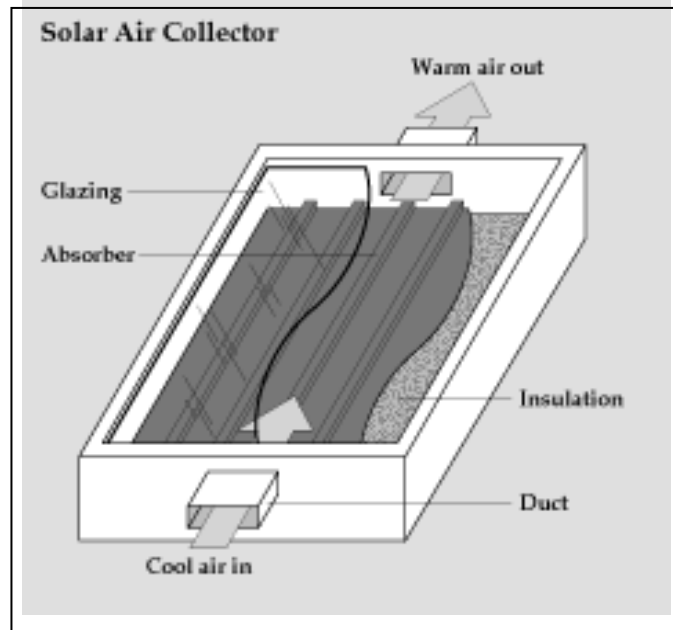
Το κάτω μέρος του απορροφητικού πιάτου καθώς επίσης και το κάλυμμα είναι καλά μονωμένα έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες θερμότητας. Οι σωλήνες, μέσα στους οποίους ρέει το εργαζόμενο μέσο, μπορεί να είναι είτε συγκολλημένοι στο απορροφητικό πιάτο είτε να αποτελούν αναπόσπαστο μέρος του.

Το διαφανές κάλυμμα χρησιμοποιείται για την ελαχιστοποίηση των απωλειών μεταξύ του απορροφητικού πιάτου και του σταθερού στρώματος αέρα που βρίσκεται ανάμεσα στο απορροφητικό πιάτο και τον υαλοπίνακα.

Οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες είναι κατά κύριο λόγο στάσιμοι, δηλαδή δεν απαιτούν σύστημα ανίχνευσης του ήλιου. Οι συλλέκτες προσανατολίζονται προς τον Ισημερινό, με άλλα λόγια στο βόρειο ημισφαίριο έχουν κατεύθυνση προς το νότο και αντίστροφα. Η βέλτιστη κλίση του συλλέκτη ισούται με το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής και ποικίλλει από 10 – 15°.

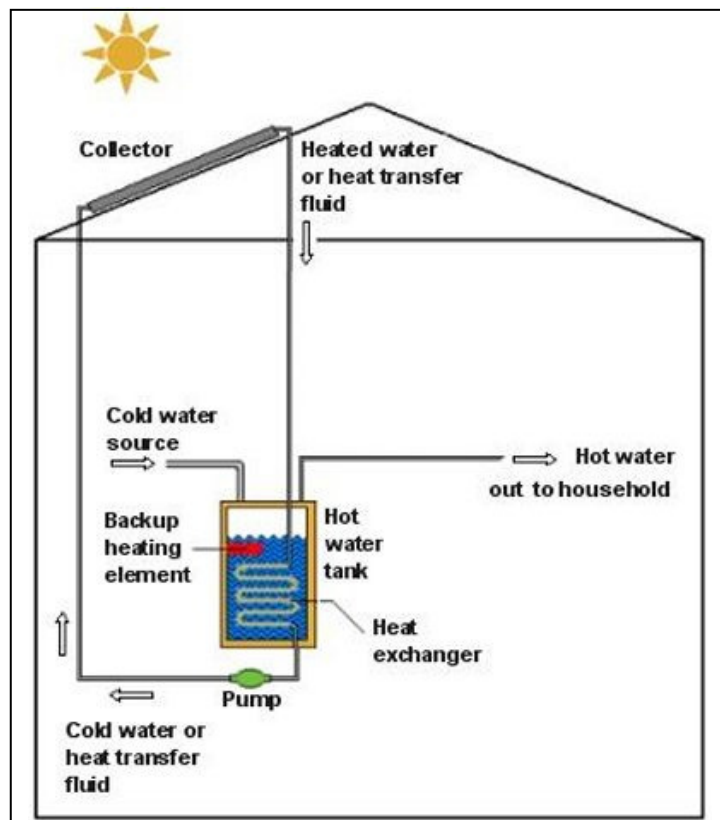
Οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες διακρίνονται σε συλλέκτες με εργαζόμενο μέσο αέρα (σχήμα 1) και σε αυτούς των οποίων το εργαζόμενο μέσο είναι κάποιο υγρό (σχήμα 2) (συνηθέστερη είναι η χρήση νερού). Οι συλλέκτες με αέρα χρησιμοποιούνται για θέρμανση κτιρίων και αποξήρανση σοδειών, ενώ οι συλλέκτες με νερό είναι πιο διαδεδομένοι στην θέρμανση πισίνων. Και οι δύο κατηγορίες συλλεκτών μπορεί να απαιτούν υαλοπίνακα στην κατασκευή τους αλλά μπορεί και να μην απαιτούν (σχήματα 3, 3Α). Μια ειδική περίπτωση των συλλεκτών αέρα με υαλοπίνακα αποτελούν οι συλλέκτες back – pass, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για θέρμανση χώρων.

Συγκρίνοντας τις δυο κατηγορίες επίπεδων συλλεκτών παρατηρούμε ότι οι αέριοι συλλέκτες είναι πιο ελαφροί, δεν αντιμετωπίζουν προβλήματα πήξης του εργαζόμενου μέσου ή υπερθέρμανσής του, ενώ από την άλλη πλευρά μειονεκτούν όσον αφορά την αποθηκευτική ικανότητα του αέρα.



Σχήμα 1

Τυπικός επίπεδος ηλιακός συλλέκτης με εργαζόμενο μέσο αέρα



Σχήμα 2

Τυπικός ηλιακός συλλέκτης με εργαζόμενο μέσο υγρό





Σχήμα 3  
Ηλιακός συλλέκτης με υαλοπίνακα



Σχήμα 3<sup>A</sup>  
Ηλιακός συλλέκτης χωρίς υαλοπίνακα

## 1.1 ΕΠΙΠΕΔΟΙ ΗΛΙΑΚΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ ΜΕ ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΟ ΜΕΣΟ ΑΕΡΑ

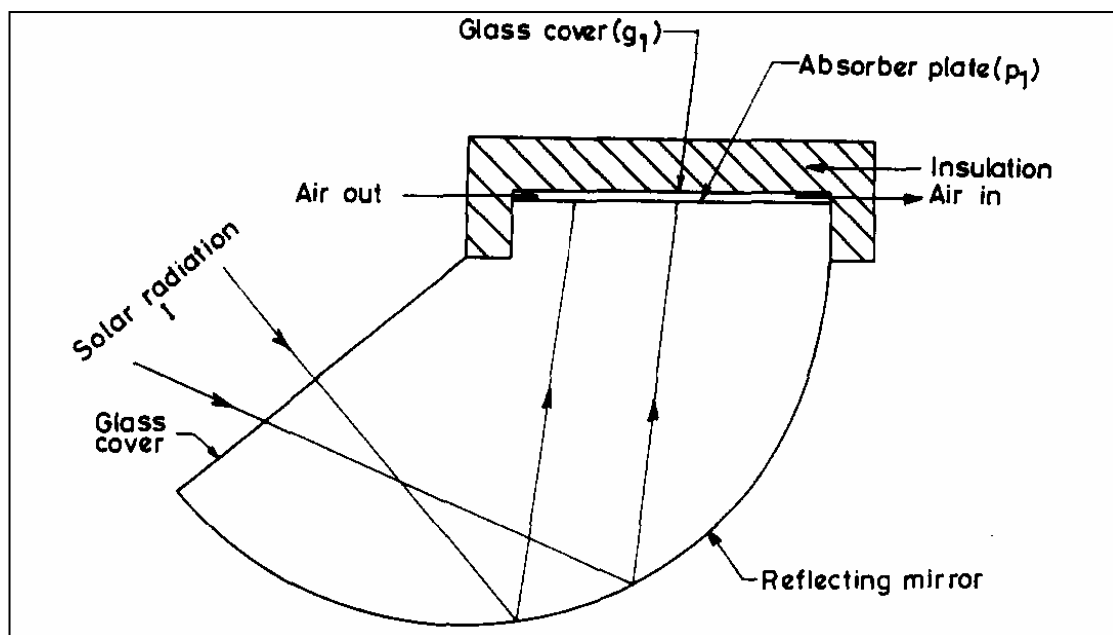
### 1.1.1 ΑΝΑΣΤΡΟΦΟΣ ΕΠΙΠΕΔΟΣ ΗΛΙΑΚΟΣ ΣΥΛΛΕΚΤΗΣ

#### ΓΕΝΙΚΑ

Οι συμβατικοί ηλιακοί συλλέκτες μπορούν να χρησιμοποιήσουν αέρα με μέγιστη θερμοκρασία ίση με  $100^{\circ}\text{C}$ . Ήταν επομένως αναγκαίο να εφευρεθούν ηλιακοί συλλέκτες που να υπερκεράσουν αυτόν τον περιορισμό. Αυτό πραγματοποιείται όταν οι θερμικές απώλειες μέσω συναγωγής και ακτινοβολίας ελαττωθούν. Ένας τρόπος είναι η χρήση ανάστροφου συλλέκτη, ο οποίος δίνει την δυνατότητα συλλογής της ηλιακής ακτινοβολίας σε υψηλή θερμοκρασία της τάξης των  $200^{\circ}\text{C}$ .

#### ΔΟΜΗ

Η δομή ενός ανάστροφου ηλιακού συλλέκτη φαίνεται στο σχήμα 1.

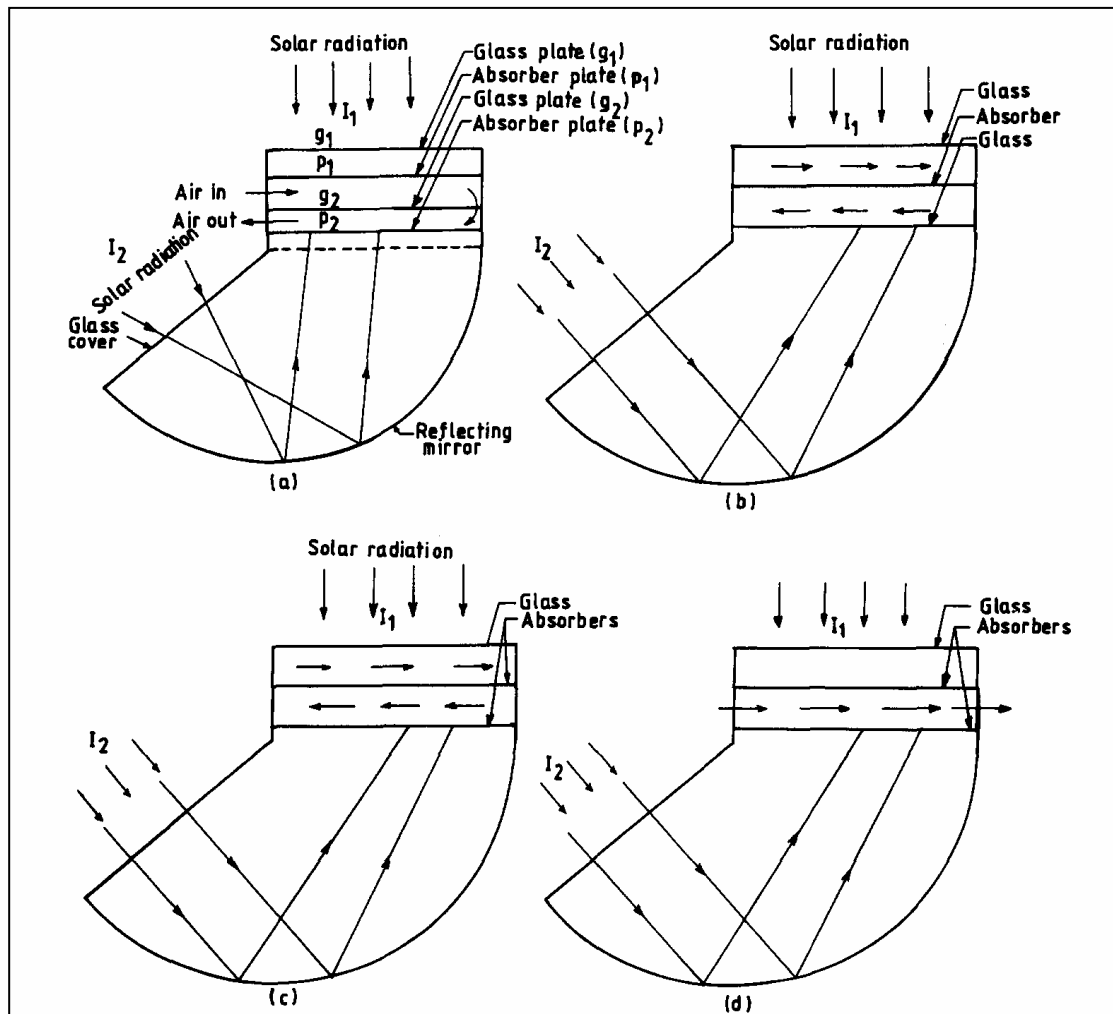


Σχήμα 1  
Ανάστροφος ηλιακός συλλέκτης

Το απορροφητικό πιάτο είναι οριζόντια τοποθετημένο και με φορά προς τα κάτω. Ένας κυλινδρικός ανακλαστής τοποθετείται στο κάτω μέρος του πιάτου, έτσι ώστε να δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία. Η διατομή εισόδου είναι ίση με τη διατομή του απορροφητικού πιάτου, ενώ ο λόγος συγκέντρωσης είναι 1:1 [1]. Επομένως,

μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η χρήση θερμού απορροφητικού πιάτου που έρχεται σε επαφή με τα στρώματα αέρα, περιορίζει τις θερμικές απώλειες λόγω συναγωγής και παράλληλα ο μεγάλος λόγος μήκους ανατολικής – δυτικής κατεύθυνσης προς το μήκος βόρειας – νότιας κατεύθυνσης (K) μειώνει τις απώλειες από ακτινοβολία.

Εκτός από τον παραπάνω ανάστροφο επίπεδο ηλιακό συλλέκτη, έχουν βρεθεί και κάποιες άλλες εκδοχές που παριστάνονται στο σχήμα 2.

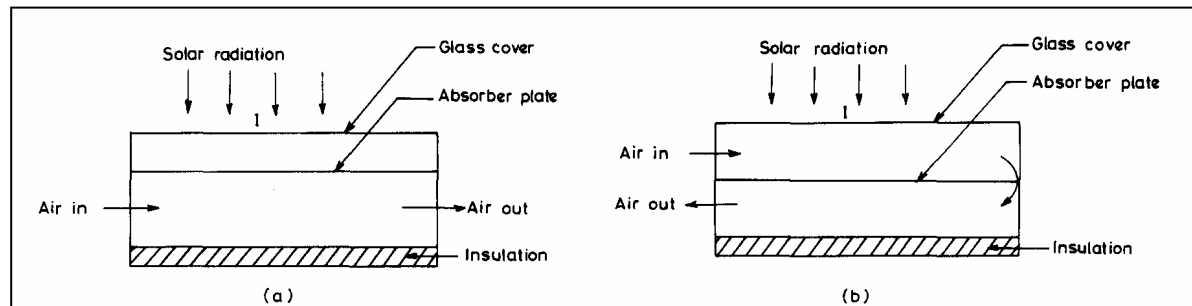


Σχήμα 2

Παραλλαγές ανάστροφου ηλιακού συλλέκτη

Οι προτεινόμενες αυτές παραλλαγές συλλέκτη δέχονται την ηλιακή ακτινοβολία τόσο από τις κεκλιμένες πλευρές όσο και από την μπροστινή, σε αντίθεση με τον αρχικό ανάστροφο συλλέκτη, ο οποίος δέχεται ακτινοβολία μόνο από τις κεκλιμένες πλευρές του. Οι συλλέκτες του σχήματος 2 (a-c) είναι διπλής κατεύθυνσης, ενώ το σχήμα 2d αναπαριστά συλλέκτη μονής κατεύθυνσης.

Για να έχουμε μια σφαιρική άποψη του θέματος, στο σχήμα 3 φαίνονται οι τυπικοί ηλιακοί συλλέκτες μονής και διπλής κατεύθυνσης αντίστοιχα.



Σχήμα 3

Συλλέκτες μονής και διπλής κατεύθυνσης

### ΑΝΑΛΥΣΗ

Για την ενεργειακή ανάλυση των συλλεκτών [1] επιλέγουμε να μελετήσουμε τους συλλέκτες του σχήματος 2 (α) και 3 (β).

#### Ανάστροφος συλλέκτης (σχήμα 2α)

Ο ενεργειακός ισολογισμός για κάθε τμήμα ξεχωριστά είναι:

Στην γυάλινη επιφάνεια επικάλυψης (g1):

$$\alpha_g I_1 = h_{c,g1w} (T_{g1} - T_a) + h_{\tau,g1s} (T_{g1} - T_s) + h_{\tau,g1p1} (T_{g1} - T_{p1}) + h_{c,g1f1} (T_{g1} - T_{f1}) \quad (1)$$

Στο απορροφητικό πιάτο (p1):

$$\tau_g \alpha_{p1} I_1 + h_{\tau,g1p1} (T_{g1} - T_{p1}) + h_{c,fp1} (T_f - T_{p1}) = h_{c,p1f1} (T_{p1} - T_{f1}) + h_{r,p1g2} (T_{p1} - T_{g2}) \quad (2)$$

Στον αέρα (f):

$$h_{c,glf}(T_{gl} - T_f) = h_{c,fp1}(T_f - T_{p1}). \quad (3)$$

Στο απορροφητικό πιάτο (p2)

$$\tau_{gy} N \alpha_{p2} T_2 = h_{c,p2f2} (T_{p2} - T_{f2}) + h_{r,p2g2} (T_{p2} - T_{g2}) \quad (4)$$

Στο γυάλινο πιάτο (g2):

$$\begin{aligned} h_{r,plg2} (T_{p1} - T_{g2}) + h_{c,flg2} (T_{f1} - T_{g2}) + h_{r,p2g2} (T_{p2} - T_{g2}) = \\ = h_{c,g2f2} (T_{g2} - T_{f2}) \end{aligned} \quad (5)$$

Στο θερμό εργαζόμενο μέσο (f2):

$$h_{c,p2f2} (T_{p2} - T_{f2}) + h_{c,g2f2} (T_{g2} - T_{f2}) = -\frac{m\dot{C}_f}{d} \frac{dT_{f2}}{dx} \quad (6)$$

όπου το ( - ) στο δεύτερο μέλος της εξίσωσης δικαιολογείται από τη φορά κίνησης του εργαζόμενου μέσου.

Οι οριακές συνθήκες είναι:

$$T_{f1} = T_a \text{ για } x = 0$$

$$T_{f2} = T_{f1} \text{ για } x = L \quad (7)$$

Μετά από μαθηματικές πράξεις και συνδυασμό των παραπάνω επτά εξισώσεων, καταλήγουμε σε δύο μη γραμμικές διαφορικές εξισώσεις:

$$A \frac{dT_{f1}}{dx} = A_1 T_{f1} + A_2 T_{f2} + A_3 \quad (8a)$$

$$B \frac{dT_{f2}}{dx} = B_1 T_{f2} + B_2 T_{f1} + B_3, \quad (8b)$$

όπου οι σταθερές  $A, A_1, A_2, A_3$  και  $B, B_1, B_2, B_3$  εξαρτώνται από παραμέτρους του συλλέκτη και του εργαζόμενου μέσου.

Επιλύοντας τις παραπάνω διαφορικές εξισώσεις ως προς  $T_{f1}$  και  $T_{f2}$  έχουμε:

$$T_{f1} = 1/B_2 [C_1 \exp(D_+x) (BD_+ - B_1) + C_2 \exp(D_-x) (BD_- - B_1) - B_1C_3 - B_3] \quad (9)$$

$$T_{f2} = C_1 \exp(D_+x) + C_2 \exp(D_-x) + C_3 \quad (10)$$

όπου:

$$D_{\pm} = [AB_1 + A_1B \pm \{(AB_1)^2 + (A_1B)^2 - 2AB(A_1B_1 - 2A_2B_2)\}^{1/2}]/2AB,$$

$$C_1 = [T_a B_2 + B_1/C_3 + B_3 - C_2(BD_- - B_1)]/(BD_+ - B_1),$$

$$C_2 = \frac{[C_4(T_a B_2 + B_1 C_3 + B_3) + C_3(B_1 + B_2) + B_3]}{C_4(BD_- - B_1) - (B_1 + B_2 - BD_-)\exp(D_-L)},$$

$$C_3 = (A_3 B_2 - A_1 B_3)/(A_1 B_1 - A_2 B_2)$$

$$C_4 = (B_1 + B_2 - BD_+)\exp(D_+L)/(BD_+ - B_1).$$

Τυπικός επίπεδος ηλιακός συλλέκτης (σχήμα 3b)

Ο ενεργειακός ισολογισμός και σε αυτήν την περίπτωση είναι:

Στο γυάλινο κάλυμμα (g1):

$$\alpha_g I = h_{c,g1w} (T_{g1} - T_a) + h_{\tau,g1s} (T_{g1} - T_s) + h_{\tau,g1p1} (T_{g1} - T_{p1}) + h_{c,g1f1} (T_{g1} - T_{f1}) \quad (11)$$

Στο ρευστό (f1):

$$h_{c,p1f1}(T_{p1} - T_{f1}) = \frac{\dot{m}C_f}{d} \frac{dT_{f1}}{dx} + h_{c,g1f1}(T_{f1} - T_{g1}). \quad (12)$$

Στο απορροφητικό πιάτο (p1):

$$\tau_g \alpha_{p1} I + h_{t,g1p1} (T_{g1} - T_{p1}) = h_{c,p1f1} (T_{p1} - T_{f1}) + h_{c,p1f2} (T_{p1} - T_{f2}) + h_{r,p1pr} (T_{p1} - T_{pr}) \quad (13)$$

Στο ρευστό (f2):

$$h_{c,p1f2}(T_{p1} - T_{f2}) = \frac{C_f \dot{m}}{d} \frac{dT_{f2}}{dx} + h_{c,prf2}(T_{f2} - T_{pr}). \quad (14)$$

Στο πίσω πιάτο (pr):

$$h_{r,p1pr} (T_{p1} - T_{pr}) = U_r (T_{pr} - T_a) + h_{c,prf2} (T_{pr} - T_{f2}) \quad (15)$$

Οι οριακές συνθήκες είναι οι ίδιες με αυτές του ανάστροφου συλλέκτη και δίνονται από την εξίσωση (7). Οι εξισώσεις που δίνουν τις θερμοκρασίες  $T_{f1}$  και  $T_{f2}$  είναι της ίδιας μορφής με τις εξισώσεις (8) με μόνη διαφορά τις σταθερές A και B.

### ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Οι σταθερές μεταφοράς θερμότητας  $h_c$  (λόγω συναγωγής),  $h_r$  (λόγω ακτινοβολίας) εξαρτώνται από τον υαλοπίνακα, το πιάτο και την θερμοκρασία του αέρα σε κάθε σημείο μέσα στον συλλέκτη. Γι αυτό, είναι απαραίτητο να θεωρήσουμε κάποιες τιμές, έτσι ώστε να καταλήξουμε σε αξιόπιστα αποτελέσματα [1]. Οπότε:

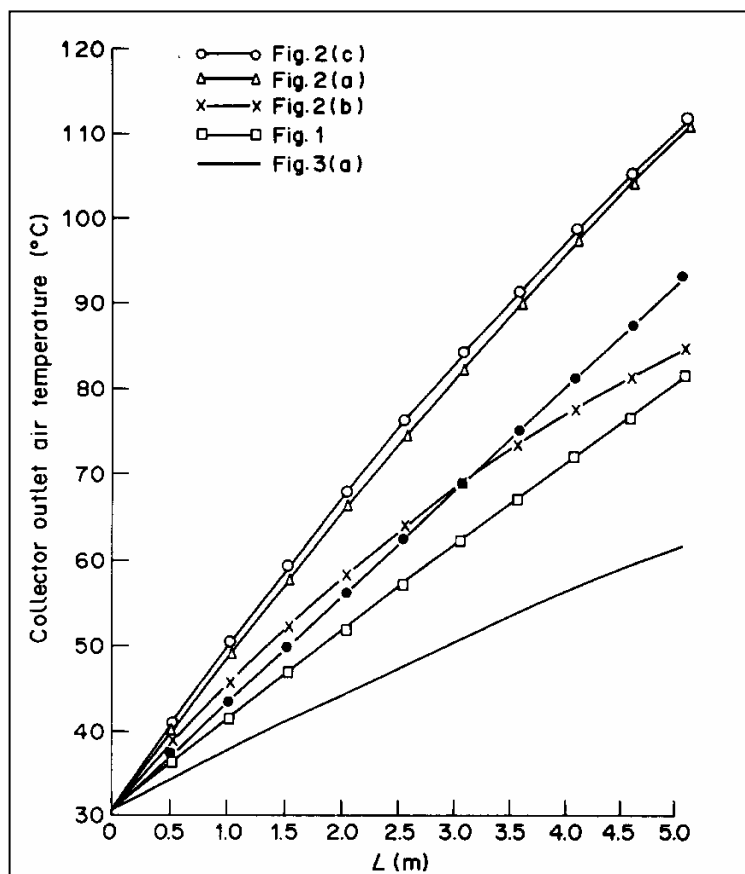
Πίνακας 1

Τιμές σταθερών ηλιακού συλλέκτη

<i>Collector Component Properties</i>
<i>Glass properties</i> Solar: $\alpha_g = 0.06$ , $\alpha_g = 0.9$ ; longwave: $\alpha_g = 0.8$ , $\alpha_g = 0.0$ ; reflectivity of the reflector $r = 0.9$ and $N = 2.5$ .
<i>Plate properties</i> Solar: $\alpha_p = 0.95$ ; longwave: $\alpha_p = 0.39$ .
<i>Insulation properties</i> Glass wool: $k_r = 0.04 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$ ; $\delta_r = 0.038 \text{ m}$ .
<i>Fluid properties (air)</i> $C_r = 1.012 \text{ kJ/kg m } ^\circ\text{C}$ .
<i>Collector dimensions and orientation</i> $\Theta = 45^\circ$ ; $L = 5 \text{ m}$ ; $d = 0.61 \text{ m}$ (north-south); flow channel depth = $0.02 \text{ m}$ .
<i>Other parameters</i> $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ ; $V = 6.4 \text{ km/h}$ ; $T_s = 25^\circ\text{C}$ ; $T_a = 31^\circ\text{C}$ ; $I = 966 \text{ W/m}^2$ .

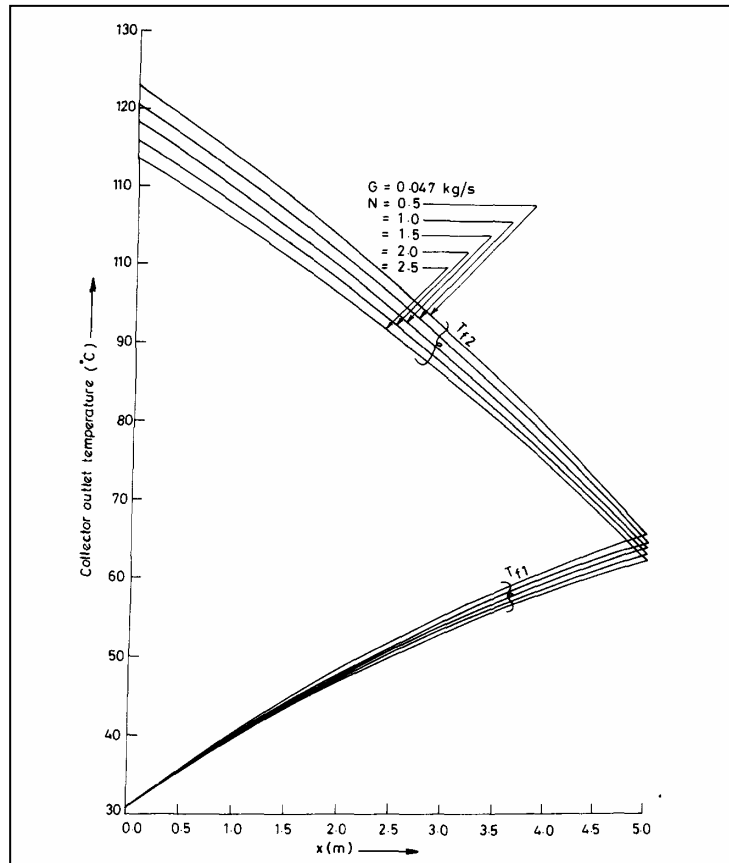
Στο σχήμα 4 φαίνεται η θερμοκρασία του αέρα στην έξοδο του από τον συλλέκτη ως συνάρτηση του μήκους του  $L$ , για τις διάφορες παραλλαγές του ανάστροφου συλλέκτη καθώς επίσης και για τον τυπικό επίπεδο ηλιακό συλλέκτη [1]. Είναι ξεκάθαρη η υπεροχή του ανάστροφου συλλέκτη διπλής κατεύθυνσης με δυο απορροφητές.





Σχήμα 4  
Θερμοκρασία αέρα στην έξοδο του συλλέκτη σε συνάρτηση με το μήκος του

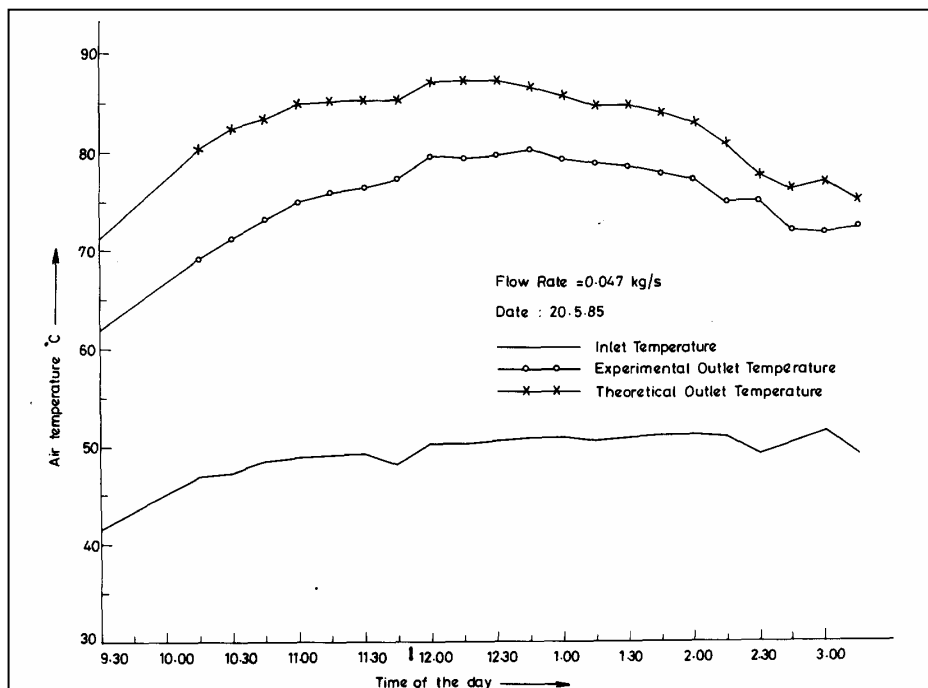
Η επίδραση του αριθμού των ανακλαστήρων ( $N$ ) σε ανάστροφο συλλέκτη διπλής κατεύθυνσης με δύο απορροφητές φαίνεται στο σχήμα 5 [1]. Είναι φανερό ότι η θερμοκρασία εξόδου του αέρα εξαρτάται από το  $N$  και επομένως και από τις διαστάσεις του συλλέκτη. Τόσο οι διαστάσεις του συλλέκτη, όσο και ο λόγος  $K$  πρέπει να επιλεγθούν με τέτοιο τρόπο ώστε ο  $N$  να είναι ελάχιστος.



Σχήμα 5

Επίδραση αριθμού ανακλαστήρων

Στο σχήμα 6 σχεδιάζεται η θερμοκρασία του αέρα σε συνάρτηση με τις ώρες της μέρας [1].



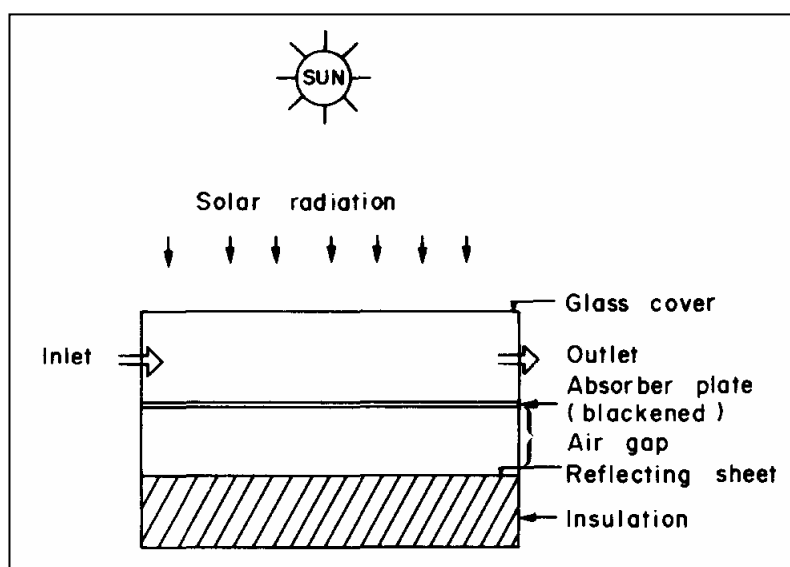
Σχήμα 6

Θερμοκρασία αέρα σε συνάρτηση με τις ώρες της μέρας

## 1.1.2 ΕΠΙΠΕΔΟΣ ΣΥΛΛΕΚΤΗΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΟΗΣ ΑΕΡΑ

### ΓΕΝΙΚΑ

Στους συλλέκτες αυτούς χρησιμοποιείται μια ανακλαστική επιφάνεια, η οποία δημιουργεί ένα κενό χώρο μεταξύ του απορροφητικού πιάτου και της μόνωσης, έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι θερμικές απώλειες που οφείλονται στο κάτω μέρος του συλλέκτη. Στο σχήμα 1 φαίνεται ένας τέτοιος συλλέκτης.



Σχήμα 1

Συλλέκτης συνεχούς ροής αέρα

### ΑΝΑΛΥΣΗ

Ο ενεργειακός ισολογισμός για το κάλυμμα, το απορροφητικό πιάτο και το κάτω μέρος του συλλέκτη [2] δίνονται από τις εξισώσεις (1), (2) και (3) αντίστοιχα.

$$d_c S + h_1 (T_f - T_c) + h_r (T_p - T_c) + U_1 (T_a - T_c) = 0 \quad (1)$$

$$d_p S + h_2 (T_f - T_p) + h_r (T_c - T_p) - C (T_p - T_b) = M_p dT_p/dt \quad (2)$$

$$C (T_p - T_b) = U_b (T_b - T_a) \quad (3)$$

Η θερμότητα που απάγει το ρευστό [2] δίνεται από την εξίσωση (4):

$$\begin{aligned}
& [h_1(T_c - T_f) + h_2(T_p - T_f)] w \, dz \\
& = w \, dz \, d\rho \, C_{\text{air}} \frac{dT_f}{dt} + m_f C_{\text{air}} \frac{dT_f}{dz} \, dz.
\end{aligned} \tag{4}$$

Επιλύοντας τις παραπάνω εξισώσεις, καταλήγουμε ότι η θερμοκρασία του ρευστού δίνεται από την εξίσωση (5):

$$T_f(z) = T_{f\phi}(z) + \sum_{n=1}^{\infty} T_{fn}(z) e^{im\omega t}. \tag{5}$$

Οι συντελεστές  $h_1$  και  $h_2$  υπολογίζονται από τον αριθμό Nusselt:

$$N_u = \frac{hd}{K}. \tag{6}$$

ενώ ο συντελεστής  $h_r$  από την εξίσωση (7):

$$\begin{aligned}
h_r = \sigma [(T_2 + 273)^2 + (T_1 + 273)^2] \\
[(T_2 + 273) + (T_1 + 273)] / \left( \frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right).
\end{aligned} \tag{7}$$

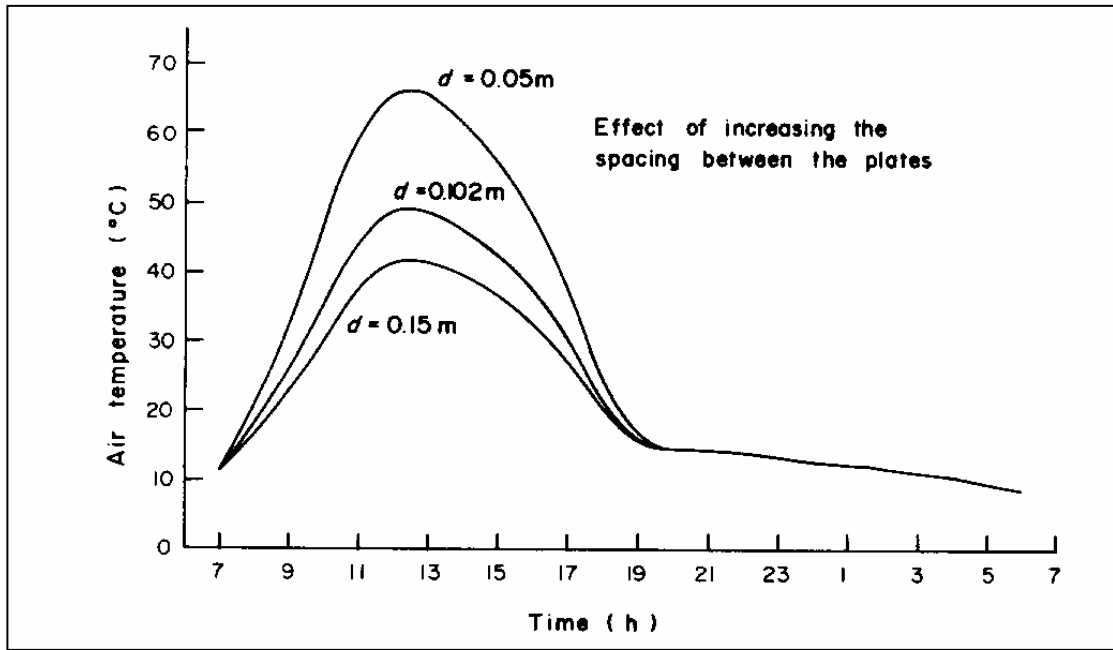
Σύμφωνα με τα παραπάνω, οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στους υπολογισμούς [2] έχουν τις τιμές:

Πίνακας 1

Τιμές παραμέτρων συλλέκτη

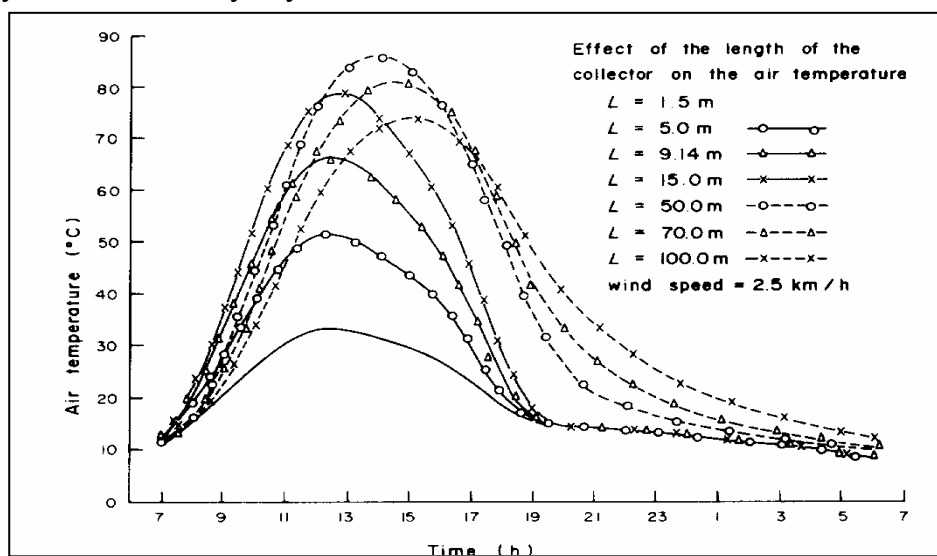
$U_t = 16.634 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$	$h_r = 8.3435 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$
$U_b = 0.7914 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$	$M_p = 8268.0 \text{ J/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$
$C = 0.7157 \text{ J/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$	$d = 0.05 \text{ m}$
$h_1 = 3.42 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$	$z = 9.14 \text{ m}$
$h_2 = 3.26 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$	$W = 0.914 \text{ m}$

Χρήση ανακλαστικής επιφάνειας που να δημιουργεί κενό αέρος ίσο με 5 cm ελάττωσε τις θερμικές απώλειες από τον απορροφητή στο περιβάλλον κατά το ήμισυ [2]. Στο σχήμα 2 φαίνεται η επίδραση της αύξησης του κενού. Παρατηρούμε ότι η θερμοκρασία του αέρα μειώνεται όταν αυξάνεται το κενό, εξαιτίας της αύξησης της ποσότητας του αέρα προς θέρμανση.



Σχήμα 2  
Επίδραση αύξησης κενού

Στο σχήμα 3 φαίνεται η επίδραση της αύξησης του μήκους του συλλέκτη. Η θερμοκρασία του αέρα αυξάνεται με την αύξηση του μήκους του συλλέκτη, μέχρι μια μέγιστη τιμή. Αν ξεπεραστεί αυτή η τιμή και ο συλλέκτης είναι υπερβολικά μεγάλου μήκους, τότε οι απώλειες αυξάνονται.

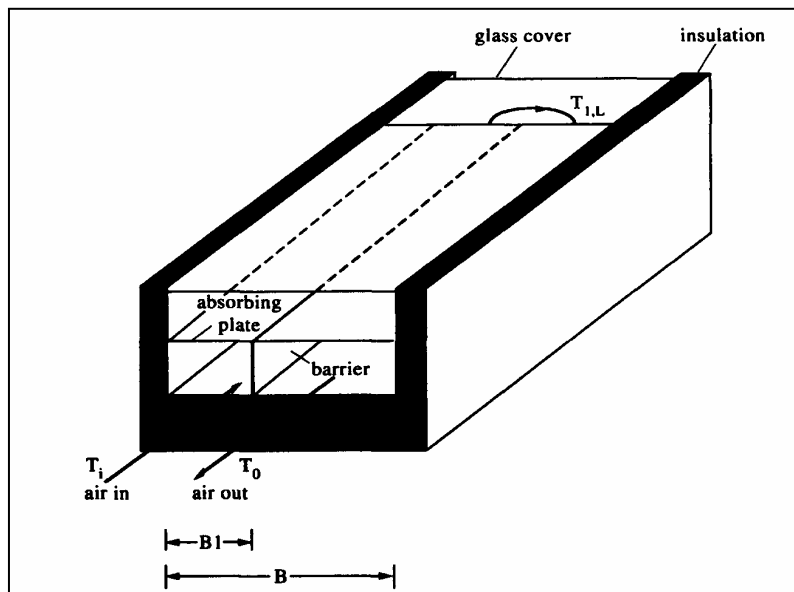


Σχήμα 3  
Επίδραση αύξησης μήκους συλλέκτη

### 1.1.3 ΕΠΙΠΕΔΟΣ ΣΥΛΛΕΚΤΗΣ ΜΕ ΔΙΑΙΡΟΥΜΕΝΟ ΚΑΝΑΛΙ ΑΕΡΑ

#### ΓΕΝΙΚΑ

Ένας τρόπος βελτίωσης της απόδοσης των επίπεδων ηλιακών συλλεκτών είναι η τοποθέτηση φραγμάτων στο κανάλι που διαρρέει ο αέρας, έτσι ώστε να δημιουργούνται δύο ή και περισσότερα παράλληλα τμήματα του καναλιού ίδιου μεγέθους. Αυτά τα τμήματα είναι συνδεδεμένα σε σειρά έτσι ώστε ο αέρας να ρέει διαδοχικά σε αυτά. Σχηματικά, ένας τέτοιος συλλέκτης παριστάνεται στο σχήμα 1.



Σχήμα 1

Επίπεδος συλλέκτης με διαιρούμενο κανάλι αέρα

#### ΑΝΑΛΥΣΗ

Στην ανάλυση που ακολουθεί [3] θεωρούμε ότι ο αέρας εισάγεται στο τμήμα 1 με θερμοκρασία  $T_1$  όπου και προθερμαίνεται μέχρι την θερμοκρασία  $T_{1,L}$ . Από εκεί εισάγεται στο τμήμα 2 και θερμαίνεται μέχρι τελική θερμοκρασία εξόδου  $T_0$ . Έτσι:

➤ *Θερμική απόδοση του τμήματος 1*

Μια εξίσωση που δίνει την θερμική απόδοση του τμήματος 1 είναι η εξίσωση 1, η οποία προκύπτει από το ενεργειακό ισοζύγιο:

$$\eta_1 = Q_{u,1}/A_{c,1}I_0 = F_{R,1}[\alpha_p\tau_g - U_{L,1}(T_i - T_a)/I_0], \quad (1)$$

όπου ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας ισούται με:

$$F_{R,1} = (\dot{m}C_p/A_{c,1}U_{L,1})\{1 - \exp[-(U_{L,1}F'_1A_{c,1}/\dot{m}C_p)]\}. \quad (2)$$

Ο συντελεστής απόδοσης του συλλέκτη δίνεται από την εξίσωση (3):

$$F'_1 = \{1 + U_{L,1}/h_1 + [(1/h_1) + (1/h_{r,1})]^{-1}\}^{-1}, \quad (3)$$

όπου ο συντελεστής ολικών απωλειών είναι το άθροισμα των απωλειών στο πάνω ( $U_{L1}$ ), κάτω και πλαϊνό μέρος του συλλέκτη ( $U_b$ ):

$$U_{L,1} = U_{t,1} + U_b. \quad (4)$$

Ο συντελεστής  $U_b$  υπολογίζεται από την σχέση:

$$U_b = k_s/l_s. \quad (5)$$

ενώ ο  $U_{L1}$  από εμπειρικούς τύπους.

Η θερμοκρασία του αέρα σε όλο το μήκος του τμήματος 1 του καναλιού υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\frac{T_1(z) - T_a - I_0\tau_g\alpha_p/U_{L,1}}{T_i - T_a - I_0\tau_g\alpha_p/U_{L,1}} = \exp\left[-\frac{A_{c,1}F'_1U_{L,1}(z/L)}{\dot{m}C_p}\right]. \quad (6)$$

Ολοκληρώνοντας την σχέση (6) από  $z = 0$  έως  $z = L$  υπολογίζουμε την μέση θερμοκρασία του αέρα:

$$\bar{T}_1 = T_i + (\eta_1 I_0 / U_{L,1} F_{R,1}) [1 - (F_{R,1} / F'_1)]. \quad (7)$$

Γνωρίζουμε ότι η μέση θερμοκρασία του πιάτου θα είναι μεγαλύτερη από αυτή του αέρα εξαιτίας της μετάδοσης θερμότητας από την απορροφητική επιφάνεια στο ρευστό. Είναι αναγκαίο να δοθεί μια σχέση για την μέση θερμοκρασία του πιάτου (8), διότι επηρεάζει τον ολικό βαθμό απόδοσης του συλλέκτη (9).

$$\bar{T}_{p,1} = T_i + (\eta_1 I_0 / U_{L,1} F_{R,1}) (1 - F_{R,1}) \quad (8)$$

$$\eta_1 = \tau_g \alpha_p - U_{L,1} (\bar{T}_{p,1} - T_a) / I_0 \quad (9)$$

Για τον καθορισμό του  $\eta_1$  θεωρούμε την παρακάτω διαδικασία [3]:

Γνωρίζοντας την γεωμετρία του συλλέκτη, τις ιδιότητες του αέρα καθώς επίσης και τις συνθήκες λειτουργίας, θεωρούμε κάποιες τιμές για τα  $T_1$  και  $T_{p1}$ . Από τις σχέσεις (7) και (8) βρίσκουμε νέες τιμές για τις θερμοκρασίες αυτές και η μέθοδος συνεχίζεται έως ότου οι ευρεθείσες τιμές συγκλίνουν με τις αρχικές.

➤ *Θερμική απόδοση του τμήματος 2*

Η μέθοδος υπολογισμού της θερμικής απόδοσης του τμήματος 2 είναι η ίδια με αυτήν του τμήματος 1 με την διαφορά ότι ο δείκτης 1 αντικαθίσταται από τον δείκτη 2. Επίσης, η θερμοκρασία εισόδου στο τμήμα 2 είναι τώρα η  $T_{1,L}$  (θερμοκρασία εξόδου από το τμήμα 1).

➤ *Συνολική απόδοση του συλλέκτη*

Η συνολική απόδοση του συλλέκτη ορίζεται ως:

$$\eta = Q_u / I_0 A_c = (Q_{u,1} + Q_{u,2}) / I_0 (A_{c,1} + A_{c,2}) \quad (10)$$

ενώ η απόδοση για κάθε τμήμα ξεχωριστά:

$$\begin{aligned} \eta_1 &= Q_{u,1} / (I_0 A_{c,1}), \\ \eta_2 &= Q_{u,2} / (I_0 A_{c,2}) \end{aligned} \quad (11)$$



Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (1) και (10) έχουμε τελικά:

$$\eta = (\eta_1 A_{c,1} + \eta_2 A_{c,2}) / A_c = \eta_1 (B_1/B) + \eta_2 [1 - (B_1/B)] \quad (12)$$

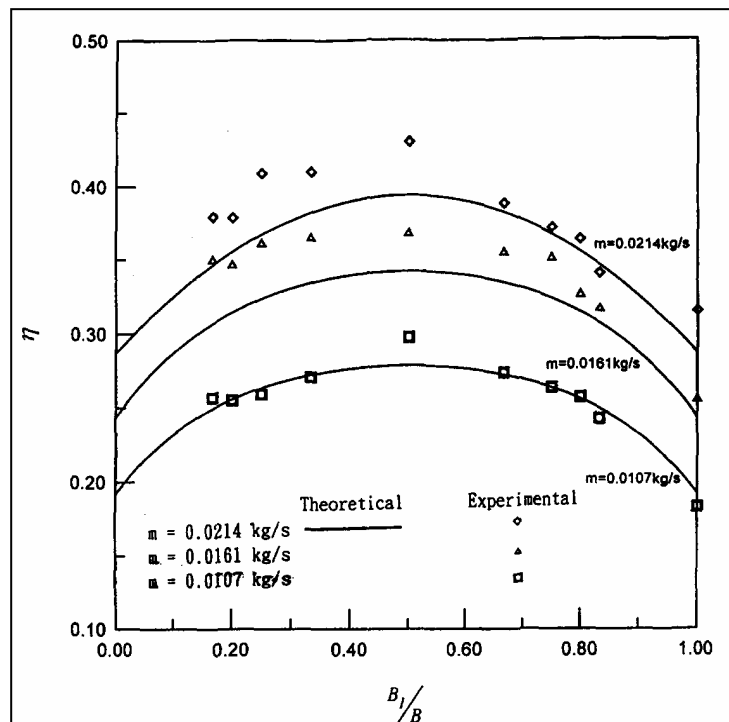
με

$$A_c = A_{c,1} + A_{c,2} = B_1 L + B_2 L = BL \quad (13)$$

όπου B το πλάτος του συλλέκτη [m].

### ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Θεωρούμε [3] συλλέκτη διαστάσεων  $L = 26.5\text{m}$ ,  $B = 159\text{cm}$ ,  $A_c = BL = 0.42132\text{m}^2$ ,  $H = 5.5\text{cm}$ ,  $\tau_g = 0.875$ ,  $\alpha_p = 0.95$ ,  $\varepsilon_p = 0.94$ ,  $\varepsilon_g = 0.94$ ,  $U_b = 0$ ,  $I_0 = 1100\text{W/m}^2$ ,  $T_a = 30^\circ\text{C}$  (θερμοκρασία περιβάλλοντος),  $T_1 = 35^\circ\text{C}$ ,  $V = 1\text{m/s}$ . Σχεδιάζουμε την γραφική παράσταση του βαθμού απόδοσης σε συνάρτηση με το  $B_1/B$ .



Σχήμα 2

Βαθμός απόδοσης συλλέκτη σε συνάρτηση με το λόγο  $B_1/B$

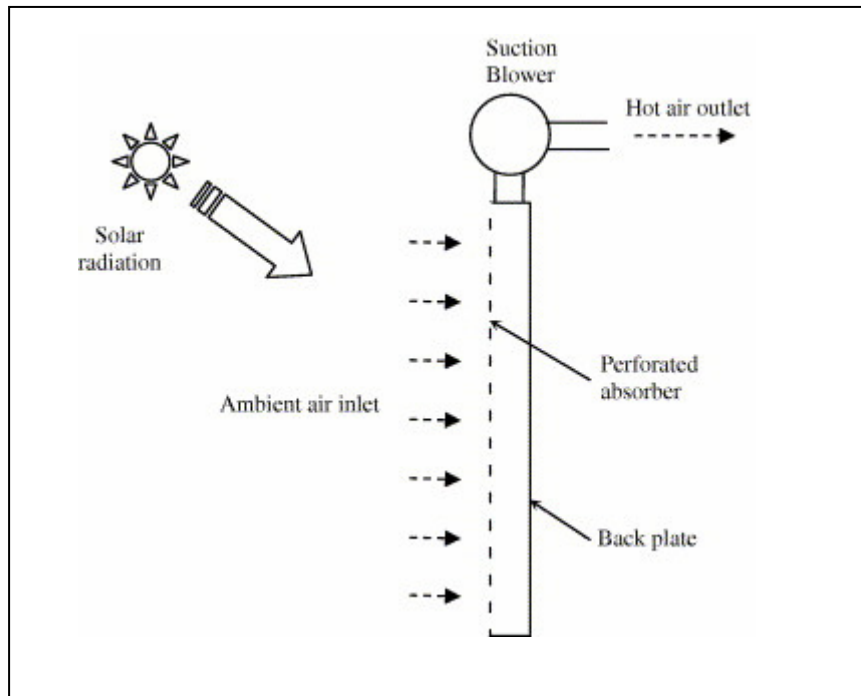
Συμπεραίνουμε ότι ο μέγιστος βαθμός απόδοσης του συλλέκτη είναι στην περίπτωση που  $B_1 = B_2$  δηλαδή  $B_1/B = 0.5$ . Επίσης όσα περισσότερα φράγματα τοποθετούμε σε ίση μεταξύ τους απόσταση, τόσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός απόδοσης του συλλέκτη.

#### 1.1.4 ΕΠΙΠΕΔΟΣ ΔΙΑΤΡΗΤΟΣ ΣΥΛΛΕΚΤΗΣ ΧΩΡΙΣ ΥΑΛΟΠΙΝΑΚΑ

##### ΓΕΝΙΚΑ

Οι επίπεδοι διάτρητοι συλλέκτες αποτελούν ανακάλυψη των τελευταίων χρόνων και σκοπό έχουν να αντικαταστήσουν τους επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες αέρα που λειτουργούν με υαλοπίνακα. Τα αποτελέσματα ερευνών ως προς την αποτελεσματικότητά τους είναι ενθαρρυντικά, για αυτό και αξίζει να αναφερθούμε σε αυτό το σημείο στην λειτουργία τους.

Ένας διάτρητος ηλιακός συλλέκτης είναι τοποθετημένος κατακόρυφα και αποτελείται από έναν διάτρητο απορροφητή και ένα πιάτο στο πίσω μέρος του συλλέκτη, τα οποία διαχωρίζονται από ένα κενό αέρος. Τα κενά κατά μήκος των τεσσάρων πλευρών του απορροφητή κλείνουν κατά τέτοιο τρόπο ώστε να σχηματίζουν ένα κουτί. Ένας ανεμιστήρας είναι τοποθετημένος στην κορυφή του συλλέκτη και παρέχει την απαιτούμενη ποσότητα αέρα κατά την διάρκεια της λειτουργίας του συλλέκτη. Σχηματική διάταξη του συλλέκτη παρέχει το σχήμα 1.



Σχήμα 1

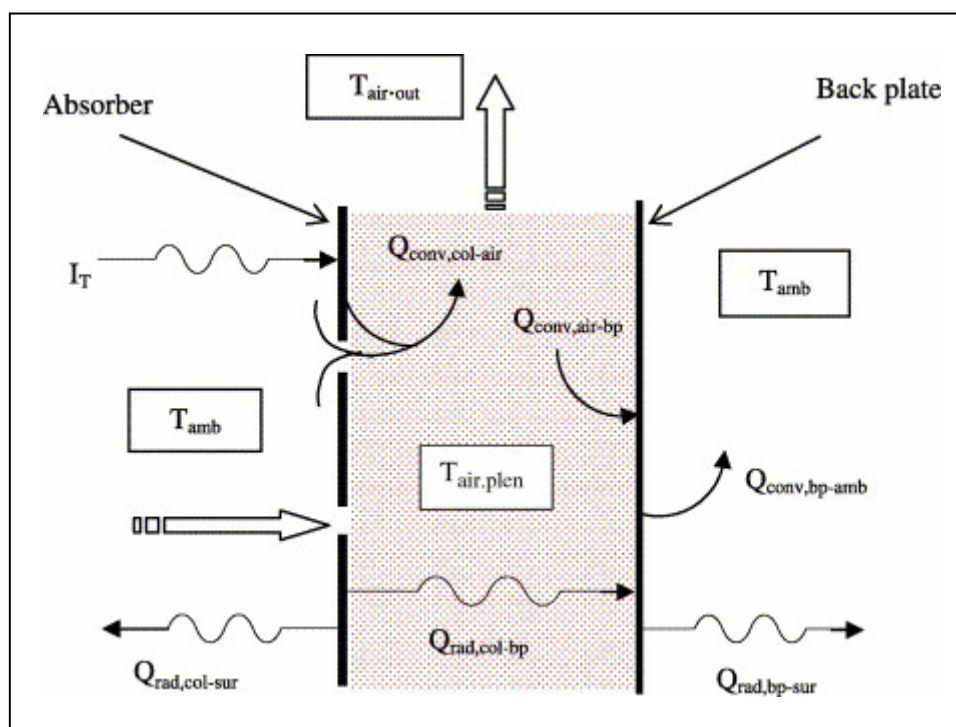
Διάτρητος συλλέκτης χωρίς υλοπίνακα

## ΑΝΑΛΥΣΗ

Προτού προχωρήσουμε στην ανάλυση του διάτρητου συλλέκτη, είναι φρόνιμο να επισημάνουμε κάποιες παραδοχές που λαμβάνουμε κατά τους υπολογισμούς [4].

1. Η θερμοκρασία του απορροφητή καθώς επίσης και η θερμοκρασία του πίσω πιάτου διατηρούνται σταθερές.
2. Η ροή του αέρα διαμέσω του συλλέκτη είναι σταθερή.
3. Οι απώλειες θερμότητας μεταξύ του απορροφητικού πιάτου και του περιβάλλοντος θεωρούνται αμελητέες.

Η μεταφορά θερμότητας σε όλο τον συλλέκτη παρουσιάζεται στο σχήμα 2.



Σχήμα 2  
Σχηματική απεικόνιση μεταφοράς θερμότητας στον συλλέκτη

Κάνουμε ενεργειακό ισολογισμό για τον απορροφητικό πιάτο, τον αέρα και το πίσω πιάτο [4].

➤ *Απορροφητικό πιάτο*

$$m_{col} * C_{p,col} * (dT_p/dt) = (\alpha_{col} * I_T * A_s) - (Q_{conv,col-air} + Q_{rad,col-bp} + Q_{rad,col-sur}) \quad (1)$$

όπου:

$Q_{\text{conv,col-air}}$  : η θερμότητα που μεταφέρεται από το απορροφητικό πιάτο στον αέρα

$Q_{\text{rad,col-bp}}$  : η θερμότητα που μεταφέρεται με ακτινοβολία από τον απορροφητή στο πίσω πιάτο

$Q_{\text{rad,col-sur}}$  : η θερμότητα που μεταφέρεται με ακτινοβολία από τον απορροφητή στον περιβάλλοντα χώρο.

$A_s$  : η διατομή συλλέκτη

➤ *Αέρας*

$$(m_{\text{air,out}} * dt) * C_{p,\text{air}} * (dT_{\text{air,out}}/dt) = Q_{\text{conv,col-air}} - Q_{\text{conv,air-bp}} \quad (2)$$

όπου:

$Q_{\text{conv,air-bp}}$  : η θερμότητα που μεταφέρεται από το πίσω πιάτο στον αέρα που ρέει στο εσωτερικό του συλλέκτη.

➤ *Πίσω πιάτο*

$$m_{\text{bp}} * C_{p,\text{bp}} * (dT_{\text{bp}}/dt) = Q_{\text{conv,air-bp}} + Q_{\text{rad,col-bp}} - Q_{\text{conv,bp-amb}} - Q_{\text{ras,bp-sur}} \quad (3)$$

Ο υπολογισμός των συντελεστών μεταφοράς θερμότητας γίνεται με τον παρακάτω τρόπο:

$$h_{\text{conv,col-air}} = (Nu_1 * K_{\text{air}}) / D \quad (4)$$

όπου:

$$Nu_1 = 2.75 * [(P/D)^{-1.21} * Re_1^{0.43} + 0.011 * \beta * Re_1 * (v_{\text{wind}} / v_{\text{app}})^{0.48}] \quad (5)$$

με

$$Re_1 = (\rho_{\text{air}} * v_{\text{hole}} * D) / \mu_{\text{air}} \quad (6)$$

$K_{air}$  : θερμική αγωγιμότητα του αέρα [W/m.K]

Οπότε, η θερμότητα  $Q_{conv, col-air}$  υπολογίζεται από:

$$Q_{conv, col-air} = h_{conv, col-air} * ( T_{col} - T_{air, plen} ) \quad (7)$$

$$h_{conv, air-bp} = ( Nu_2 * K_{air} ) / d_{plen} \quad (8)$$

$$Nu_2 = 0.664 * ( Re_2 )^{0.5} * ( Pr_2 )^{0.333} \quad (9)$$

$$Re_2 = ( \rho_{air} * v_{plen} * H ) / \mu_{air} \quad (10)$$

$$Pr_2 = ( C_{p, air} * \mu_{air} ) / K_{air} \quad (11)$$

$$Q_{conv, air-bp} = h_{conv, air-bp} * ( T_{air, plen} - T_{bp} ) \quad (12)$$

όπου:

$v_{plen}$  : η ταχύτητα του αέρα

$H$  : ύψος απορροφητή

$$h_{conv, bp-amb} = ( Nu_3 * K_{air} ) / L_c \quad (13)$$

$$Nu_3 = 0.664 * ( Re_3 )^{0.5} * ( Pr_3 )^{0.333} \quad (14)$$

$$Re_3 = ( \rho_{air} * v_{wind} * W ) / \mu_{air} \quad (15)$$

$$Q_{conv, bp-amb} = h_{conv, bp-amb} * ( T_{bp} - T_{amb} ) \quad (16)$$

$W$ : το πλάτος του απορροφητή

$$Q_{rad, col-bp} = \sigma_{sb} * A_s * ( T_{col}^4 - T_{bp}^4 ) ( 1 / \epsilon_{col, in} + 1 / \epsilon_{bp} - 1 ) \quad (17)$$

$$Q_{rad, bp-sur} = \epsilon_{bp} * \sigma_{sb} * A_s * ( T_{bp}^4 - T_{sur}^4 ) \quad (18)$$

$$Q_{rad, col-sur} = \epsilon_{col} * \sigma_{sb} * A_s * ( T_{col}^4 - F_{cs} T_{sky}^4 - F_{cg} T_{gnd}^4 ) \quad (19)$$

Τελικά, ο βαθμός απόδοσης του συλλέκτη υπολογίζεται από:

$$\eta_{col} = \frac{m_{air, out} * c_{p, air} * ( T_{air, out} - T_{amp} )}{I_T * A_S} \quad (20)$$

ενώ η αποτελεσματικότητα μεταφοράς θερμότητας εκφράζεται από το πηλίκο της πραγματικής θερμοκρασιακής αύξησης προς την μέγιστη ιδανική αύξηση:

$$\varepsilon_{Hx} = \frac{T_{air,plen} - T_{amb}}{T_{col} - T_{amb}} \quad (21)$$

όπου:

$T_{col}$  : η μέση θερμοκρασία του απορροφητικού πιάτου

$T_{amb}$  : η θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

### ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Με γνωστές τις παρακάτω τιμές του πίνακα 1 [4]:

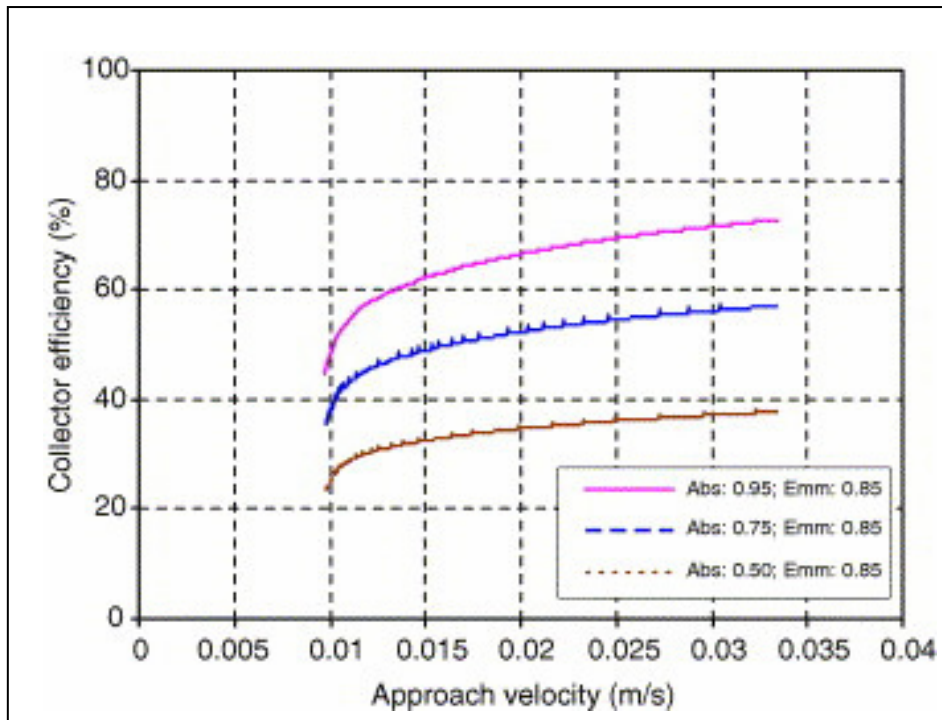
Πίνακας 1

Τιμές παραμέτρων συλλέκτη

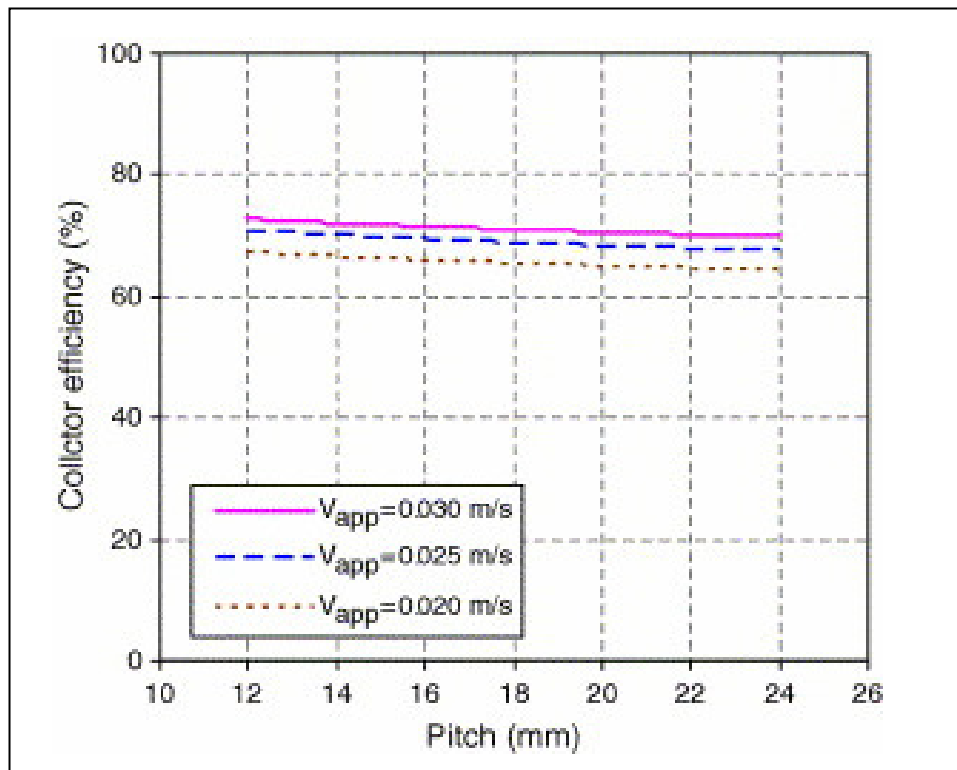
Approach velocity 0.02–0.03 m/s
Solar radiation 400–900 W/m <sup>2</sup>
Ambient temperature 30 <sup>0</sup> C
Wind velocity 1.2 m/s
Pressure drop across the absorber 25–80 Pa
Plenum depth 120 mm
Pitch (triangular) 12–24 mm
Perforation diameter 0.80–1.55 mm
Absorber material Mild steel
Design parameters used for reference collector
Solar absorptance 0.95
Thermal emittance 0.85
Pitch 20 mm
Perforation diameter 1.25 mm

καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι οι παράμετροι που επηρεάζουν το βαθμό απόδοσης του συλλέκτη είναι η ταχύτητα του αέρα (3) και το βήμα του συλλέκτη (4)

και κατά συνέπεια και η παροχή μάζας του. Σχηματικά, αυτές οι εξαρτήσεις φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα [4].



Σχήμα 3  
Βαθμός απόδοσης συλλέκτη σε συνάρτηση με ταχύτητα του αέρα

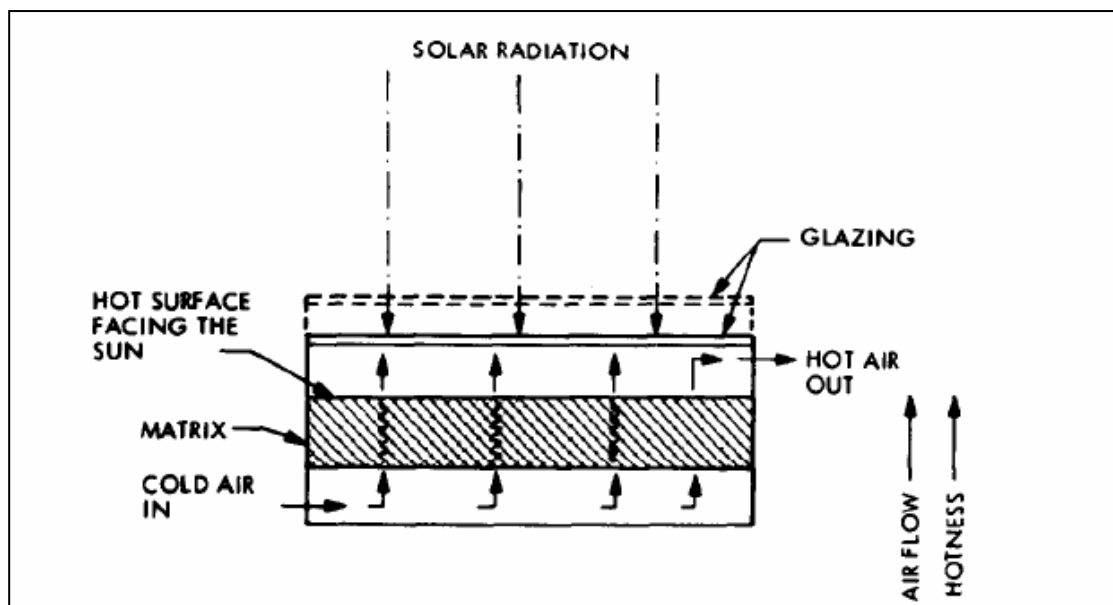


Σχήμα 4  
Βαθμός απόδοσης συλλέκτη σε συνάρτηση με βήμα του συλλέκτη

### 1.1.5 ΠΟΡΩΔΗΣ ΕΠΙΠΕΔΟΣ ΗΛΙΑΚΟΣ ΣΥΛΛΕΚΤΗΣ

#### ΓΕΝΙΚΑ

Ο συλλέκτης (σχήμα 1) αποτελείται από ένα μεταλλικό καλούπι, του οποίου το μέγεθος και η πορώδης φύση του εξαρτώνται από την λειτουργία του συλλέκτη και το οποίο καλούπι αντικαθιστά τον απορροφητικό πιάτο σε έναν συμβατικό επίπεδο ηλιακό συλλέκτη. Η πορώδης επιφάνειά του συμπεριφέρεται σαν πολυάριθμα κοιλώματα ακτινοβολίας (black bodies), των οποίων η απορροφητικότητα υπερβαίνει κατά πολύ την απορροφητικότητα μιας κοινής στέρεης επιφάνειας [5]. Μία ή δύο στρώσεις υαλοπίνακα τοποθετούνται στην κορυφή του καλουπιού, αφήνοντας χώρο στον αέρα για να περνάει. Στην περίπτωση χρησιμοποίησης δυο στρώσεων υαλοπίνακα είναι καλύτερα στον μεταξύ τους χώρο να δημιουργείται κενό αέρος, έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες θερμότητας. Επίσης, είναι σύνηθες η επιφάνεια του καλουπιού να επικαλύπτεται με υλικό που αναστέλλει τις απώλειες θερμότητας από ακτινοβολία.



Σχήμα 1

Πορώδης επίπεδος ηλιακός συλλέκτης



## ΑΝΑΛΥΣΗ

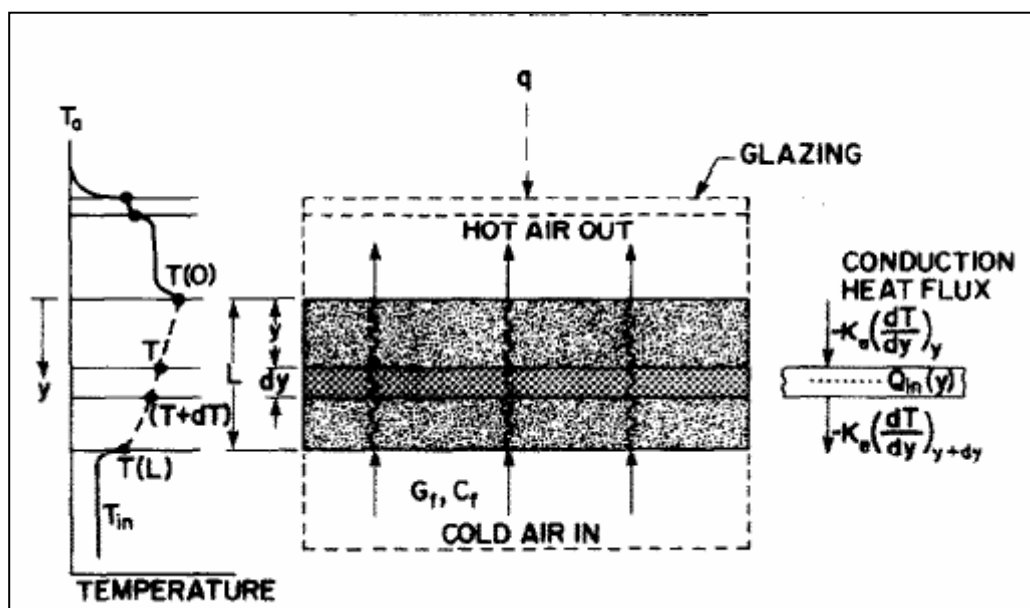
Κατά την θερμική ανάλυση [5], οι παραδοχές που γίνονται είναι οι εξής:

1. Οι ιδιότητες του καλουπιού και του αέρα παραμένουν σταθερές σε όλο τον συλλέκτη.
2. Η μεταφορά θερμότητας και η ροή του αέρα γίνονται κατά μια φορά και κάθετα προς την επιφάνεια του καλουπιού.
3. Οι απώλειες θερμότητας προς το περιβάλλον γίνονται μόνο από το πάνω μέρος του συλλέκτη.

Θεωρούμε στοιχειώδες τμήμα  $dy$  του καλουπιού που βρίσκεται σε απόσταση  $y$  από την επιφάνειά του. Η διατήρηση της θερμότητας [5] δίνει:

$$K_e \frac{d^2 T}{dy^2} + G_f C_f \frac{dT}{dy} + Q_{in}(y) = 0. \quad (1)$$

και παριστάνεται σχηματικά στο σχήμα 2.



Σχήμα 2

Σχηματική απεικόνιση μεταφοράς θερμότητας

Η εξίσωση αυτή θα επιλυθεί για τις παρακάτω περιπτώσεις:

- Αδιαφανούς επιφάνειας καλουπιού, στην οποία η απορρόφηση της ηλιακής ενέργειας πραγματοποιείται αποκλειστικά από την πάνω επιφάνεια.
- Ημιπερατούς επιφάνειας καλουπιού, στην οποία η απορρόφηση της ενέργειας γίνεται σε όλο το βάθος του καλουπιού.

➤ 1<sup>η</sup> περίπτωση:

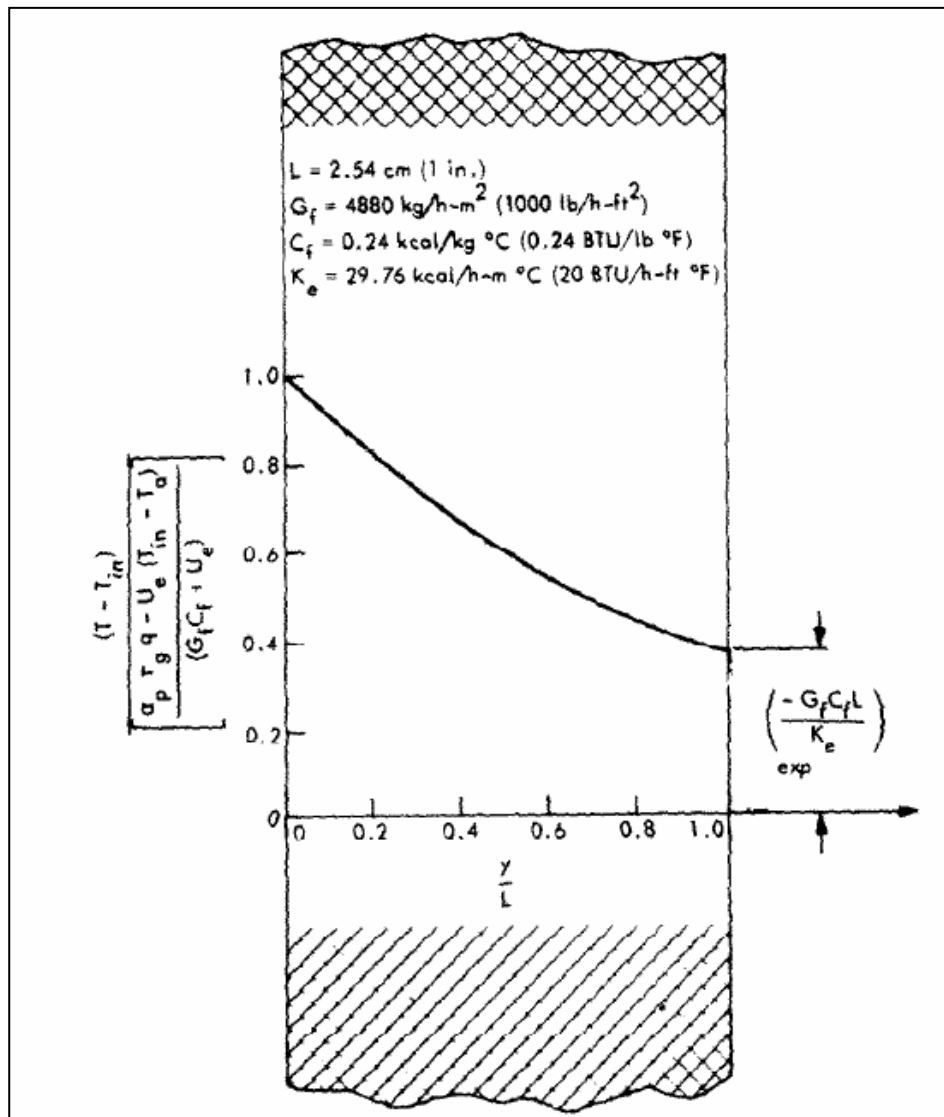
Η εξίσωση (1) για  $Q_{in}(y) = 0$  για  $y > 0$ , όπου  $Q_{in}$  η εσωτερική απορρόφηση ενέργειας γίνεται:

$$K_e \frac{d^2 T}{dy^2} + G_f C_f \frac{dT}{dy} = 0. \quad (2)$$

η λύση της οποίας δίνει:

$$T = T_{in} + \left\{ \frac{\alpha_p \tau_g q - U_e (T_{in} - T_a)}{G_f C_f + U_e} \right\} \exp(-G_f C_f y / K_e) \quad (3)$$

Η γραφική παράσταση της σχέσης (3) δίνεται στο σχήμα 3.



Σχήμα 3

Γραφική απεικόνιση εξίσωσης (3)

Παρατηρούμε ότι ενώ η θερμοκρασία σε κάθε σημείο του συλλέκτη εξαρτάται από την θερμική αγωγιμότητα  $K_e$  και από το πάχος  $L$ , η θερμοκρασιακή αύξηση του αέρα είναι ανεξάρτητη και δίνεται από την σχέση:

$$[T(0) - T_{in}] \approx [\alpha_p \tau_g q - U_e (T_{in} - T_a)] / (G_f C_f + U_e). \quad (4)$$

Η ωφέλιμη θερμότητα είναι ίση με:

$$Q_u = G_f C_f [T(0) - T_{in}] = [\alpha_p \tau_g q - U_e (T_{in} - T_a)] G_f C_f / (G_f C_f + U_e) \quad (5)$$

➤ 2<sup>η</sup> περίπτωση:

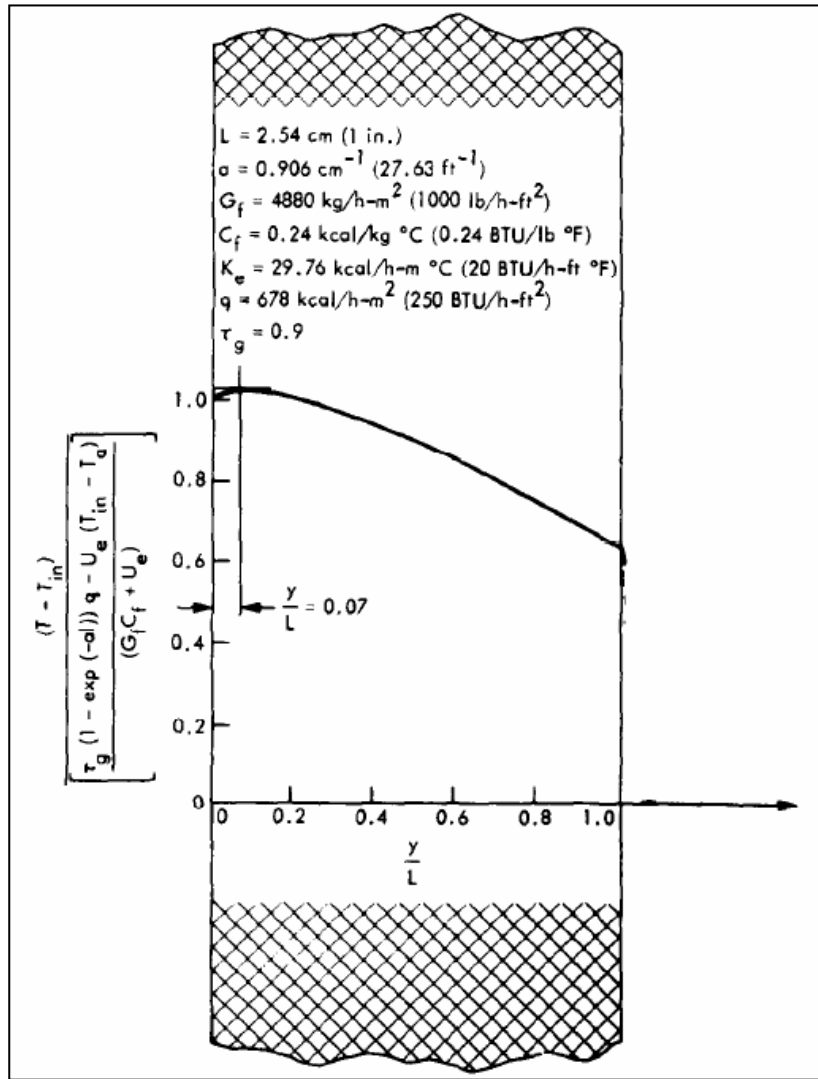
Όμοια με πριν, έχουμε:

$$Q_{in}(y) = \alpha \tau_g q \exp(-\alpha y) \quad (6)$$

$$K_e \frac{d^2 T}{dy^2} + G_f C_f \frac{dT}{dy} + \alpha \tau_g q \exp(-\alpha y) = 0 \quad (7)$$

$$T = T_{in} + \left\{ \frac{\alpha \tau_g [1 - \exp(-\alpha L)] - U_e (T_{in} - T_a)}{U_e + G_f C_f} \right\} \exp(-G_f C_f y / K_e) + \left\{ \frac{\alpha \tau_g [\exp(-\alpha y) - \exp(-G_f C_f y / K_e)]}{G_f C_f - K_e \alpha} \right\} \quad (8)$$

η οποία έχει σχεδιαστεί στο σχήμα 4.



Σχήμα 4

Γραφική απεικόνιση εξίσωσης (8)

Η ωφέλιμη θερμοκρασιακή αύξηση του αέρα ισούται με:

$$[T(0) - T_{in}] = \{q\tau_g[1 - \exp(-\alpha L)] - U_e(T_{in} - T_a)\} / (U_e + G_f C_f), \quad (9)$$

ενώ η θερμότητα:

$$Q_u = G_f C_f [T(0) - T_{in}] = \{q\tau_g [1 - \exp(-\alpha L)] - U_e (T_{in} - T_a)\} G_f C_f / (G_f C_f + U_e) \quad (10)$$

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Παρατηρούμε ότι στην δεύτερη περίπτωση της ημιπερατούς επιφάνειας, η θερμοκρασία παίρνει μια μέγιστη τιμή σε κάποιο σημείο στο εσωτερικό του καλουπιού, εξαιτίας της διαδοχικής απορρόφησης ηλιακής ενέργειας και της ενέργειας που απάγεται από τον αέρα. Είναι απαραίτητο να υπάρχει μια ομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας του καλουπιού. Για να επιτευχθεί αυτό, η θερμοκρασία στην είσοδο του ρευστού  $T(L)$  πρέπει να είναι μεγαλύτερη και αυτό γίνεται με υψηλό  $K_e$ , μικρό πάχος  $L$  και μικρή ροή μάζας αέρα  $G_f$  [5].

## 1.2 ΕΠΙΠΕΔΟΙ ΗΛΙΑΚΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ ΜΕ ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΟ ΜΕΣΟ ΝΕΡΟ

### 1.2.1 ΕΠΙΠΕΔΟΣ ΗΛΙΑΚΟΣ ΣΥΛΛΕΚΤΗΣ ΜΕΛΑΝΟΣ ΥΓΡΟΥ

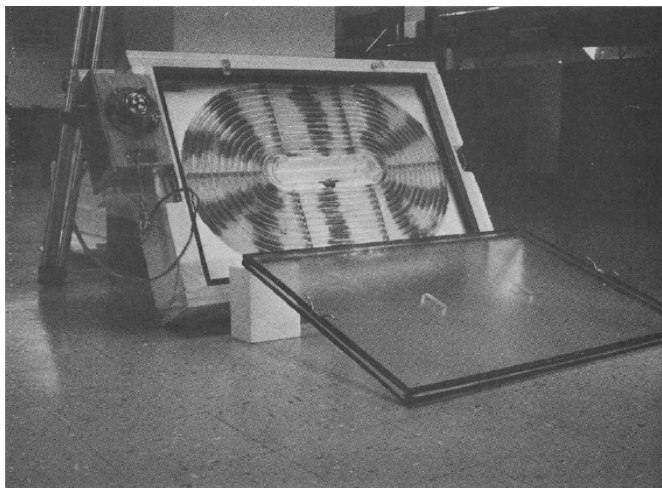
#### ΓΕΝΙΚΑ

Οι συλλέκτες αυτού του τύπου έχουν την ιδιαιτερότητα ότι δεν χρησιμοποιούν το νερό ως εργαζόμενο μέσο, αλλά κάποιο μέλαν υγρό υψηλής απορροφητικότητας, το οποίο ρέει διαμέσω διάφανων καναλιών. Η ηλιακή ακτινοβολία απορροφάται απευθείας από το ρευστό, με αποτέλεσμα να αποφεύγεται η θέρμανση των άλλων στοιχείων του συλλέκτη. Κατ' αυτόν τον τρόπο, το ρευστό είναι το θερμότερο στοιχείο του συλλέκτη και επομένως δεν απαιτούνται άλλα μέταλλα στον σχεδιασμό.

Ποικίλλες διατάξεις καναλιών είναι δυνατές: κυκλικές, σπειροειδείς, ελικοειδείς. Τα κανάλια αυτά μπορούν να κατασκευαστούν είτε από διαφανές πλαστικό είτε από γυαλί. Η διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι το πλαστικό δεν είναι συμβατό με όλα τα μέλανα υγρά και μπορεί να διαβρωθεί ή ακόμα και να λιώσει, σε περίπτωση που ο συλλέκτης φθάσει στη μέγιστη θερμοκρασία του. Το πλαστικό, αντιθέτως, προτιμάται όταν κατασκευάζεται ένας πειραματικός συλλέκτης, ενώ το γυαλί είναι προτιμότερο για μαζική παραγωγή [6].

#### ΔΟΜΗ

Ο συλλέκτης που μελετάμε (σχήμα 1) αποτελείται από δύο στρώματα σωληνώσεων από διάφανο πλαστικό διατεταγμένων κατά τρόπο σπειροειδή.



Σχήμα 1

Συλλέκτης μέλανος υγρού

Το κρύο ρευστό εισάγεται στο συλλέκτη από την εξωτερική γωνία και ρέει, διαμέσω των καναλιών, προς το κέντρο του συλλέκτη. Καθώς ρέει, απορροφά θερμότητα προερχόμενη από το κέντρο του συλλέκτη (θερμότερο σημείο) και σταδιακά αυξάνει τη θερμοκρασία του. Εξαιτίας της σπειροειδούς διάταξης και επειδή δεν υπάρχουν μεταλλικά μέρη στον συλλέκτη, το μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειας του συλλέκτη δεν υπόκειται σε υψηλές θερμοκρασίες, συνέπεια του οποίου είναι να μειώνονται οι απώλειες θερμότητας στα άκρα του συλλέκτη, καθώς επίσης και οι απώλειες αγωγής και συναγωγής στο εσωτερικό του καλύμματος [6].

### ΑΝΑΛΥΣΗ

Η εξίσωση που δίνει την απόδοση του συλλέκτη είναι:

$$n = F' [f - U_L (T_f - T_a) / Q_{ts}] \quad (1)$$

όπου

$Q_{ts}$  : ολική ηλιακή ακτινοβολία

$T_a$  : θερμοκρασία του αέρα

$T_f$  : μέση θερμοκρασία του ρευστού

$U_L$  : συντελεστής θερμικών απωλειών

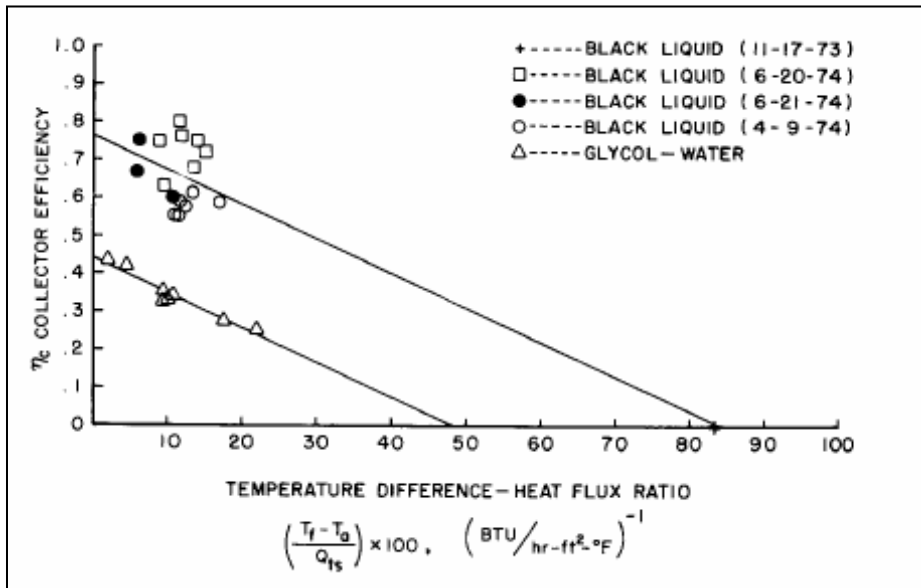
$f$  : ποσοστό απορροφόμενης ακτινοβολίας

$F'$  : συντελεστής αποτελεσματικότητας του πιάτου

Για έναν συλλέκτη μέλανος υγρού ισχύει  $F' = 1$  διότι η ακτινοβολία απορροφάται απευθείας από το ρευστό [6].

Ο μέγιστος βαθμός απόδοσης είναι περίπου 77% διότι περιορίζεται από τις ιδιότητες του πλαστικού. Βελτίωση του βαθμού απόδοσης μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας άλλο κάλυμμα, είτε βρίσκοντας ένα μέλαν υγρό με καλύτερες ιδιότητες, είτε αλλάζοντας τη διάταξη του καναλιού, μέσα στο οποίο ρέει το υγρό [6].

Το σχήμα 2 απεικονίζει τη συμπεριφορά του συλλέκτη με διάφορα μέλανα υγρά.



Σχήμα 2  
Σχέση βαθμού απόδοσης με διάφορα μέλανα υγρά



## 1.2.2 ΕΠΙΠΕΔΟΣ ΗΛΙΑΚΟΣ ΣΥΛΛΕΚΤΗΣ ΠΑΡΑΛΛΗΛΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ

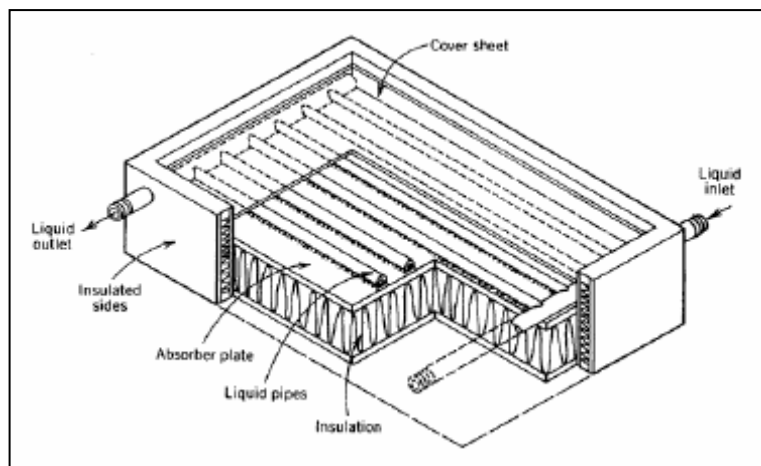
### ΓΕΝΙΚΑ

Αυτός ο τύπος συλλέκτη αποτελεί την πιο διαδεδομένη μορφή ηλιακών συλλεκτών, για αυτό και θεωρείται ο τυπικός επίπεδος ηλιακός συλλέκτης. Η χρήση του συνίσταται σε οικισμούς, για εξοικονόμηση ενέργειας, σε ξενοδοχειακές μονάδες και μικρές επιχειρήσεις, ενώ όταν δεν υπάρχει υαλοπίνακας μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για θέρμανση πισίνων [12].

Αν και είναι πολύ οικονομικός και απλός, παρουσιάζει τα εξής μειονεκτήματα [7]:

- Η κατανομή της θερμοκρασίας δεν είναι ομοιόμορφη στο απορροφητικό πιάτο. Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι ένα μέρος της απορροφώμενης ακτινοβολίας πρέπει να οδηγηθεί κατά μήκος του πιάτου στην περιοχή των σωλήνων, με αποτέλεσμα η θερμοκρασία στην περιοχή μεταξύ των σωληνώσεων να είναι μεγαλύτερη από αυτή στην εγγύς περιοχή [12].
- Επίσης, υπάρχει ανομοιομορφία και στην κατανομή του εργαζόμενου μέσου, με αποτέλεσμα να μην επικρατεί παντού η ίδια θερμοκρασιακή αύξηση [12].
- Τέλος, η θερμοκρασία του απορροφητικού πιάτου είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση μικρής ροής εργαζόμενου μέσου, αυξάνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο τις θερμικές απώλειες του συλλέκτη [12].

### ΔΟΜΗ



Σχήμα 1

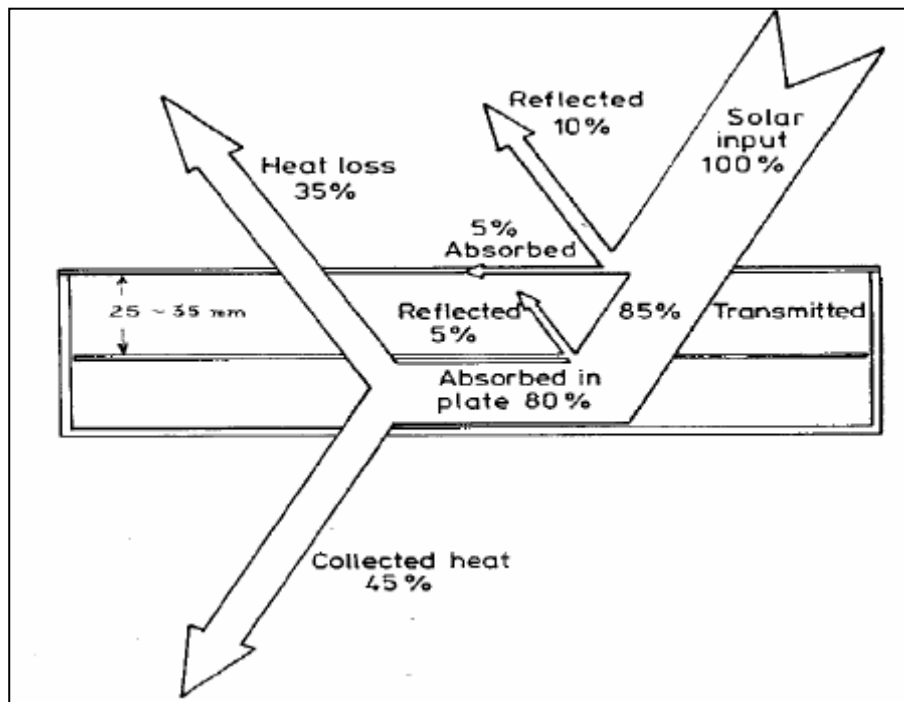
Συλλέκτης παράλληλων σωλήνων

Όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα, ο συλλέκτης είναι ένα μεταλλικό κουτί, του οποίου το πάνω μέρος καλύπτεται από μια γυάλινη ή πλαστική επιφάνεια (υαλοπίνακας), ενώ το κάτω μέρος είναι μια σκούρα απορροφητική επιφάνεια. Τα πλαϊνά και πίσω τοιχώματα είναι μονωμένα, έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται οι θερμικές απώλειες.

Η ηλιακή ακτινοβολία διαπερνά τον υαλοπίνακα και απορροφάται από το απορροφητικό πιάτο, το οποίο και θερμαίνεται. Η θερμότητα τότε μεταφέρεται στο εργαζόμενο μέσο (νερό), το οποίο ρέει μέσα στους σωλήνες (ευρισκόμενοι συγκολλημένοι πάνω στο απορροφητικό πιάτο).

### ΑΝΑΛΥΣΗ

Το σχήμα 2 απεικονίζει αναλυτικά την ροή θερμότητας διαμέσω του συλλέκτη.



Σχήμα 2

Ροή θερμότητας διαμέσω του συλλέκτη

Όπως φαίνεται και από το παραπάνω σχήμα, η απορροφώμενη ακτινοβολία ισούται με:

$$Q_i = I (\tau \alpha ) A \quad (1)$$

Ενώ οι θερμικές απώλειες είναι ίσες με:

$$Q_0 = U_L A (T_c - T_a) \quad (2)$$

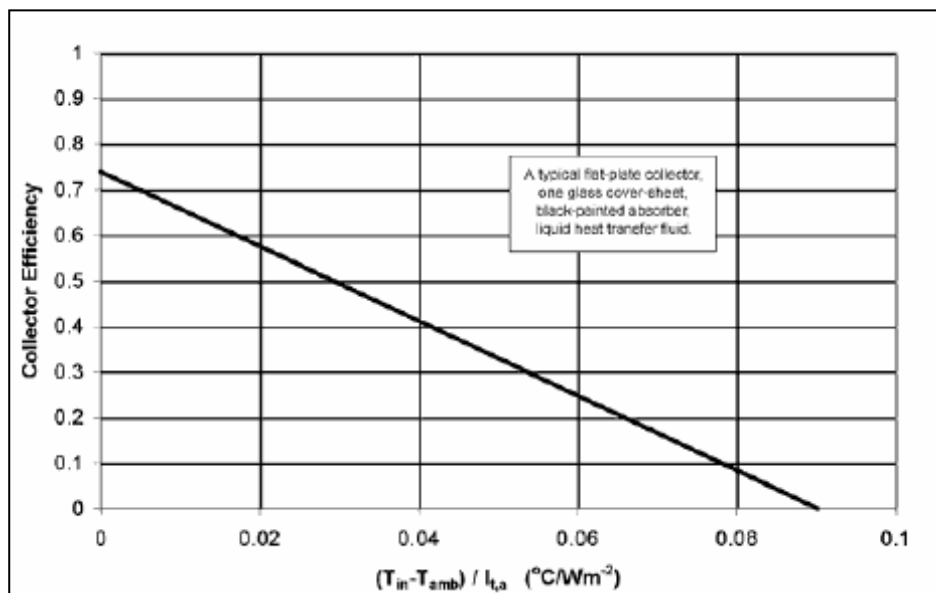
Οπότε, η ωφέλιμη θερμότητα που αποδίδει ο συλλέκτης είναι:

$$Q_u = Q_i - Q_0 = I (\tau\alpha) A - U_L A (T_c - T_a) = F_R A [I(\tau\alpha) - U_L (T_c - T_a)] \quad (3)$$

Τελικά ο βαθμός απόδοσης του συλλέκτη δίνεται από την εξίσωση:

$$\eta = \frac{Q_u}{A \cdot I} = F_R \tau\alpha - F_R U_L \left( \frac{T_c - T_a}{I} \right) \quad (4)$$

και σχηματικά:



Σχήμα 3

Βαθμός απόδοσης συλλέκτη παράλληλων σωλήνων

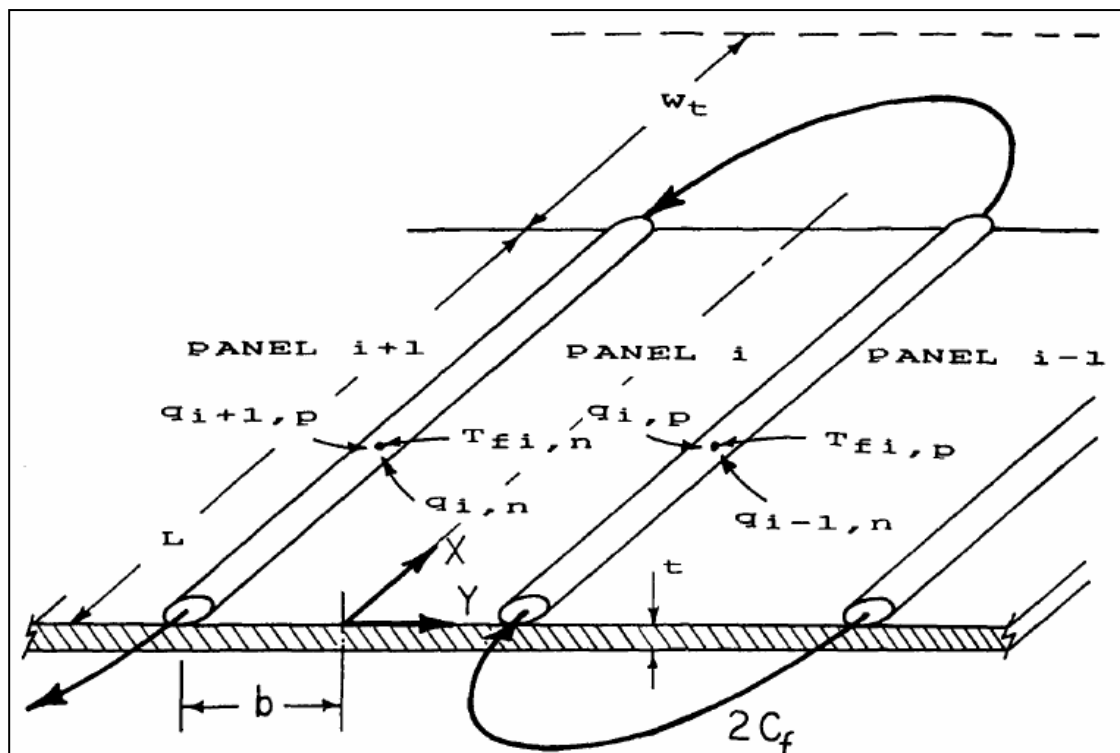
### 1.2.3 ΕΠΙΠΕΔΟΣ ΗΛΙΑΚΟΣ ΣΥΛΛΕΚΤΗΣ ΜΕ ΕΛΙΚΟΕΙΔΕΙΣ ΣΩΛΗΝΕΣ

#### ΓΕΝΙΚΑ

Ο συλλέκτης αυτός κατασκευάστηκε με σκοπό να υπερκεράσει τα προβλήματα ανομοιομορφίας που παρουσιάζει ο επίπεδος ηλιακός συλλέκτης παράλληλων σωλήνων (1.2.2). Δυστυχώς, όσον αφορά την κατανομή της θερμοκρασίας στην απορροφητική επιφάνεια, τα αποτελέσματα δεν ήταν ικανοποιητικά.

#### ΔΟΜΗ

Αυτός ο συλλέκτης έχει την ίδια δομή με τον προαναφερθέντα, με μόνη διαφορά τον αγωγό ροής, ο οποίος στην προκειμένη περίπτωση είναι ελικοειδούς μορφής [10]. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, να υπάρχει ένας και μοναδικός σωλήνας, σε αντίθεση με τον προηγούμενο συλλέκτη στον οποίο το νερό έρρεε σε πολλούς παράλληλους σωλήνες.



Σχήμα 1

Συλλέκτης με ελικοειδείς σωλήνες

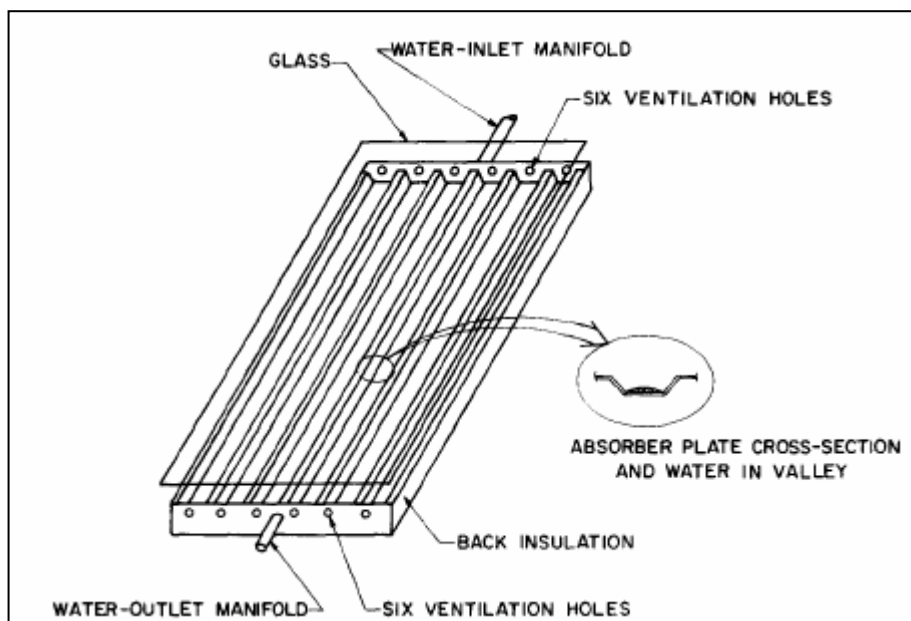
## 1.2.4 ΕΠΙΠΕΔΟΣ ΣΥΛΛΕΚΤΗΣ ΜΙΚΡΗΣ ΡΟΗΣ ΝΕΡΟΥ

### ΓΕΝΙΚΑ

Ο σχεδιασμός και η λειτουργία του συλλέκτη μικρής ροής νερού είναι πολύ πιο απλή από τον κοινό επίπεδο ηλιακό συλλέκτη. Χαρακτηριστικό του συλλέκτη αυτού είναι ότι το εργαζόμενο μέσο (νερό) ρέει πάνω στο κυματοειδές απορροφητικό πιάτο, με αποτέλεσμα να μην απαιτούνται αντλίες, ούτε σύστημα ψύξεως. Αντιθέτως, τα υλικά από τα οποία κατασκευάζεται είναι πολύ κοινά, οπότε ο συλλέκτης αυτός κατατάσσεται στους πλέον ιδανικούς για εφαρμογές μεσαίας θερμοκρασίας [7].

### ΔΟΜΗ

Ο συλλέκτης αποτελείται από ένα κυματοειδές απορροφητικό πιάτο τραπεζοειδούς μορφής και από ένα μονό υαλοπίνακα, τα οποία είναι στερεωμένα σε ένα ξύλινο πλαίσιο. Τόσο στο πάνω όσο και στο κάτω μέρος του πλαισίου υπάρχουν έξι οπές διαμέτρου 2,5 cm [7]. Σκοπός της ύπαρξής τους αποτελεί η αποφυγή δημιουργίας συμπυκνώματος ως αποτέλεσμα υψηλών θερμοκρασιών και κατά συνέπεια τη μη υπερθέρμανση του συλλέκτη που μπορεί να επιφέρει ακόμα και την καταστροφή του. (σχήμα 1)



Σχήμα 1

Συλλέκτης μικρής ροής νερού

Μέρος του συλλέκτη αποτελεί και μια αποθηκευτική δεξαμενή 150 lt καθώς επίσης και μετρητικά όργανα, τα οποία βρίσκονται σε ένα μεγάλο κουτί κάτω από το ξύλινο πλαίσιο [7].

Το νερό αντλείται από την δεξαμενή αποθήκευσης στο πάνω μέρος του συλλέκτη. Από εκεί, ρέει πάνω στο απορροφητικό πιάτο, μέσα σε έξι κανάλια, και φτάνει στο κάτω μέρος του συλλέκτη, όπου και συγκεντρώνεται στην δεξαμενή αποθήκευσης με τη βοήθεια της βαρύτητας.

### ΑΝΑΛΥΣΗ

Η ωφέλιμη θερμότητα δίνεται από τον τύπο:

$$Q_u = \dot{m}_w C_p (T_{co} - T_{ci}) = A_g [ F_R (\tau\alpha)_c I - F_R U_L (T_{ci} - T_a) ] \quad (1)$$

ενώ ο βαθμός απόδοσης:

$$\eta = Q_u / A_g I = F_R (\tau\alpha)_c - F_R U_L [ (T_{ci} - T_a) / I ] \quad (2)$$

όπου

$\dot{m}_w$  : ροή μάζας ( $\dot{m}_w = 0.0625 \text{ kg/s}$ )

$T_a$  : θερμοκρασία περιβάλλοντος ( $T_a = 25^\circ\text{C}$ )

$T_{ci}$  : θερμοκρασία του συλλέκτη στην είσοδό του

$T_{co}$  : θερμοκρασία του συλλέκτη στην έξοδό του

$T_{se}$  : θερμοκρασία της δεξαμενής στην έξοδό της

$T_{si}$  : θερμοκρασία της δεξαμενής στην είσοδό της

$I$ : ηλιακή ακτινοβολία ( $I = 950 \text{ W / m}^2$ )

Μετά από πειραματικές μετρήσεις, βρέθηκαν οι παρακάτω τιμές [7]:

➤ Για την περίπτωση κλειστών οπών:

$$E_R = 0.97, U_L = 12.30 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}, (\tau\alpha)_{e,n} = 0.755$$

$$F_R U_L = 11.93 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C} \text{ και } F_R (\tau\alpha)_{e,n} = 0.732$$

➤ Για την περίπτωση ανοικτών οπών:

$$F_R = 0.95, U_L = 13.80 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}, (\tau\alpha)^{e,n} = 0.755$$

$$F_R U_L = 13.11 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C} \text{ και } F_R(\tau\alpha)_{c,n} = 0.717$$

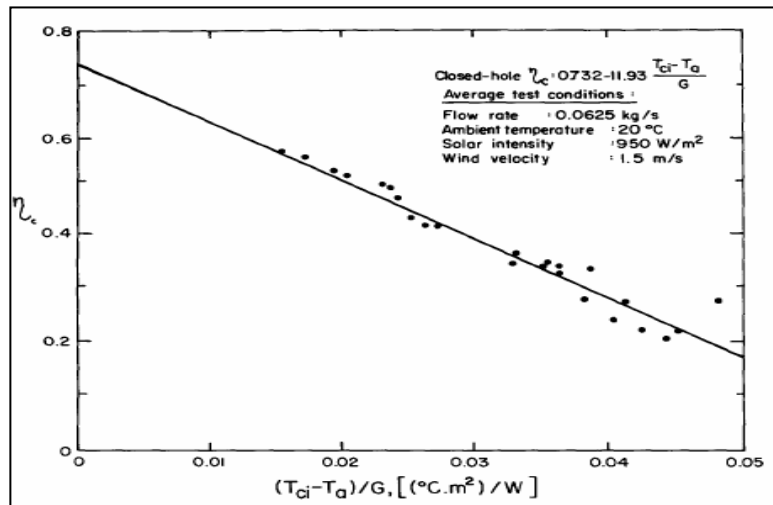
Οπότε, ο βαθμός απόδοσης για την περίπτωση κλειστών οπών γίνεται [7]:

$$\eta_c = 0.732 - 11.93 (T_{ci} - T_a) / I \quad (3)$$

και για την περίπτωση ανοικτών οπών [7]:

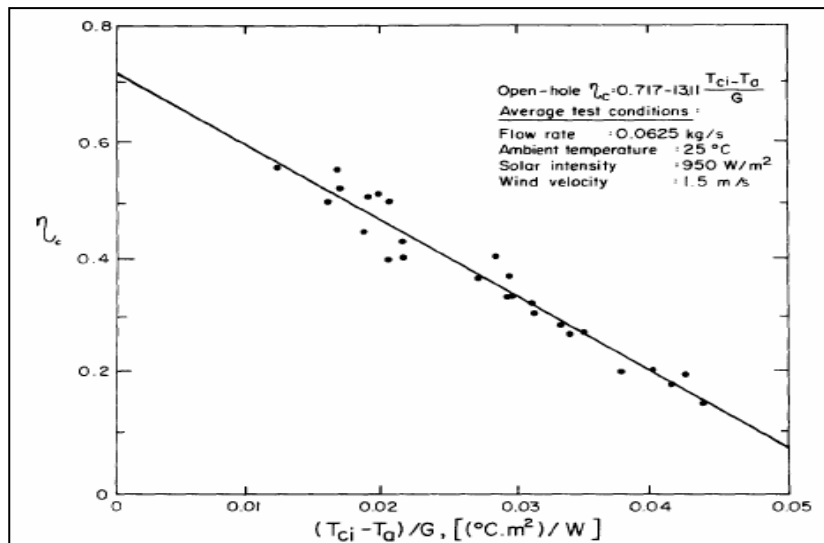
$$\eta_c = 0.717 - 13.11 (T_{ci} - T_a) / I \quad (4)$$

Τα σχήματα 2 και 3 απεικονίζουν γραφικά τις εξισώσεις 3 και 4 αντίστοιχα.



Σχήμα 2

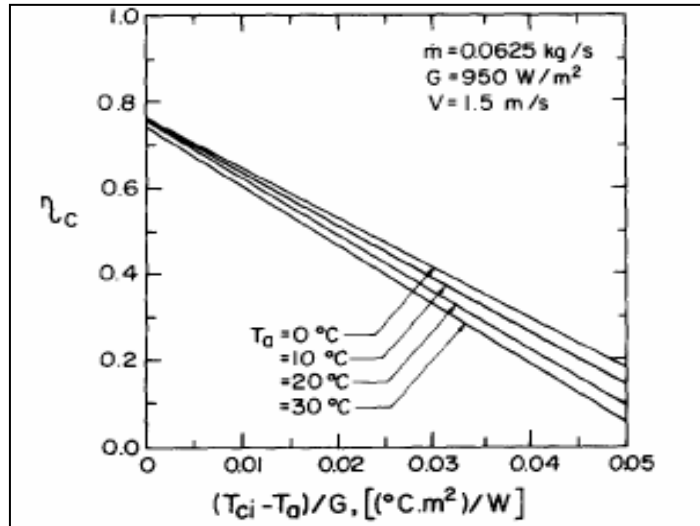
Βαθμός απόδοσης συλλέκτη κλειστών οπών



Σχήμα 3

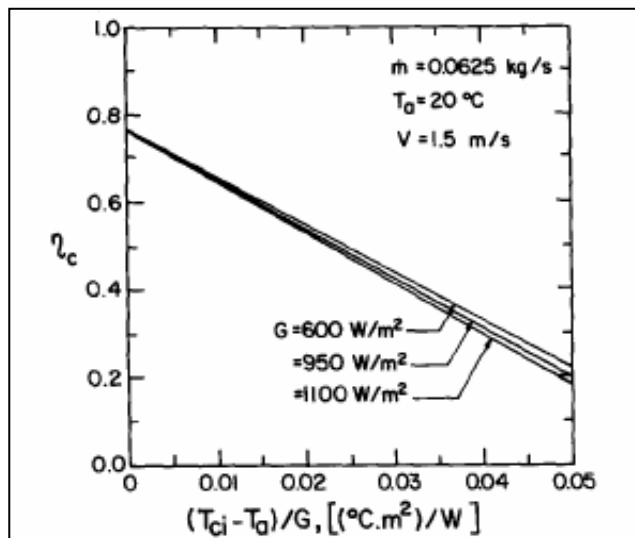
Βαθμός απόδοσης συλλέκτη ανοικτών οπών

Τα διαγράμματα που ακολουθούν περιγράφουν την ευαισθησία του βαθμού απόδοσης του συλλέκτη ως προς μεταβολές στην θερμοκρασία περιβάλλοντος (σχήμα 4), στην ηλιακή ακτινοβολία (σχήμα 5) και στη ροή του νερού (σχήμα 6).



Σχήμα 4

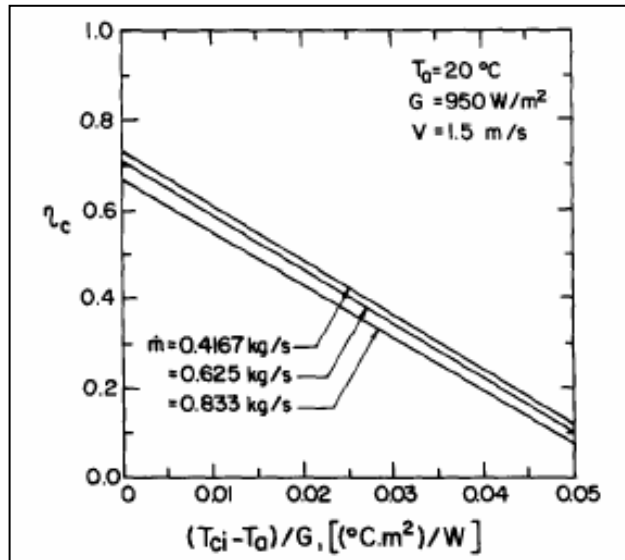
Βαθμός απόδοσης σε συνάρτηση με μεταβολές θερμοκρασίας περιβάλλοντος



Σχήμα 5

Βαθμός απόδοσης σε συνάρτηση με την ηλιακή ακτινοβολία





Σχήμα 6

Βαθμός απόδοσης σε συνάρτηση με τη ροή του νερού

## 1.2.5 ΕΠΙΠΕΔΟΣ ΚΕΡΑΜΙΚΟΣ ΣΥΛΛΕΚΤΗΣ ΜΙΚΡΗΣ ΡΟΗΣ ΝΕΡΟΥ

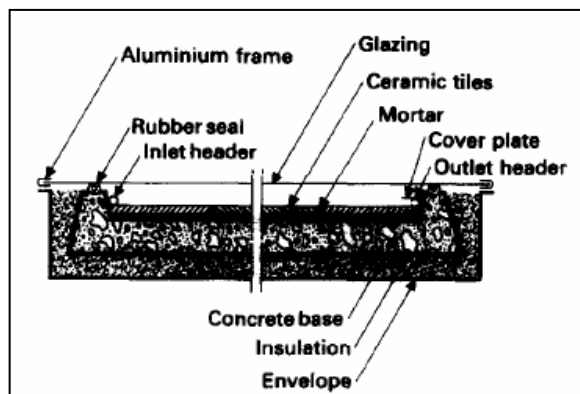
### ΓΕΝΙΚΑ

Μια βελτιωμένη έκδοση του προαναφερθέντος τύπου ηλιακού συλλέκτη, είναι ο κεραμικός συλλέκτης μικρής ροής. Αν και η βελτίωση επικεντρώνεται μόνο στο υλικό κατασκευής του απορροφητικού πιάτου, είναι πολύ ουσιώδης. Και αυτό, διότι:

- Η ροή του νερού είναι ομοιόμορφη πάνω στην κεραμική επιφάνεια του πιάτου [8].
- Το κεραμικό είναι πιο ανθεκτικό υλικό ως προς τη διάβρωση [8].
- Σε περιπτώσεις χρήσης σκληρού νερού, δεν αντιμετωπίζονται προβλήματα επικαθήσεως αλάτων. Αντιθέτως, στον τυπικό επίπεδο ηλιακό συλλέκτη, το πρόβλημα αυτό είναι πολύ κοινό, αφού το νερό ρέει μέσα σε σωλήνες. Επιπλέον, η χρήση του κεραμικού ελαχιστοποιεί το πρόβλημα αυτό, καθώς η θερμοκρασία στην επιφάνειά του είναι μικρότερη από άλλων υλικών [8].
- Επειδή το κεραμικό χρησιμοποιείται και για την κατασκευή σκεπών, είναι δυνατόν ένα μεγάλο μέρος της σκεπής να καλυφθεί με υαλοπίνακες και να δημιουργήσει έναν τεράστιο συλλέκτη [8].
- Τέλος, το κεραμικό είναι πολύ κοινό υλικό και διαθέσιμο στις περισσότερες χώρες.

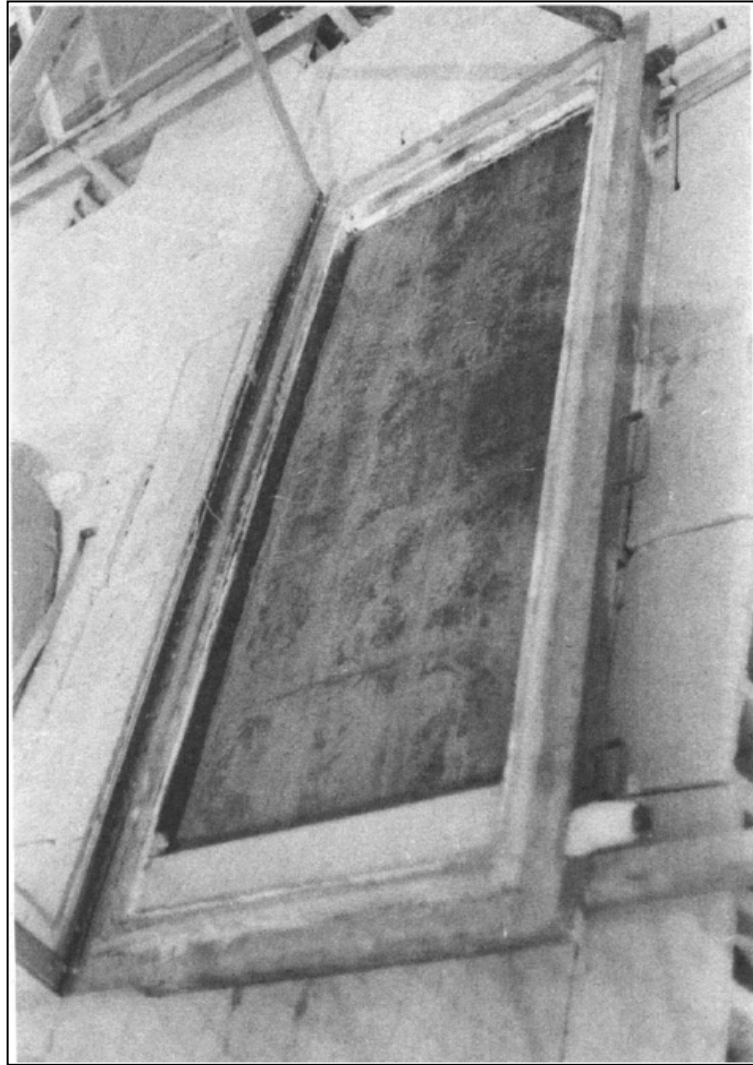
### ΔΟΜΗ

Όπως φαίνεται και από τα παρακάτω σχήματα, η δομή του συλλέκτη αυτού είναι παρόμοια με αυτήν του προηγούμενου συλλέκτη.



Σχήμα 1

Δομή κεραμικού συλλέκτη μικρής ροής νερού



Σχήμα 2

Κεραμικός συλλέκτης μικρής ροής νερού

### ΑΝΑΛΥΣΗ

Όπως είναι γνωστό, ο βαθμός απόδοσης δίνεται από την εξίσωση:

$$n = F_R (\tau\alpha)_c - F_R U_L [ (T_{ci} - T_a) / I ] \quad (1)$$

Μετά από πειραματικές μετρήσεις, βρέθηκε ότι [8]:

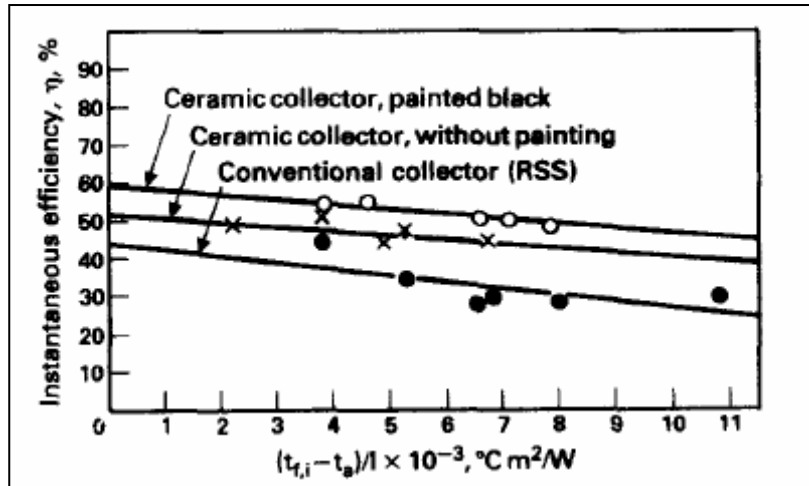
$$n = 0.513 - 5.20 ( T_{ci} - T_a ) / I \quad (2)$$

ενώ αν βαφτεί η απορροφητική επιφάνεια μαύρη [8], τότε:

$$n = 0.592 - 6.22 ( T_{ci} - T_a ) / I \quad (3)$$

Για μια πιο ολοκληρωμένη μελέτη, παραθέτουμε και την αντίστοιχη εξίσωση για τον τυπικό επίπεδο ηλιακό συλλέκτη, καθώς επίσης και γραφική παράσταση που απεικονίζει τις παραπάνω εξισώσεις.

$$\eta = 0.439 - 8.54 (T_{ci} - T_a) / I \quad (4)$$



Σχήμα 3

Βαθμοί απόδοσης διαφόρων συλλεκτών

Παρατηρούμε ότι η απόδοση του κεραμικού συλλέκτη μικρής ροής νερού είναι σαφώς μεγαλύτερη από αυτή του τυπικού επίπεδου και φτάνει μέχρι και 17% μεγαλύτερη, όταν το απορροφητικό πιάτο βαφτεί μαύρο.

## 1.2.6 ΕΠΙΠΕΔΟΣ ΗΛΙΑΚΟΣ ΣΥΛΛΕΚΤΗΣ ΔΙΠΛΩΝ ΠΑΡΑΛΛΗΛΩΝ ΠΛΑΚΩΝ

### ΓΕΝΙΚΑ

Χαρακτηριστικό γνώρισμα των συλλεκτών αυτών αποτελεί η έλλειψη σωλήνων, διαμέσω των οποίων ρέει το νερό. Το απορροφητικό πιάτο αυτού του τύπου αποτελείται από δύο παράλληλες πλάκες, οι οποίες είναι διαχωρισμένες η μία από την άλλη με ένα μικρό κενό της τάξης των 1 – 2 mm, το οποίο επιτρέπει τη ροή του νερού μεταξύ των πλακών [10].

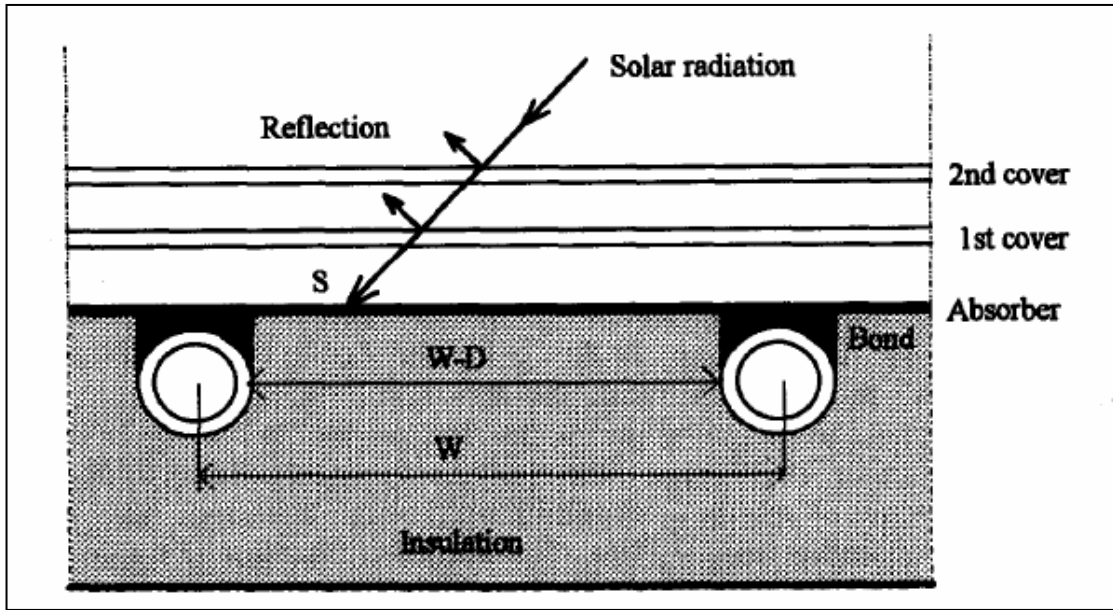
Τα πλεονεκτήματα αυτού του συλλέκτη μπορούν να συνοψισθούν παρακάτω:

- Απλότητα στον σχεδιασμό και στην κατασκευαστική διαδικασία
- Εξάλειψη της πολύπλοκης διαδικασίας συγκολλήσεων των σωλήνων
- Χρήση όλης της επιφάνειας όσον αφορά την απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας [10]
- Άμεση μεταφορά της απορροφούμενης θερμότητας στο εργαζόμενο μέσο
- Ομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας στο απορροφητικό πιάτο
- Ομοιόμορφη ροή νερού μεταξύ των πλακών

Εκτός από τα προαναφερθέντα πλεονεκτήματα, ο συλλέκτης αυτός παρουσιάζει το μειονέκτημα των διαρροών εργαζόμενου μέσου, κυρίως σε συνθήκες υψηλών πιέσεων [10].

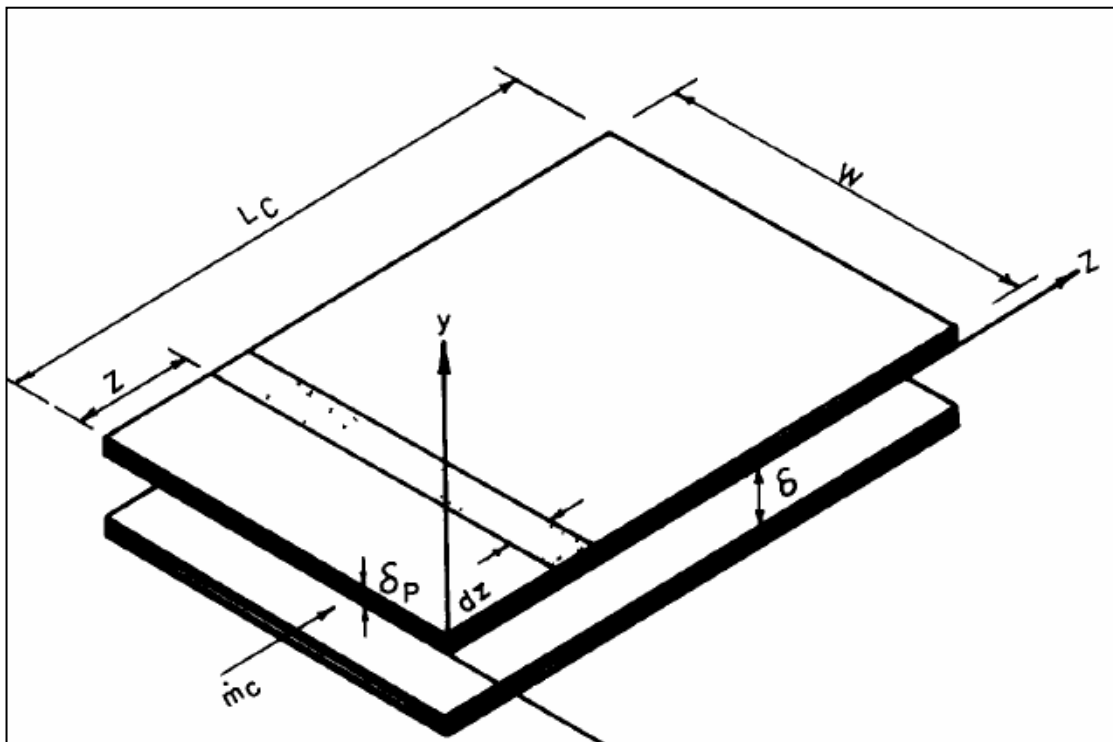
### ΔΟΜΗ

Ο συλλέκτης αυτός αποτελείται από δύο παράλληλες πλάκες οι οποίες είναι συγκολλημένες μεταξύ τους σε δύο σημεία. Το νερό που ρέει μεταξύ των δύο πλακών, θερμαίνεται και κινείται εξαιτίας των αναπτυσσόμενων θερμικών τάσεων [10]. Αναλυτικά, ο συλλέκτης απεικονίζεται στα παρακάτω σχήματα.



Σχήμα 1

Συλλέκτης διπλών παράλληλων πλακών



Σχήμα 2

Συλλέκτης διπλών παράλληλων πλακών

## ΑΝΑΛΥΣΗ

Η ωφέλιμη θερμότητα δίνεται από τον τύπο:

$$Q_u = \dot{m}_w C_p (T_{co} - T_{ci}) = A_g [ F_R (\tau\alpha)_c I - F_R U_L (T_{ci} - T_a) ] \quad (1)$$

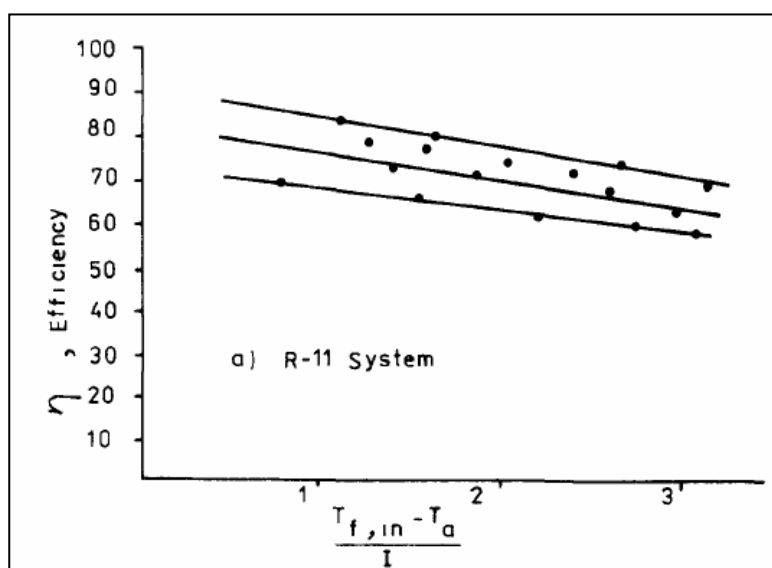
Με τη βοήθεια του ενεργειακού ισοζυγίου μεταξύ του απορροφητικού πιάτου και του νερού που ρέει μεταξύ των παράλληλων πλακών, καταλήγουμε στο ότι ο συντελεστής  $F'$ , ο οποίος εκφράζει την αποτελεσματικότητα της μεταφοράς θερμότητας από την απορροφητική επιφάνεια στο εργαζόμενο μέσο και ο οποίος σχετίζεται με τον συντελεστή  $F_R$  [10], δίνεται από την εξίσωση:

$$F' = \frac{1}{\frac{1}{w} + \frac{U_L}{2(w+\delta)} \left| \frac{\delta p}{kp} + \frac{1}{h_f} \right|} \quad (2)$$

και ο βαθμός απόδοσης του συλλέκτη, υπολογίζεται ως εξής:

$$\eta = Q_u / A_g I = F_R (\tau\alpha)_c - F_R U_L [ (T_{ci} - T_a) / I ] \quad (3)$$

Γραφική παράσταση του βαθμού απόδοσης, απεικονίζεται στο σχήμα 3:



Σχήμα 3

Βαθμός απόδοσης συλλέκτη

## 1.2.7 ΕΠΙΠΕΔΟΣ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΟΣ ΗΛΙΑΚΟΣ ΣΥΛΛΕΚΤΗΣ

### ΓΕΝΙΚΑ

Ένας σημαντικός περιορισμός στην λειτουργία των επίπεδων ηλιακών συλλέκτων είναι ότι δεν μπορούν να συλλέξουν ακτινοβολία αποτελεσματικά κατά τις πρώτες πρωινές ώρες και αργά το απόγευμα. Αυτό συμβαίνει, εξαιτίας της μεγάλης γωνίας πρόσπτωσης της ακτινοβολίας, το οποίο συνεπάγεται πολύ μεγάλο μέγεθος ηλιακών συλλεκτών [11].

Ένας τρόπος αντιμετώπισης του παραπάνω προβλήματος είναι η χρήση ενός κυλινδρικού συλλέκτη, του οποίου ο άξονας που διέρχεται από το κέντρο να έχει κλίση  $45^\circ$  και να προσανατολίζεται προς το Νότο [11]. Σε αυτόν τον συλλέκτη, το απορροφητικό πιάτο είναι κυλινδρικό και καλυμμένο με δύο στρώματα πλαστικού. Ο κύλινδρος είναι γεμάτος νερό και η εξωτερική του επιφάνεια είναι βαμμένη μαύρη για να δημιουργηθεί η απορροφητική επιφάνεια. Η θερμότητα συσσωρεύεται στον κύλινδρο από τις 8 π.μ έως και τις 4 μ.μ.

Το κύριο μειονέκτημα του συλλέκτη είναι ότι ένα σημαντικό μέρος της αποθηκευτικής δεξαμενής παραμένει χωρίς μόνωση, με αποτέλεσμα να υπάρχουν σοβαρές απώλειες κατά τη διάρκεια της νύχτας.

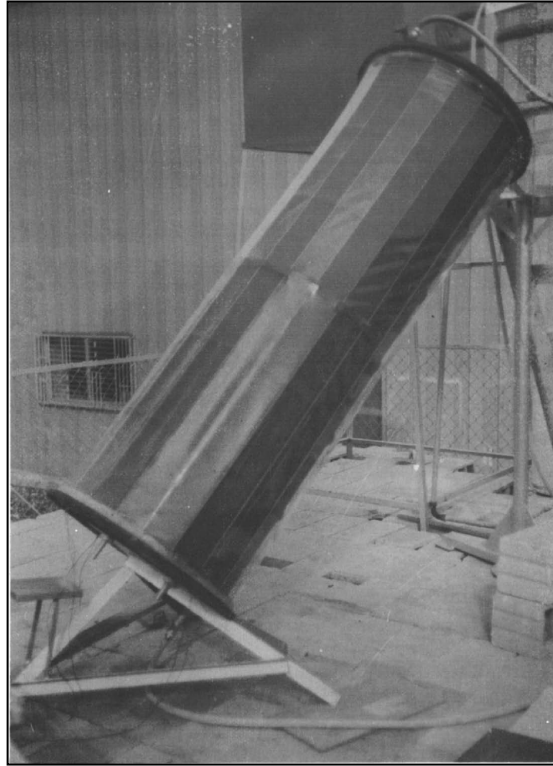
Για την ελαχιστοποίηση του προβλήματος αυτού, κατασκευάστηκε ένας παρόμοιος συλλέκτης, με δύο κυλίνδρους, ο οποίος και θα μελετηθεί περαιτέρω.

### ΔΟΜΗ

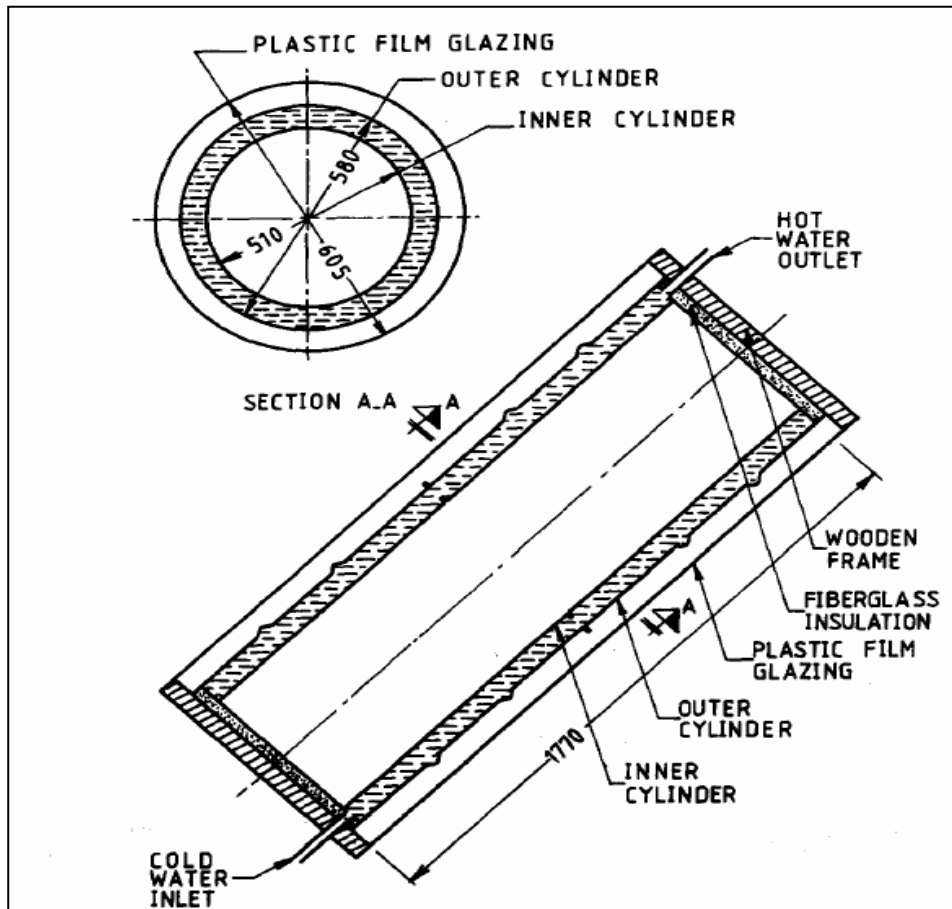
Την απορροφητική επιφάνεια του συλλέκτη αποτελεί ένας κύλινδρος διαμέτρου 580 mm, στο εσωτερικό του οποίου είναι τοποθετημένος και ένας άλλος κύλινδρος διαμέτρου 510 mm [11]. Ο εξωτερικός κύλινδρος είναι μονωμένος με πλαστικό κάλυμμα, ενώ υπάρχει μόνωση και στο αντιδιαμετρικό σημείο των κυλίνδρων. Το κενό, πλάτους 35 mm που δημιουργείται μεταξύ των κυλίνδρων γεμίζει με νερό, το οποίο θερμαίνεται αρκετά γρήγορα και οδηγείται στη συνέχεια στην αποθηκευτική δεξαμενή [11]. Ο συλλέκτης είναι τοποθετημένος με κλίση  $45^\circ$  για βέλτιστη λειτουργία κατά τη διάρκεια του χειμώνα.

Σχηματικά, ο συλλέκτης αυτός απεικονίζεται στα σχήματα 1 και 2 που ακολουθούν.





Σχήμα 1  
Κυλινδρικός συλλέκτης



Σχήμα 2  
Σχηματική απεικόνιση κυλινδρικού συλλέκτη

## ΑΝΑΛΥΣΗ

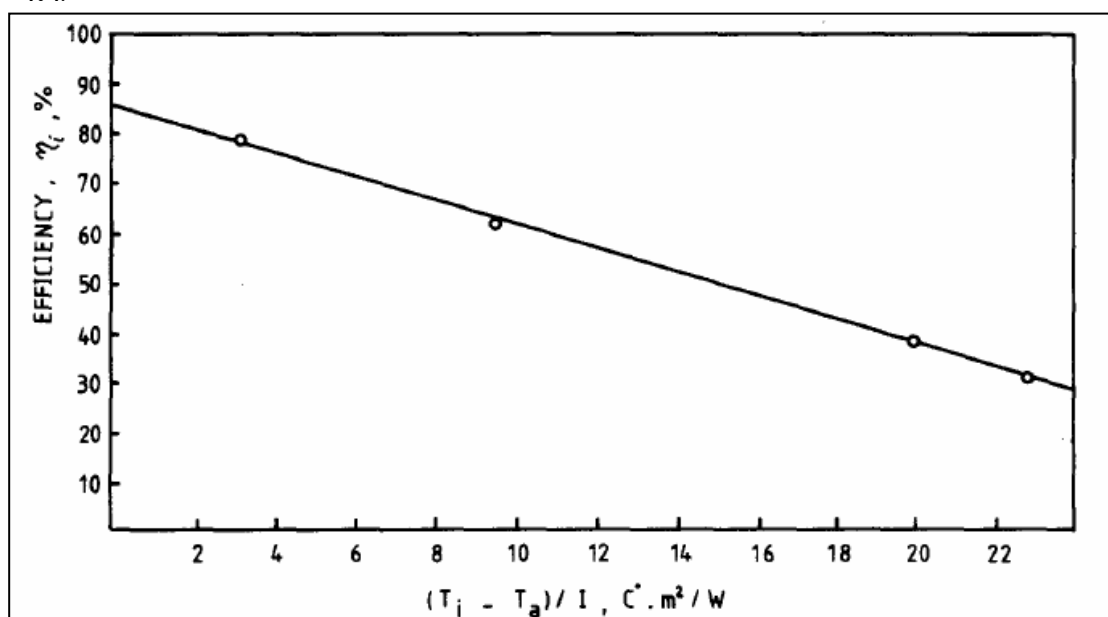
Με εφαρμογή της γνωστής, για τον βαθμό απόδοσης, εξίσωσης:

$$n = F_R (\tau\alpha)_c - F_R U_L [ (T_i - T_a) / I ] \quad (1)$$

και μετά από πειραματικές μετρήσεις [11]:

$$n = 0.854 - 24.4 (T_i - T_a) / I \quad (2)$$

Σχηματικά:



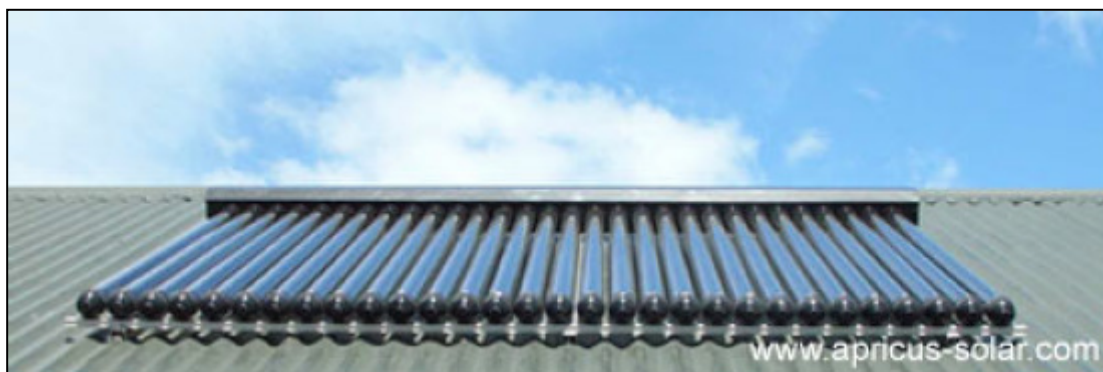
Σχήμα 3

Βαθμός απόδοσης κυλινδρικού συλλέκτη

Παρατηρούμε ότι ο μέγιστος βαθμός απόδοσης του συλλέκτη είναι 85.4%, τιμή που ίσως φαίνεται συνηθισμένη για έναν επίπεδο ηλιακό συλλέκτη, ωστόσο πρέπει να λάβουμε υπόψιν μας ότι οι πειραματικές μετρήσεις έλαβαν χώρα το απόγευμα, όπου η ακτινοβολία δεν είναι μέγιστη. Οπότε, σε συνθήκες μέγιστης ακτινοβολίας, ο μέγιστος βαθμός απόδοσης θα είναι πολύ μεγαλύτερος.

Επίσης, προσπάθειες πρέπει να γίνουν για την ελαχιστοποίηση των θερμικών απωλειών (ο όρος  $F_R U_L$  προέκυψε ίσως με  $24.4 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$  [11], ενώ συνήθως είναι της τάξης των  $8 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ ). Οι μεγάλες θερμικές απώλειες εξηγούνται από την ανεπαρκή θερμομόνωση του συλλέκτη, η οποία περιορίζεται σε ένα πλαστικό κάλυμμα το οποίο περικλείει τον εξωτερικό κύλινδρο.

## 2. ΣΩΛΗΝΕΣ ΚΕΝΟΥ



Σχήμα 1

Σωλήνες κενού

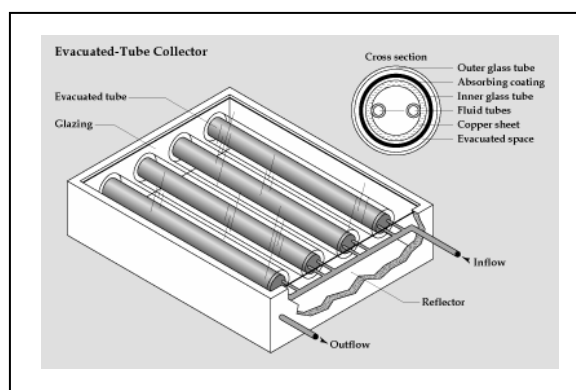
Οι σωλήνες κενού αποτελούνται από παράλληλους γυάλινους σωλήνες, οι οποίοι είναι συγκολλημένοι πάνω σε έναν κεντρικό σωλήνα. Κάθε σωλήνας βρίσκεται σε κατάσταση κενού, έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται οι θερμικές απώλειες.

Αυτό το είδος συλλέκτη λειτουργεί σε εύρος θερμοκρασιών  $77 - 177^{\circ}\text{C}$  και χρησιμοποιείται για θέρμανση – ψύξη βιομηχανικών χώρων ή ακόμα και κατοικιών σε περιοχές που επικρατούν νεφοσκεπείς συνθήκες. Ωστόσο, το κόστος τους ανέρχεται στο διπλάσιο από αυτό των συμβατικών επίπεδων ηλιακών συλλεκτών.

Οι σωλήνες κενού μπορούν να ταξινομηθούν στις παρακάτω κατηγορίες:

- Συλλέκτες άμεσης ροής
- Συλλέκτες θερμικών σωλήνων

### 2.1 Συλλέκτες άμεσης ροής



Σχήμα 2

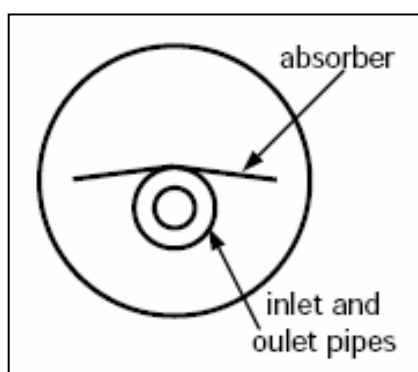
Συλλέκτης άμεσης ροής

Οι συλλέκτες αυτοί αποτελούνται από ζεύγη γυάλινων σωλήνων, στο εσωτερικό των οποίων υπάρχει ένα επίπεδο ή κοίλο αλουμινένιο πτερύγιο, προσκολλημένο πάνω σε έναν μεταλλικό (συνήθως χάλκινο) ή γυάλινο απορροφητικό σωλήνα. Το πτερύγιο είναι επικαλυμμένο, έτσι ώστε να απορροφάται η ηλιακή ακτινοβολία και να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες.

Το εργαζόμενο μέσο είναι το νερό, το οποίο και κυκλοφορεί μέσα στους σωλήνες. Οι μισοί σωλήνες λειτουργούν ως σωλήνες εισόδου και οι άλλοι μισοί ως σωλήνες εξόδου του νερού.

Ανάλογα με την κατανομή των σωλήνων, έχουμε:

### 2.1.1 Ομόκεντρος σωλήνες εισόδου – εξόδου (γυαλί – μέταλλο)



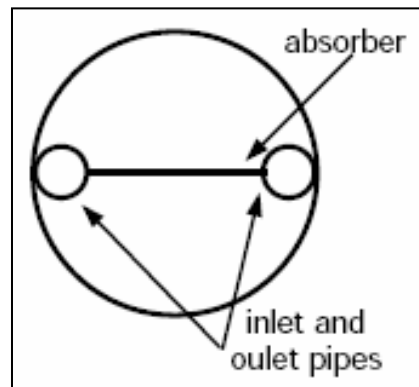
Σχήμα 3

Ομόκεντροι σωλήνες εισόδου -  
εξόδου

Αυτός ο τύπος χρησιμοποιεί έναν μόνο γυάλινο σωλήνα, στο εσωτερικό του οποίου βρίσκεται ένας χάλκινος θερμικός σωλήνας ή σωλήνας νερού με ενσωματωμένο πτερύγιο. Αυτό το είδος συλλέκτη επιτρέπει την περιστροφή κάθε σωλήνα έτσι ώστε το απορροφητικό πτερύγιο να βρίσκεται στην επιθυμητή κλίση, ακόμα και όταν ο συλλέκτης έχει τοποθετηθεί οριζόντια. Αν και ο σχεδιασμός αυτός είναι αποτελεσματικός, δεν είναι πάντα αξιόπιστος, καθώς η κατανομή θερμοκρασιών μεταξύ του γυάλινου και του μεταλλικού σωλήνα διαφέρουν, συνέπεια του οποίου είναι το κενό μεταξύ τους να εξασθενεί και να αστοχεί, καθιστώντας ανύπαρκτη την

λειτουργία εν κενώ και συμβάλλοντας στην κατακόρυφη ελάττωση του βαθμού απόδοσής του.

### 2.1.2 Ξεχωριστούς σωλήνες εισόδου – εξόδου (γυαλί – μέταλλο)



Σχήμα 4

Ξεχωριστοί σωλήνες εισόδου -  
εξόδου

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

### 2.1.3 Συλλέκτης τύπου Σίδνεϊ (γυαλί – γυαλί)



Σχήμα 5

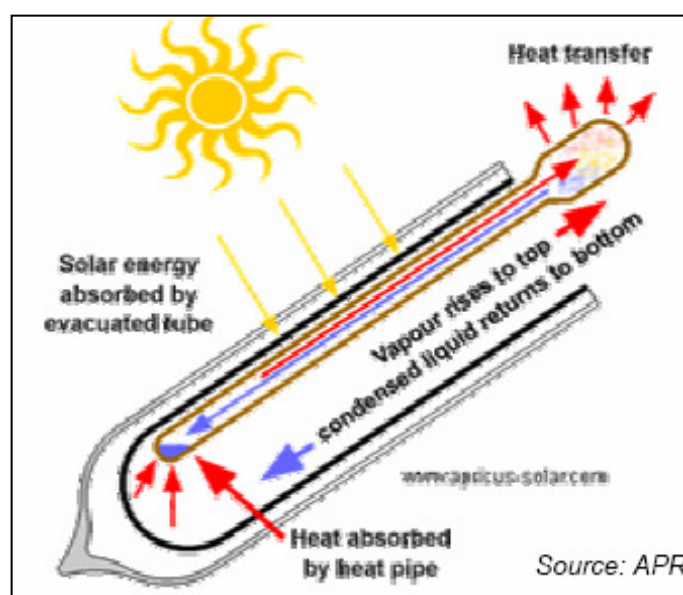
Συλλέκτης τύπου Σίδνεϊ

Αυτός ο συλλέκτης αποτελείται από δύο γυάλινους σωλήνες (ο ένας μέσα στον άλλον), των οποίων τα άκρα είναι ενωμένα. Ο εσωτερικός σωλήνας είναι επικαλυμμένος με κυλινδρικό μεταλικό απορροφητή. Το είδος αυτό δεν είναι τόσο

αποτελεσματικό όσο τα άλλα δύο, αλλά είναι φθηνότερο και πιο αξιόπιστο. Επιπρόσθετα, σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών υπερτερεί σε σύγκριση με τα δύο προαναφερθέντα.

Μερικές φορές, τοποθετείται και ένας ανακλαστής στο πίσω μέρος των σωλήνων, έτσι ώστε να αυξηθεί η απορροφώμενη ποσότητα ηλιακής ακτινοβολίας.

## 2.2 Συλλέκτες θερμικών σωλήνων



Σχήμα 6

Συλλέκτης θερμικών σωλήνων

Σε αυτό το είδος συλλέκτη, ο θερμικός σωλήνας είναι ρηχός και λειτουργεί υπό κενό όπως και στην προηγούμενη περίπτωση. Η διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι το κενό δεν διαδραματίζει μονωτικό ρόλο αλλά βοηθά στην αλλαγή φάσης του εργαζόμενου μέσου. Αναλυτικότερα, η μικρή ποσότητα νερού (αναμεμειγμένη με διάφορες προσμείξεις) που υπάρχει στον θερμικό σωλήνα επέρχεται σε κατάσταση βρασμού στους 30 °C εξαιτίας του κενού, εξατμίζεται και μετακινείται στο πάνω μέρος του σωλήνα, μεταφέροντας θερμότητα στον συμπυκνωτή. Μεταδίδοντας την θερμότητα στον συμπυκνωτή, επανέρχεται στην υγρή κατάσταση και επιστρέφει στο κάτω μέρος του σωλήνα, οπότε και η διαδικασία ξεκινά εκ νέου.

Ένα πλεονέκτημα του συλλέκτη αυτού είναι η στεγνή σύνδεση του απορροφητή με τον κεντρικό σωλήνα. Κατά αυτόν τον τρόπο, η εγκατάσταση γίνεται ευκολότερη και

κάθε σωλήνας μπορεί να αντικατασταθεί, χωρίς να χρειάζεται να αδειάσει όλο το σύστημα από το εργαζόμενο μέσο.

Μειονεκτεί ωστόσο στο γεγονός ότι είναι αναγκαίο να τοποθετείται υπό κλίση  $25^{\circ}$  έτσι ώστε να είναι δυνατή η ροή του νερού προς το κάτω μέρος του συλλέκτη.

## 2.1 ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ ΑΜΕΣΗΣ ΡΟΗΣ

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

#### ΓΕΝΙΚΑ

Αν και οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες είναι οι πλέον διαδεδομένοι και χρησιμοποιούνται κατά κόρον στις περισσότερες οικιακές εφαρμογές, υστερούν σε κάποια σημεία. Για αυτό το λόγο, κατασκευάστηκαν οι συλλέκτες άμεσης ροής, οι οποίοι αν και παρουσιάζουν χαμηλότερο βαθμό απόδοσης [14], αντισταθμίζουν τα μειονεκτήματα των επίπεδων συλλεκτών.

Πιο αναλυτικά, οι συλλέκτες άμεσης ροής δεν απαιτούν προσανατολισμό εξαιτίας του κυκλικού τους σχήματος, σε αντίθεση με τους επίπεδους που χρειάζεται να προσανατολιστούν με κατάλληλη γωνία κλίσης, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται μέγιστη απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας [14].

Επίσης, οι ομόκεντροι σωλήνες εισόδου – εξόδου εμφανίζουν μικρότερες θερμικές απώλειες, λόγω του ότι κατασκευάζονται από γυαλί και μέταλλο.

Τέλος, ο χώρος που καταλαμβάνει ο συλλέκτης άμεσης ροής είναι αρκετά μικρότερος από τον αντίστοιχο των επίπεδων ηλιακών συλλεκτών, καθώς επίσης και το κόστος κατασκευής του.

#### ΔΟΜΗ

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

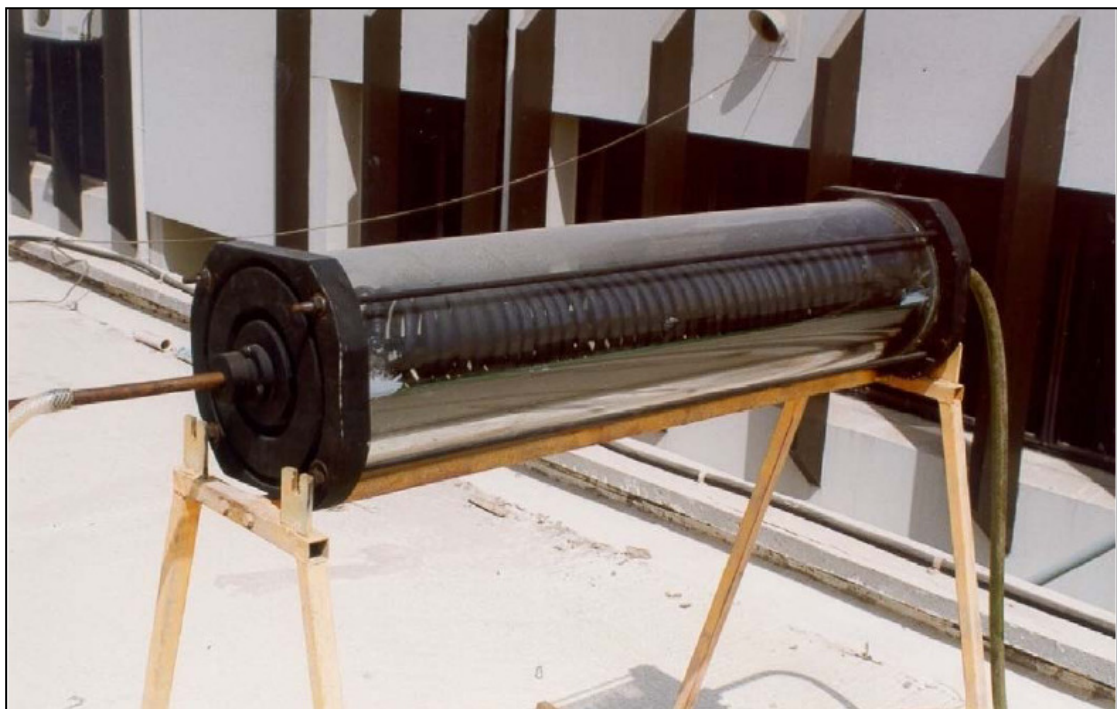
Ο γυάλινος σωλήνας έχει εξωτερική διάμετρο 0.14 m, πάχος 6 mm και μήκος 0.8 m [14]. Τα δύο άκρα του κλείνονται αεροστεγώς με διαφανείς φλάντζες, έτσι ώστε να δημιουργηθεί κενό, το οποίο είναι απαραίτητο για την αποφυγή δημιουργίας ατμών κατά τη θέρμανση του νερού [14]. Η επιλογή του γυαλιού ως υλικό κατασκευής του σωλήνα δικαιολογείται από την μέγιστη απορροφητικότητα που το χαρακτηρίζει,



καθώς επίσης και από την ελάχιστη αντανακλαστικότητα του, βελτιώνοντας κατά πολύ την θερμική απόδοση του συλλέκτη.

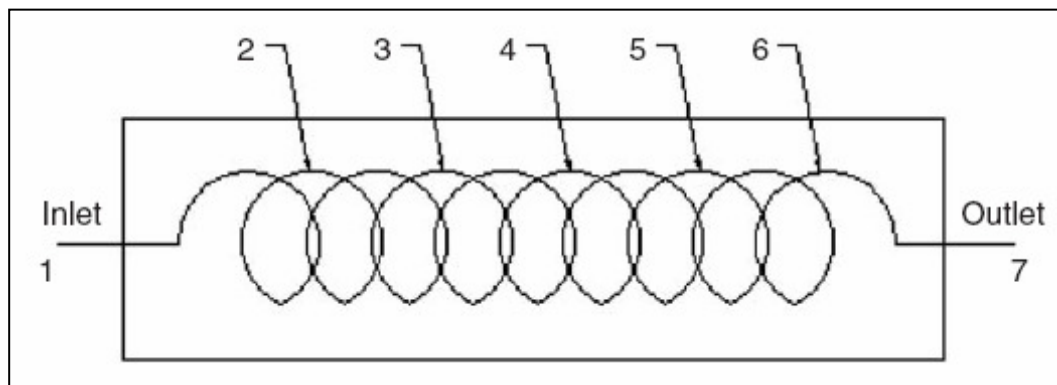
Ο μεταλλικός σωλήνας είναι σπειροειδούς σχήματος, εξωτερικής διαμέτρου 3.175mm και εσωτερικής 2.0 mm [14]. Για τη μέγιστη δυνατή απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας, ο σωλήνας βάφεται μαύρος. Κατά μήκος του σωλήνα τοποθετούνται επτά θερμοζεύγη για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του νερού, το οποίο ρέει στο εσωτερικό του [14].

Σχηματικά, ο συλλέκτης αυτός παρουσιάζεται στα σχήματα 1 και 2.



Σχήμα 1

Ομόκεντρος σωλήνας εισόδου - εξόδου



Σχήμα 2

Σχηματική απεικόνιση ομόκεντρος σωλήνα εισόδου - εξόδου

## ΑΝΑΛΥΣΗ

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

$$n_i = \frac{Q_u}{A_C \times I_b} \quad (1)$$

όπου  $A_c = 0.112 \text{ m}^2$  [14]

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

$$Q_u = A_C \times F_R \times [S - U_1(T_{fi} - T_a)] \quad (2)$$

όπου

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

$T_a$  : η θερμοκρασία περιβάλλοντος

Ο ολικός συντελεστής θερμικών απωλειών  $U_1$  [14] υπολογίζεται ως:

$$U_1 = \left( \frac{1}{h_{rad}} + \frac{\ln(r_2 / r_1)}{2\pi \times L_{glass} \times k_{glass}} + \frac{\ln(r_2 / r_1)}{2\pi \times L_{pipe} \times k_{pipe}} + \frac{1}{h_{water}} \right)^{-1} + U_e + U_b \quad (3)$$

Εξαιτίας του κυκλικού σχήματος του συλλέκτη, δεν υπάρχουν θερμικές απώλειες στα πλαϊνά τοιχώματα ( $U_e=0$ ) και απώλειες στο πίσω μέρος του συλλέκτη ( $U_b=0$ ) [14].

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

$$F_R = F'' \times F' \quad (4)$$

$$F' = \frac{1/U_1}{W \left( \frac{1}{U_1 [D(W-D)F]} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi D h_{fi}} \right)} \quad (5)$$

όπου

D : η εξωτερική διάμετρος του μεταλλικού σωλήνα

W : το κενό μεταξύ των σωλήνων

$C_b = 0$  διότι δεν υπάρχει μεταλλικό πιάτο

$$F'' = \frac{\dot{m} \times C_p}{A_c \times U_1 \times F'} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{A_c \times U_1 \times F'}{\dot{m} \times C_p}\right) \right] \quad (6)$$

Η απορροφώμενη ηλιακή ακτινοβολία υπολογίζεται από την σχέση:

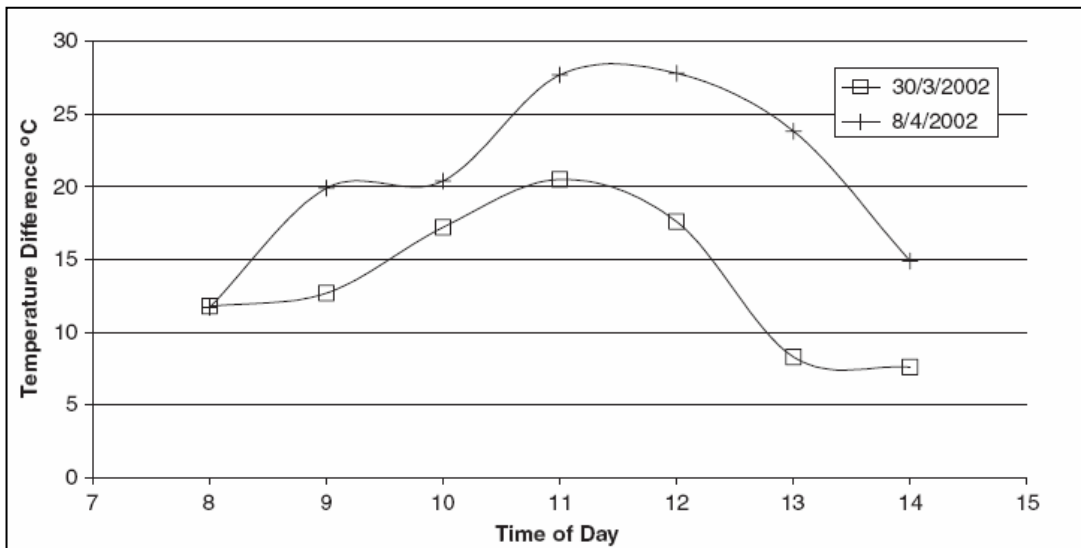
$$S = I_b \times R_b \times (\tau\alpha)_b \quad (7)$$

με

$$R_b = \frac{\cos(\phi - \beta) \times \cos \delta \times \cos \omega + \sin(\phi - \beta) \times \sin \delta}{\cos \phi \times \cos \delta \times \cos \omega + \sin \phi \times \sin \delta} \quad (8)$$

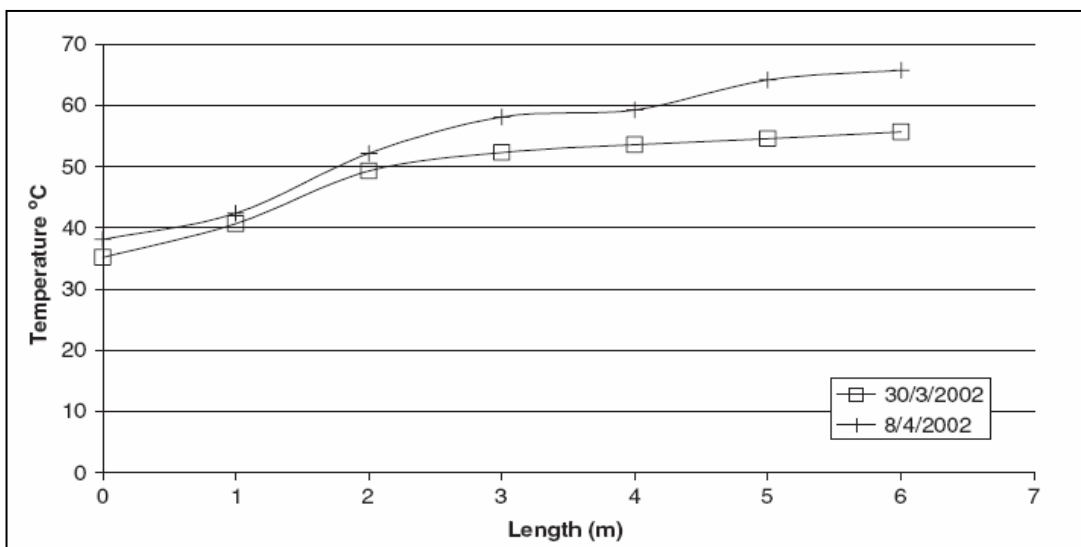
επειδή όμως ο συλλέκτης δεν είναι προσανατολισμένος  $\beta = 0$ .

Στα σχήματα 3 και 4 που ακολουθούν, φαίνονται οι θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ εισόδου και εξόδου του συλλέκτη καθώς επίσης και η θερμοκρασία του νερού κατά το μήκος του συλλέκτη. Από το διάγραμμα 5 παρατηρούμε ότι ο μέγιστος θερμικός βαθμός απόδοσης για τον μήνα Μάρτιο είναι γύρω στο 40%, ενώ για τον Απρίλιο 31%.



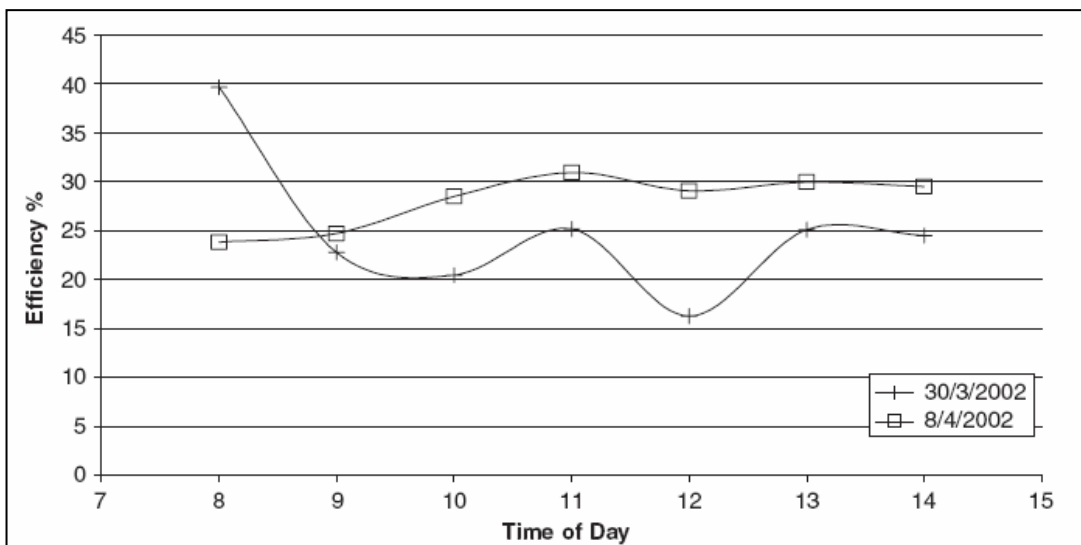
Σχήμα 3

Θερμοκρασιακή μεταβολή κατά τη διάρκεια της ημέρας



Σχήμα 4

Θερμοκρασία του νερού κατά μήκος του συλλέκτη



Σχήμα 5

Βαθμός απόδοσης συλλέκτη κατά τη διάρκεια της μέρας

## 2.1.2 ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ ΤΥΠΟΥ ΣΙΔΝΕΪ (ΓΥΑΛΙ – ΓΥΑΛΙ)

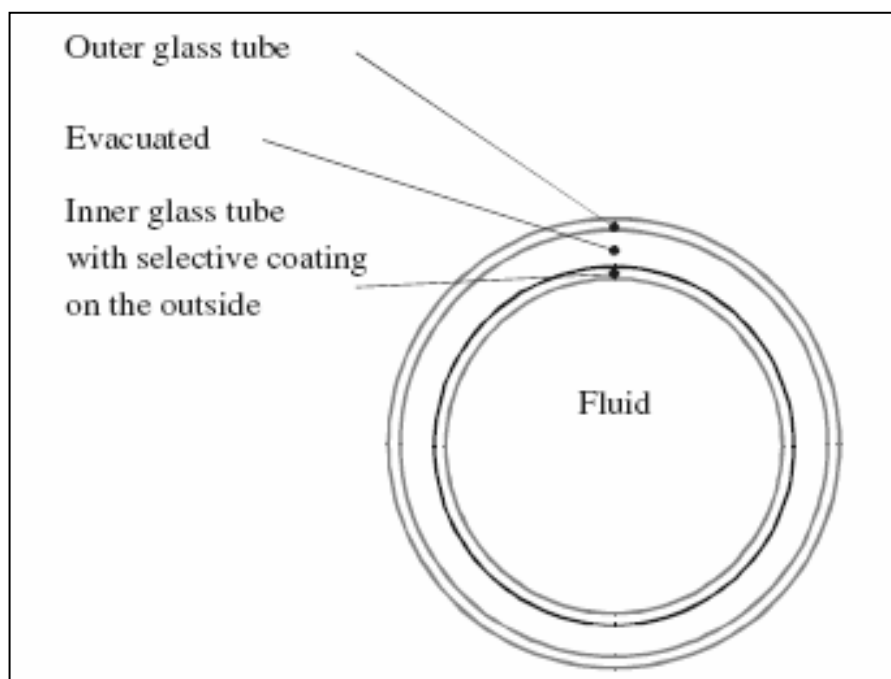
### 2.1.2.1 ΤΥΠΙΚΟΣ ΣΥΛΛΕΚΤΗΣ

#### ΓΕΝΙΚΑ

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

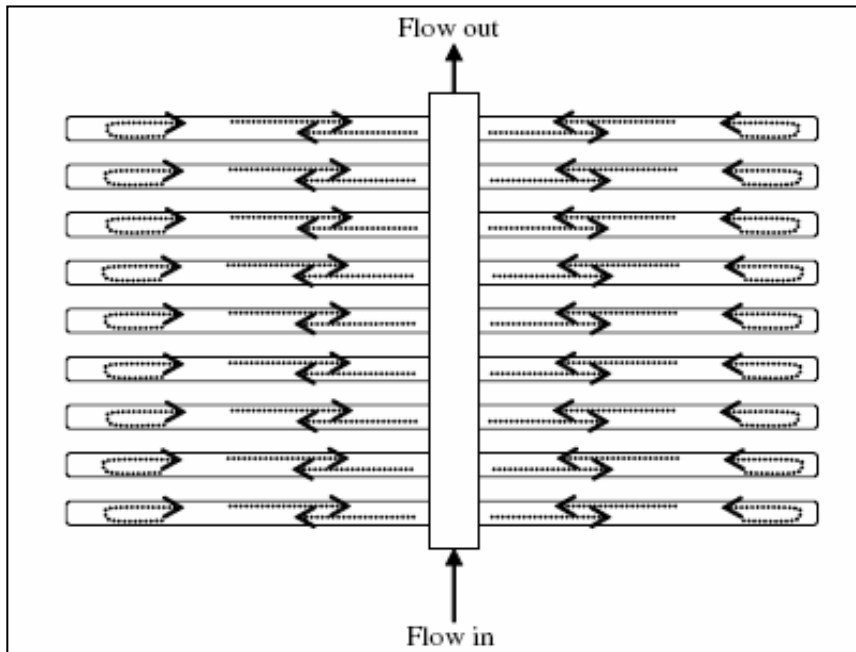
#### ΔΟΜΗ

Οι συλλέκτες αυτού του τύπου αποτελούνται από δύο γυάλινους σωλήνες, όπου ο ένας βρίσκεται στο εσωτερικό του άλλου. Στο ένα άκρο τους είναι ενωμένοι με έναν κεντρικό σωλήνα, από το κάτω μέρος του οποίου εισέρχεται το ρευστό και εξέρχεται από το πάνω.



Σχήμα 1

Τυπικός συλλέκτης τύπου Σίδνεϊ



Σχήμα 2

Σχηματική απεικόνιση ροής του ρευστού διαμέσω συλλέκτη Σίδνεϊ

## ΑΝΑΛΥΣΗ

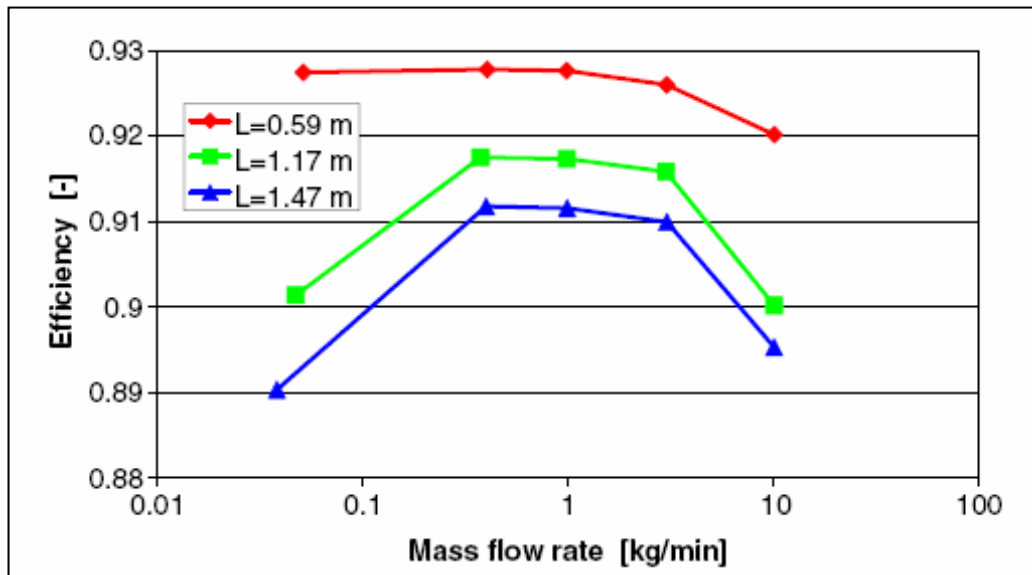
Ο θερμικός βαθμός απόδοσης υπολογίζεται, ως γνωστό, από τον λόγο της ισχύος του συλλέκτη προς της ολικά αποδιδόμενη ηλιακή ακτινοβολία.

$$n = \frac{P_{collector}}{P_{solar}} \quad (1)$$

Η ιδιαιτερότητα του συλλέκτη αυτού είναι ότι ο βαθμός απόδοσής του επηρεάζεται από τη ροή του εργαζόμενου μέσου και από το μήκος του κεντρικού σωλήνα [15]. Πιο αναλυτικά, μετά από πολυάριθμα πειράματα, προέκυψε ότι ο βέλτιστος βαθμός απόδοσης εμφανίζεται για ροή μεταξύ 0.4 – 1 kg/min (σχήμα 3). Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι για μεγαλύτερη ροή (3 – 10 kg/min) ένα μεγάλο ποσοστό του ρευστού ρέει κατευθείαν διαμέσω του κεντρικού σωλήνα χωρίς να εισέρχεται στους γυάλινους σωλήνες. Κατά αυτόν τον τρόπο, η μέση θερμοκρασία των γυάλινων σωλήνων αυξάνεται, οπότε και μειώνεται ο βαθμός απόδοσης. Στην περίπτωση μικρότερης ροής ρευστού (0.05 kg/min) αν και το ρευστό ρέει διαμέσω των γυάλινων σωλήνων, η ροή δεν είναι αρκετή για να διατηρήσει τη θερμοκρασία σε χαμηλά επίπεδα.

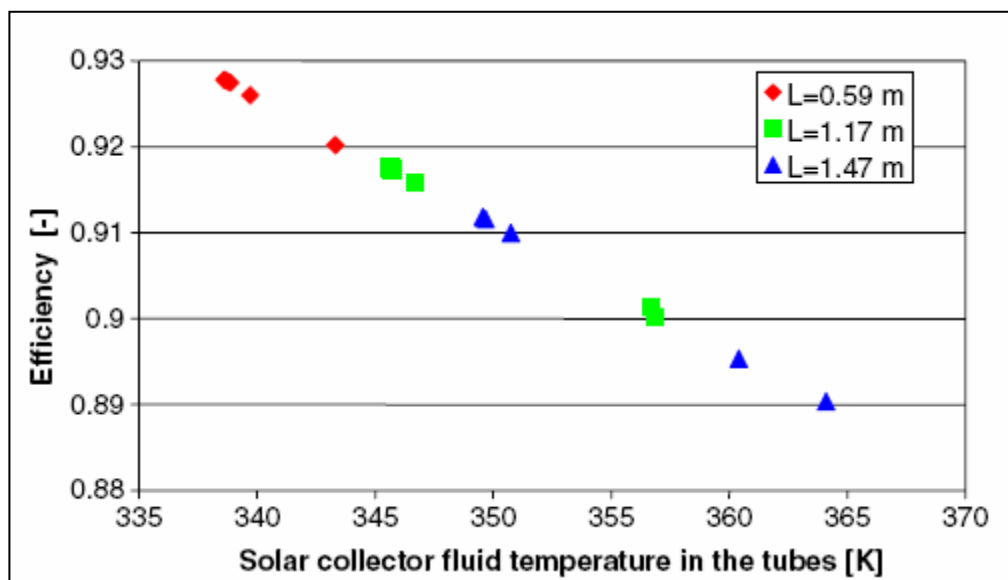
Η αλληλεπίδραση της θερμοκρασίας των γυάλινων σωλήνων και του βαθμού απόδοσης διαφαίνεται καθαρά στο σχήμα 4.

Για τον προσδιορισμό των βέλτιστων γεωμετρικών χαρακτηριστικών του συλλέκτη, πραγματοποιήθηκαν πειράματα για τρία διαφορετικά μήκη κεντρικού σωλήνα [15]. Τελικά, καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι ο βέλτιστος βαθμός απόδοσης, παρουσιάστηκε για το μικρότερο μήκος.



Σχήμα 3

Βαθμός απόδοσης συλλέκτη σε συνάρτηση με ροή ρευστού



Σχήμα 4

Βαθμός απόδοσης συλλέκτη σε συνάρτηση με θερμοκρασία ρευστού στις σωληνώσεις

### 2.1.2.2 ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΣ ΣΥΛΛΕΚΤΗΣ ΤΥΠΟΥ ΣΙΔΝΕΪ

#### ΓΕΝΙΚΑ

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

#### ΔΟΜΗ

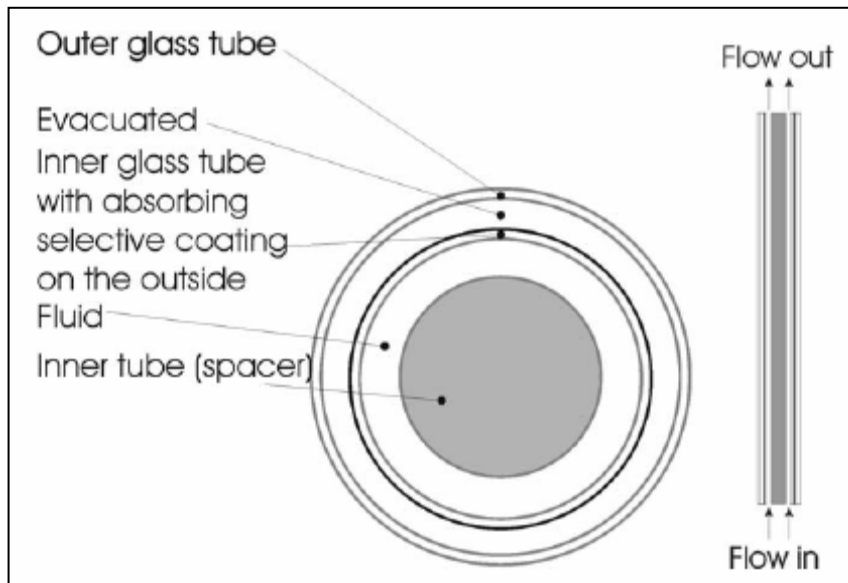
Ο συλλέκτης αυτός αποτελείται από 14 σωλήνες κενού [16], οι οποίοι είναι διατεταγμένοι παράλληλα και τα άκρα των οποίων συνδέονται σε δύο κεντρικούς σωλήνες. Όπως προείπαμε και στην προηγούμενη ενότητα, οι συλλέκτες τύπου Σίδνεϊ είναι δύο γυάλινοι σωλήνες, ο ένας μέσα στον άλλον. Στην προκειμένη περίπτωση, στο εσωτερικό του εσωτερικού σωλήνα τοποθετείται ένας συμπαγής σωλήνας, έτσι ώστε να απαιτείται λιγότερο εργαζόμενο μέσο. Επιπλέον, διασφαλίζει μεγαλύτερο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας. Ο συλλέκτης είναι τοποθετημένος κατακόρυφα και προσανατολισμένος προς το Νότο.



Σχήμα 1

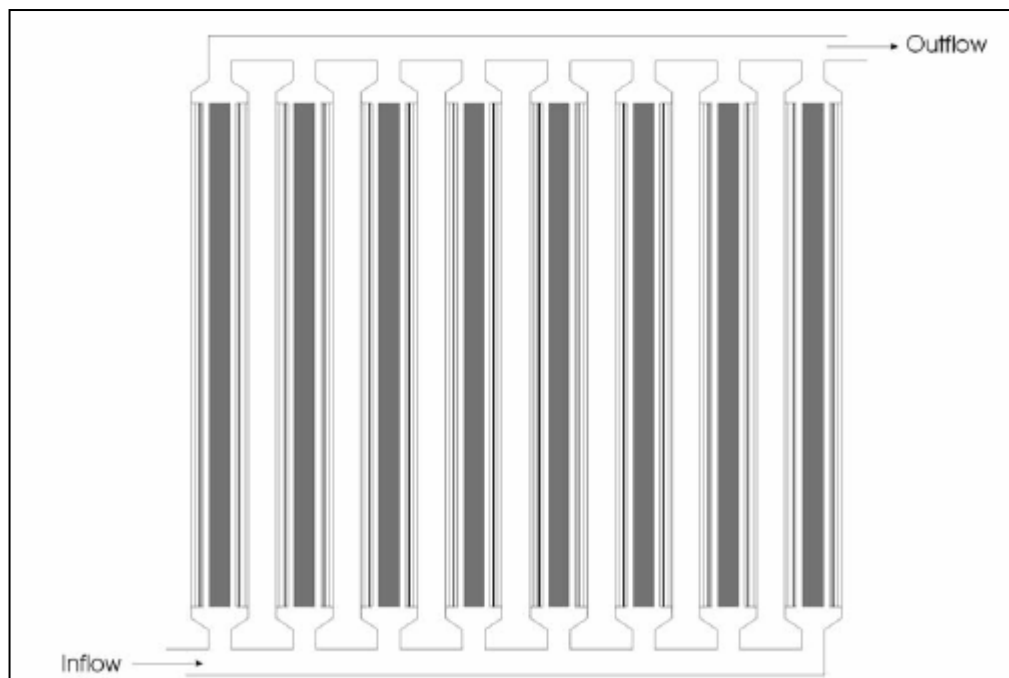
Κατακόρυφος συλλέκτης τύπου Σίδνεϊ





Σχήμα 1

Τομή κατακόρυφου συλλέκτη τύπου Σίδνεϊ



Σχήμα 2

Σχηματική απεικόνιση ροής του ρευστού διαμέσω των σωλήνων κενού

## ΑΝΑΛΥΣΗ

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

$$P_u = P_b + P_d + P_{gr} - P_{loss} \quad (1)$$

όπου

$P_b$  : η ισχύς της άμεσα προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας

$P_d$  : η ισχύς από διάχυτη ακτινοβολία

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

$P_{loss}$  : οι απώλειες ισχύος

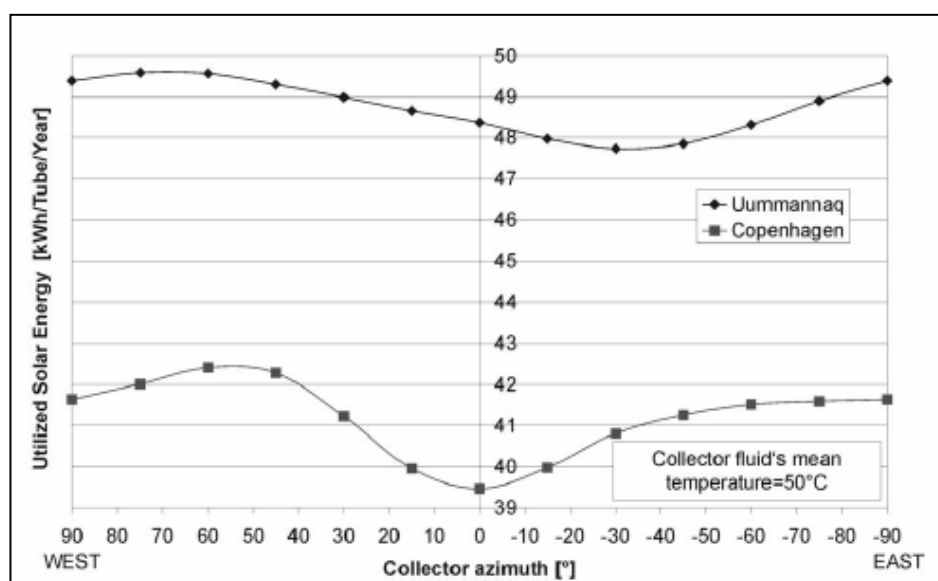
Μετά από πολύπλοκους υπολογισμούς, καταλήξαμε στη σχέση [16]:

$$P_u = \dot{V} \times \rho \times C_p \times (T_{out,hot} - T_{in,cold}) + \frac{C_{p,col} (T_{fm}^t - T_{fm}^{t-\Delta t})}{\Delta t} \quad (2)$$

όπου

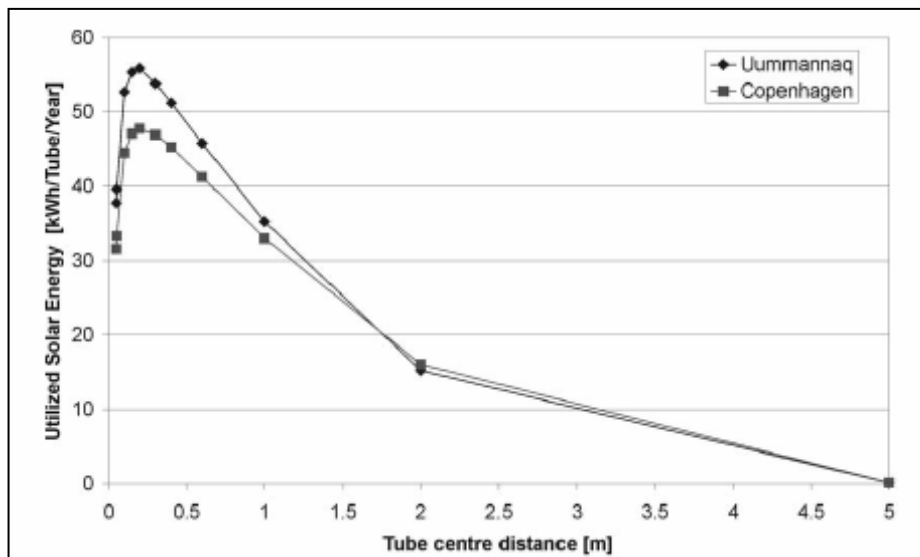
$T_{fm}$  : η μέση θερμοκρασία του ρευστού

Θεωρώντας απόσταση μεταξύ των σωλήνων ίση με 0.067 m και μέση θερμοκρασία ρευστού 50°C, η βέλτιστη γωνία αζιμουθίου προκύπτει γύρω 45 – 60° [16].



Σχήμα 4  
Γραφικός προσδιορισμός βέλτιστης γωνίας αζιμουθίου

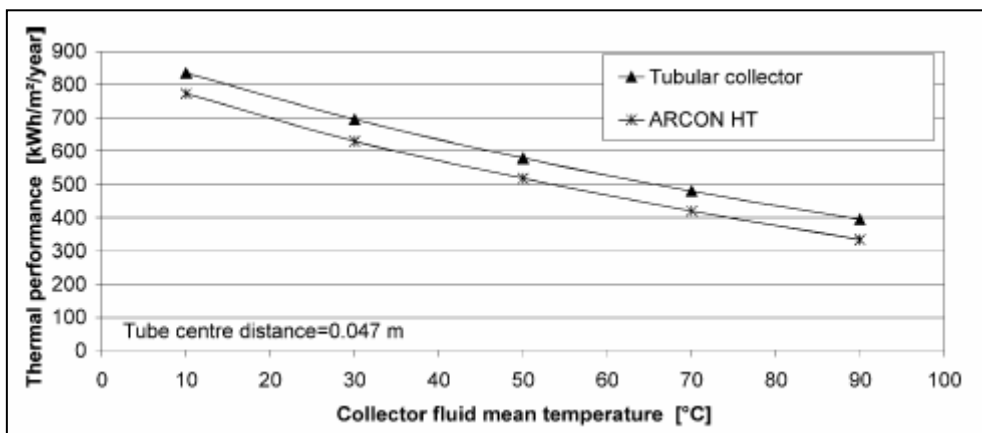
Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η επίδραση της απόστασης μεταξύ των σωλήνων στην ωφέλιμη ηλιακή ενέργεια. Η ενέργεια μειώνεται για αποστάσεις μέχρι και 0.2 m λόγω μειωμένων επισκιασμένων επιφανειών και αυξάνεται για μεγαλύτερες αποστάσεις, εξαιτίας αυξημένων θερμικών απωλειών. Η βέλτιστη απόσταση βρέθηκε ίση με 0.047 – 0.3 m [16].



Σχήμα 5

Ωφέλιμη ηλιακή ακτινοβολία σε συνάρτηση με την απόσταση μεταξύ των σωλήνων

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



Σχήμα 6

Θερμικός βαθμός απόδοσης σε συνάρτηση με τη μέση θερμοκρασία του ρευστού

### 2.1.2.3 ΣΥΛΛΕΚΤΗΣ ΤΥΠΟΥ ΣΙΔΝΕΪ ΜΕ ΑΝΑΚΛΑΣΤΗ

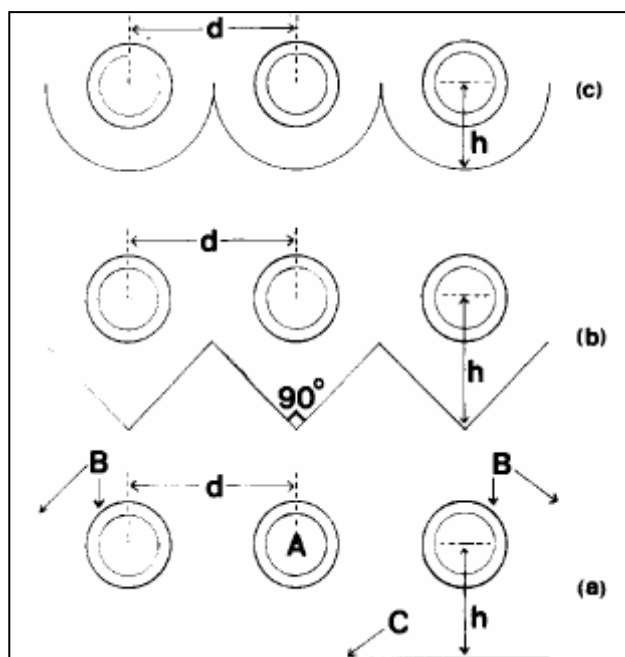
#### ΓΕΝΙΚΑ

Οι σύγχρονοι σωλήνες κενού συνήθως συνοδεύονται από έναν ανακλαστή, ο οποίος είναι τοποθετημένος στο πίσω μέρος του συλλέκτη, έτσι ώστε να γίνεται πλήρης εκμετάλλευση της απορροφητικής επιφάνειας, συνέπεια του οποίου είναι να αυξάνεται ο βαθμός απόδοσης του συλλέκτη.

Υπάρχουν διάφορα είδη ανακλαστών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Τα πιο διαδεδομένα είναι τα κατοπτρικά, τα διάχυτα και τα επίπεδα. Στην παρούσα ενότητα, θα μελετηθούν περαιτέρω τρία είδη κατόπτρων: ένα επίπεδο, ένα τριγωνικό και ένα ημικυκλικό.

#### ΔΟΜΗ

Οι συλλέκτες αυτού του τύπου αποτελούνται από εσωτερικούς σωλήνες διαμέτρου 22mm και πάχους 1.8mm και εξωτερικούς σωλήνες διαμέτρου 30mm και πάχους 1.4mm [17]. Τα μήκη των σωλήνων είναι περίπου 1.4m [17]. Ο συντελεστής απορροφητικότητας είναι 0.92 για μη επικαλυμμένους σωλήνες, 0.80 για επικαλυμμένους με απλή λευκή μπογιά και 0.88 για γυαλιστερή λευκή μπογιά [17]. Σχηματικά, οι συλλέκτες αυτοί φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:

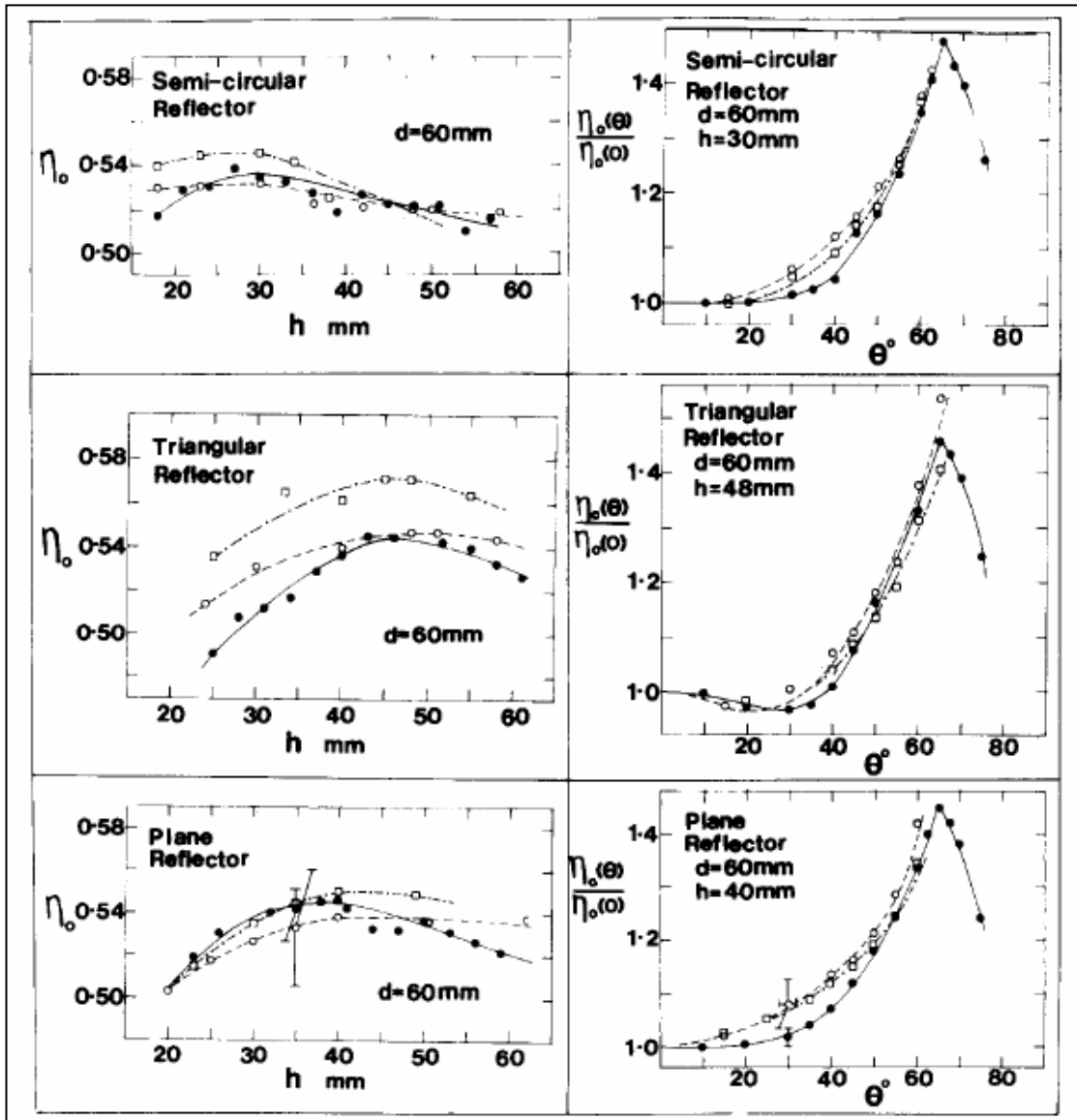


Σχήμα 1

Συλλέκτες τύπου Σίδνεϊ με ανακλαστή

## ΑΝΑΛΥΣΗ

Θεωρώντας ότι η απόσταση μεταξύ των κέντρων των συλλεκτών είναι της τάξης των  $d = 60\text{mm}$  και μετά από πειραματικές διαδικασίες καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα όσον αφορά τη συσχέτιση του  $\eta_0-h$  καθώς επίσης και του λόγου  $\eta_0(\theta)/\eta_0(0) - \theta$  [17].



Σχήμα 2

Γραφικές παραστάσεις βαθμών απόδοσης συλλέκτη τύπου Σίδνεϊ με ανακλαστή

Παρατηρούμε ότι οι μέγιστοι βαθμοί απόδοσης εμφανίζονται για  $h = 40, 48$  και  $30$  mm για τον επίπεδο, τριγωνικό και ημικυλινδρικό ανακλαστή αντίστοιχα. Ο βαθμός απόδοσης στις περιπτώσεις αυτές είναι  $\eta_0 = 0.54, 0.55$  και  $0.53$  αντίστοιχα.

Στον παρακάτω πίνακα [17], φαίνονται οι τιμές του βαθμού απόδοσης για διάφορες γωνίες κλίσης.

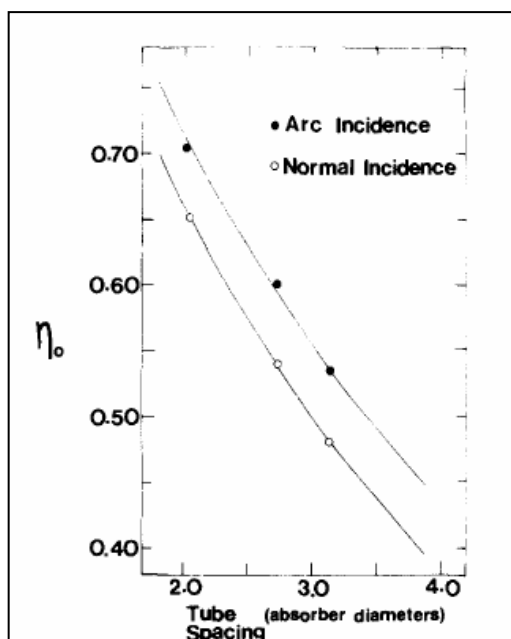
Πίνακας 1

Βαθμός απόδοσης συλλέκτη τύπου Σίδνεϊ με ανακλαστή για διάφορες γωνίες κλίσης

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

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

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



Σχήμα 3

Βαθμός απόδοσης συλλέκτη τύπου Σίδνεϊ με ανακλαστή για διάφορες αποστάσεις

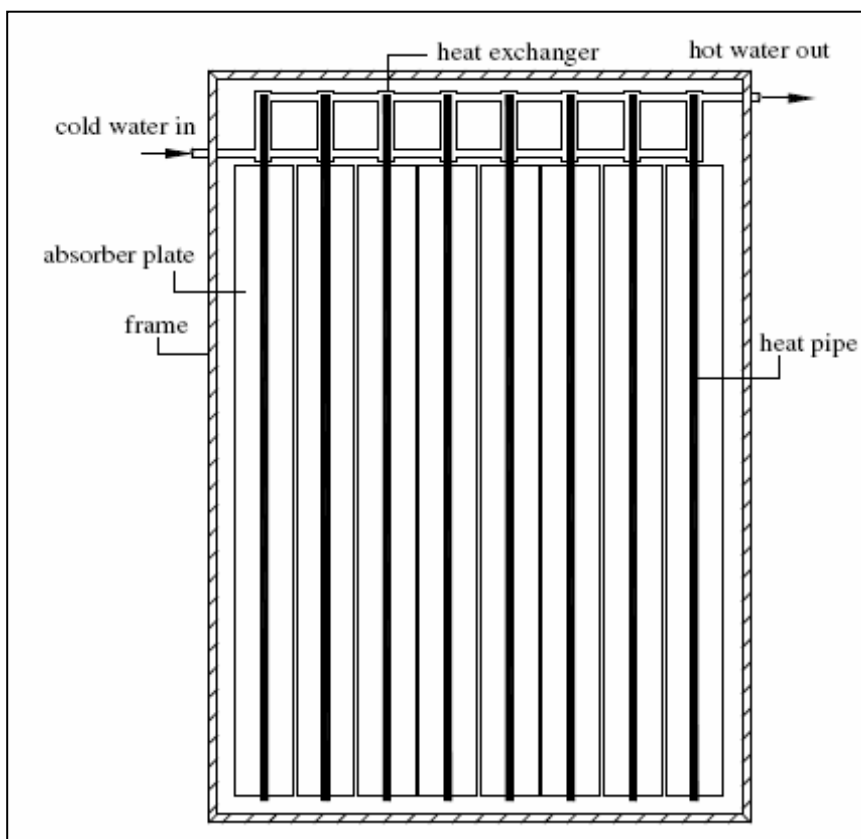
## 2.1 ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ

### 2.2.1 ΤΥΠΙΚΟΣ ΣΥΛΛΕΚΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ

#### ΓΕΝΙΚΑ

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

#### ΔΟΜΗ

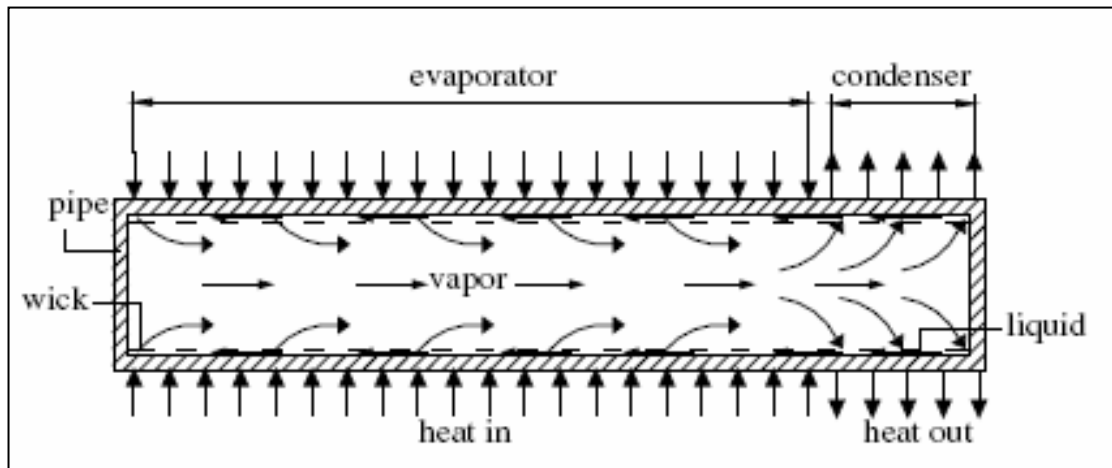


Σχήμα 1  
Συλλέκτης με έξι θερμικούς σωλήνες

Στο σχήμα 1 φαίνεται ένας συλλέκτης, ο οποίος αποτελείται από έξι θερμικούς σωλήνες, εξωτερικής διαμέτρου 12.7 mm και συνολικού μήκους 1850 mm (το μήκος

του εξατμιστή είναι 1550 mm, ενώ του συμπυκνωτή 300 mm) [18]. Επιπρόσθετα, το βήμα μεταξύ των θερμικών σωλήνων είναι 160 mm και το απορροφητικό πιάτο βάφεται μαύρο για τη μέγιστη απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας [18].

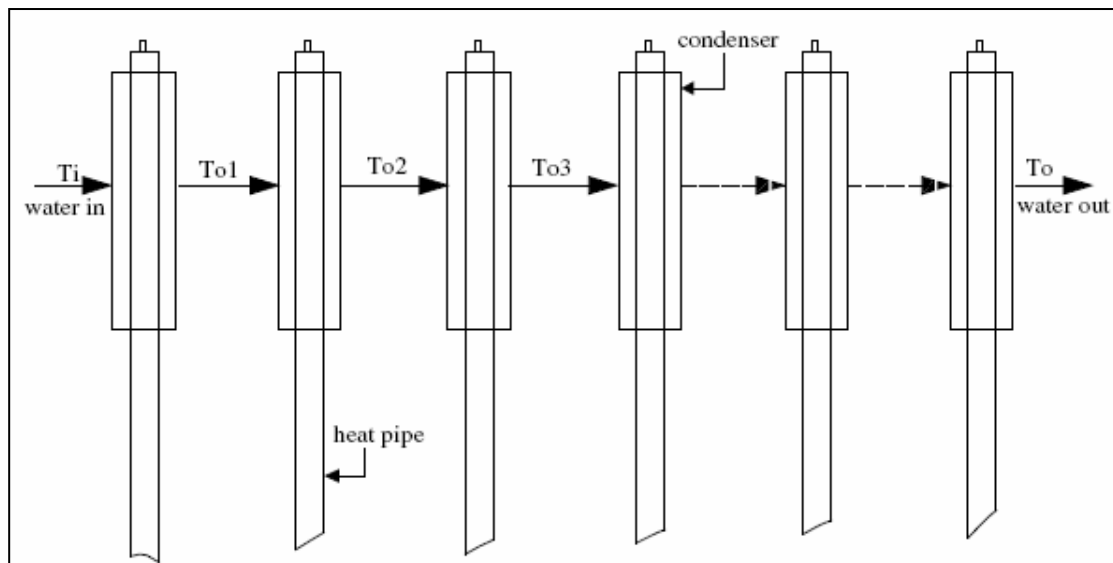
Το σχήμα 2 απεικονίζει ένα μεμονωμένο θερμικό σωλήνα και την αρχή λειτουργίας του.



Σχήμα 2  
Αρχή λειτουργίας μεμονωμένου θερμικού σωλήνα

### ΑΝΑΛΥΣΗ

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

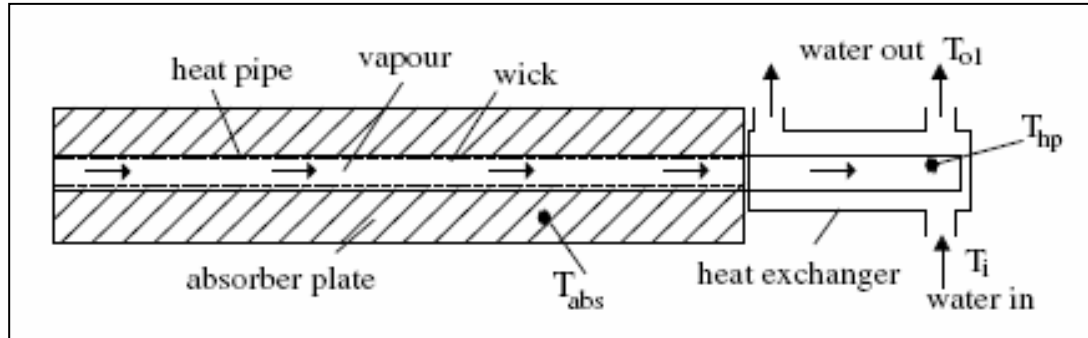


Σχήμα 3  
Ροή εργαζόμενου μέσου δια μέσου των συμπυκνωτών



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

$$Q_{hp1} = A_{hp} \times (T_{hp1} - T_{c,o1}) \times U_{hp} = A_{c1} \times U_{c,o1} \times (T_{c,o1} - T_i) = Q_{c1} \quad (1)$$



Σχήμα 4

Μεταφορά θερμότητας από εξατμιστή στον συμπυκνωτή

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

$$E = \frac{T_o - T_i}{T_{hp} - T_i} \quad (2)$$

Η τελική θερμοκρασία εξόδου από τον τελευταίο συμπυκνωτή είναι:

$$T_o = T_i + E \times (T_{hp} - T_i) \left( \frac{P}{1 + P} \right) \quad (3)$$

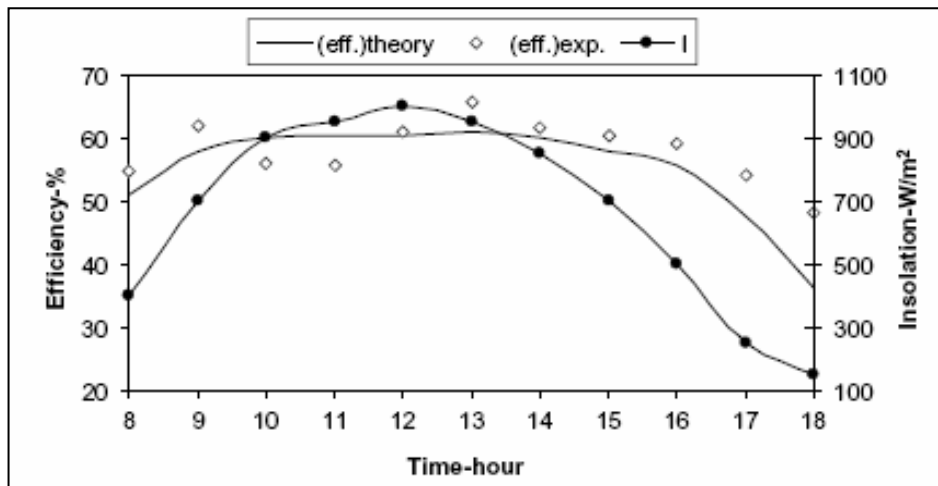
όπου

$$P = \frac{A_{hp1} \times U_{hp}}{A_c \times U_{c,o1}} \quad (4)$$

Από τη γνωστή σχέση για τον βαθμό απόδοσης

$$n = \frac{\dot{m} \times C_p \times (T_o - T_i)}{A \times I} \quad (5)$$

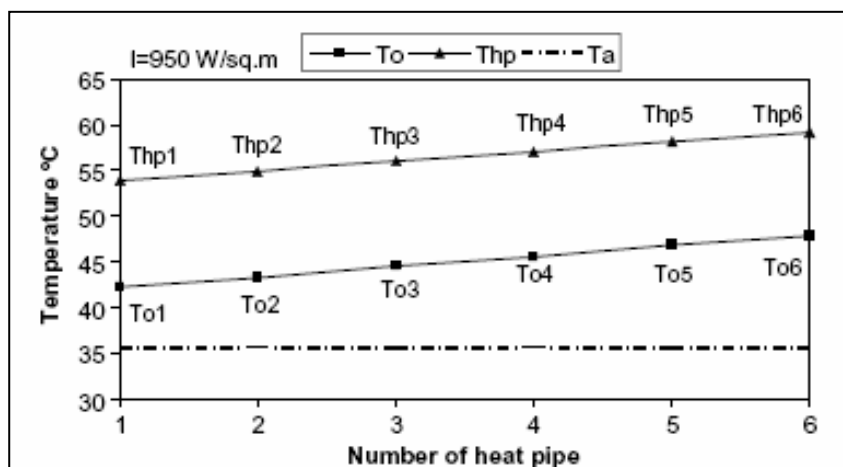
και με θερμοκρασία εξόδου που προκύπτει από τη σχέση (3), καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι ο μέγιστος βαθμός απόδοσης του συλλέκτη είναι γύρω στο 60% [18].



Σχήμα 5

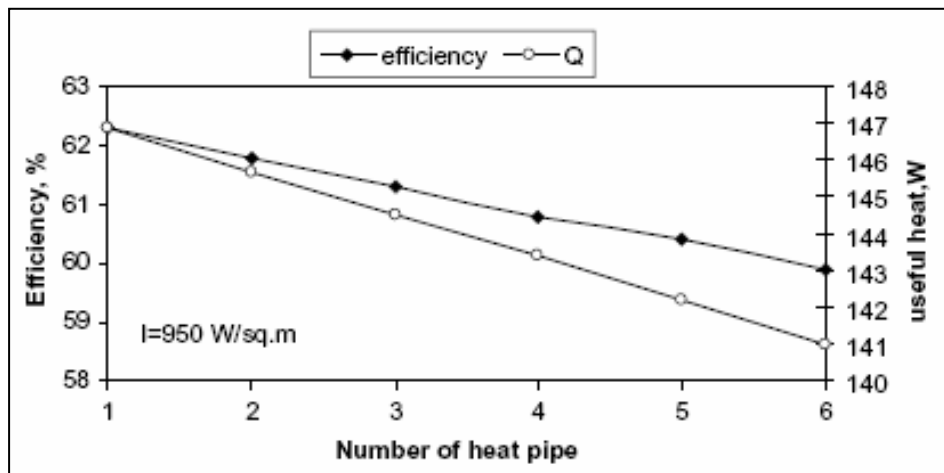
Θεωρητικός και πειραματικός βαθμός απόδοσης του συλλέκτη

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



Σχήμα 6

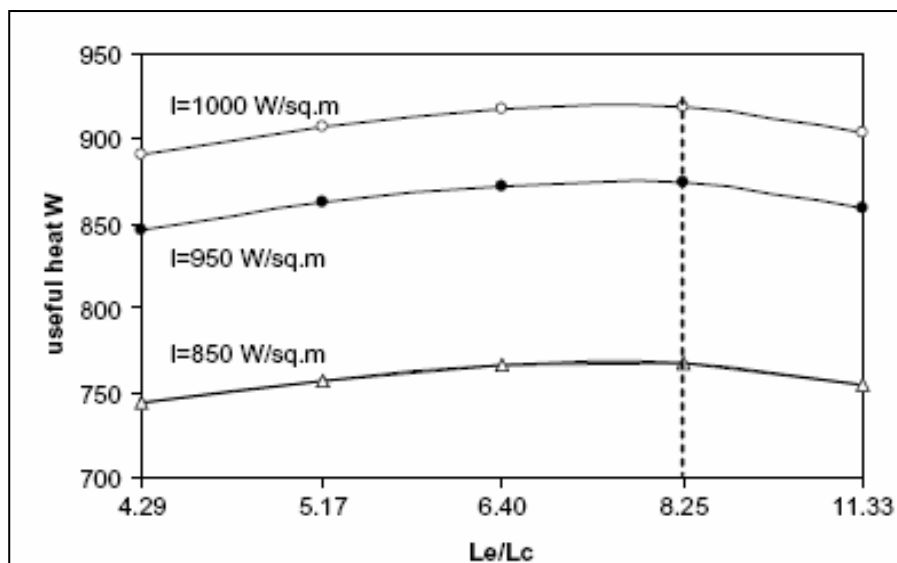
Θερμοκρασία εισόδου του ρευστού στον συμπυκνωτή σε συνάρτηση με τον αριθμό των σωλήνων



Σχήμα 7

Βαθμός απόδοσης του συλλέκτη σε συνάρτηση με τον αριθμό των σωλήνων

Τέλος, η βέλτιστη αναλογία μήκους εξατμιστή προς μήκους συμπυκνωτή είναι 8.25, ενώ περαιτέρω αύξηση του λόγου αυτού έχει αρνητικές συνέπειες διότι αυξάνοντας την απορροφητική επιφάνεια, αυξάνονται και οι θερμικές απώλειες [18].



Σχήμα 8

Γραφικός προσδιορισμός βέλτιστου λόγου μήκους εξατμιστή προς μήκους συμπυκνωτή

## 2.2.2 ΘΕΡΜΙΚΟΣ ΣΩΛΗΝΑΣ ΛΕΠΤΗΣ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ

### ΓΕΝΙΚΑ

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

### ΔΟΜΗ

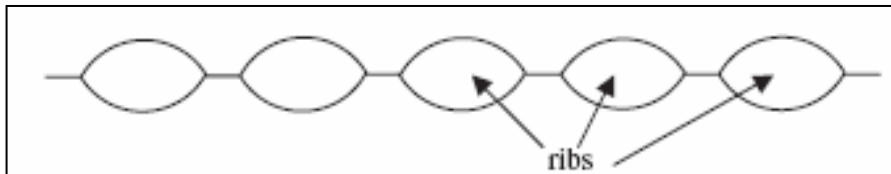
Ο συλλέκτης αυτού του τύπου (σχήμα 1 & 3) αποτελείται από έναν απορροφητή, ένα δοχείο συγκέντρωσης στο κάτω μέρος του και τον συμπυκνωτή στο πάνω μέρος του. Ένας μονωτικός μικροπορώδης δίσκος τοποθετείται στο πίσω μέρος του απορροφητή έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται οι θερμικές απώλειες.

Η διαφορά του από τον τυπικό θερμικό σωλήνα έγκειται στο γεγονός ότι το κύριο τμήμα του συλλέκτη αποτελείται από δυο δίσκους, οι οποίοι διαχωρίζονται από ένα λεπτό κενό εξάτμισης. Οι δυο δίσκοι είναι τοπικά συγκολλημένοι μεταξύ τους κατά όλο το μήκος του απορροφητή, δημιουργώντας κατά αυτόν τον τρόπο ένα δίκτυο μικροσκοπικών θερμικών σωλήνων που συνδέουν το τμήμα εξάτμισης με το τμήμα συμπύκνωσης (σχήμα 2).

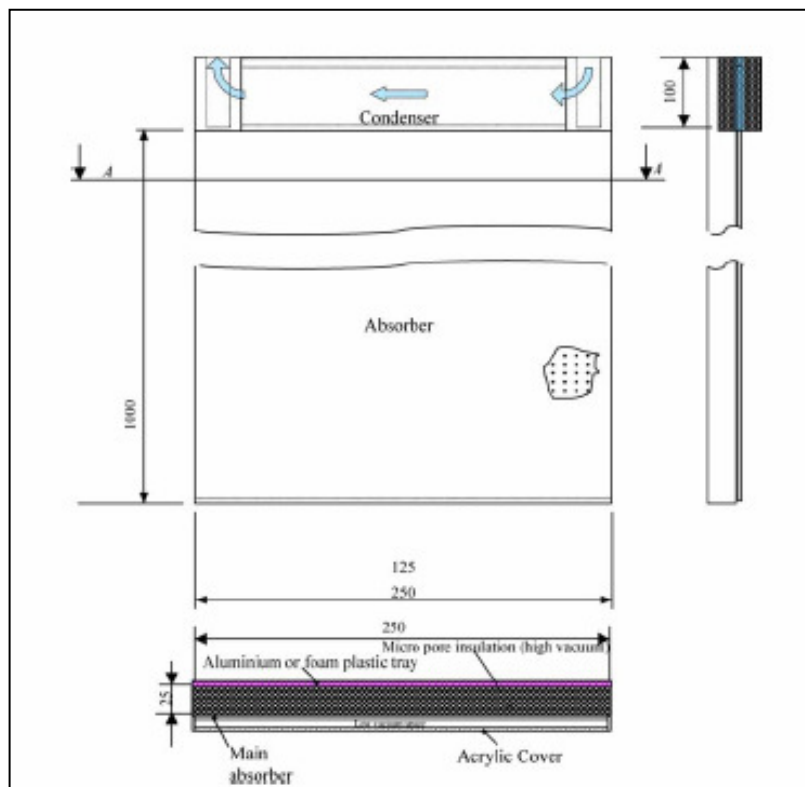
Επειδή ο απορροφητής και οι επιμέρους θερμικοί σωλήνες είναι κατασκευασμένοι από το ίδιο υλικό, το κόστος του συλλέκτη αυτού είναι αρκετά μειωμένο [19]. Επίσης, ο χώρος μεταξύ του καλύμματος και του απορροφητή είναι πλήρως μονωμένος, συνέπεια του οποίου είναι οι απώλειες να θεωρούνται μηδαμινές.



Σχήμα 1  
Θερμικός σωλήνας λεπτής μεμβράνης



Σχήμα 2  
Δίκτυο μικροσκοπικών θερμικών σωλήνων



Σχήμα 3  
Σχηματική απεικόνιση σωλήνα λεπτής μεμβράνης

## ΑΝΑΛΥΣΗ

Η ανάλυση που ακολουθεί [19] λαμβάνει χώρα σε τρία επιμέρους τμήματα του συλλέκτη: στο καπάκι, το οποίο και παρέχει τη μόνωση του συλλέκτη, στον εξατμιστή και στον συμπυκνωτή.

- Ισολογισμός θερμότητας στο καπάκι

$$Q_{inc} = Q_{abs} + Q_{ref} + Q_{tra} \quad (1)$$

$$Q_{abs} = Q_{tc,ab} + Q_{tc,a} \quad (2)$$

- Ισολογισμός θερμότητας στον εξατμιστή

$$Q_{ab} = Q_{tra} - Q_{ab,tc} - Q_{dw,a} \quad (3)$$

- Ισολογισμός θερμότητας στον συμπυκνωτή

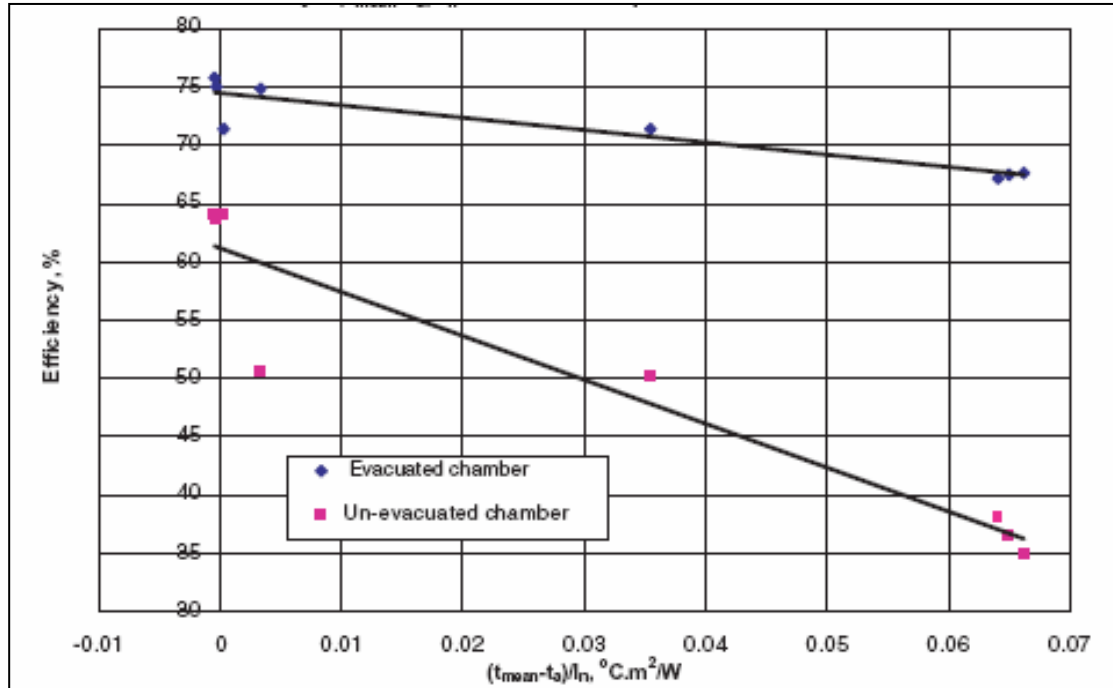
$$Q_{con} = Q_{con,1} + Q_{con,2} + \dots + Q_{con,n} = C_{p,cl} \times \dot{m}_{cl} \times (t_n - t_o) \quad (4)$$

Πίνακας 1  
Επεξήγηση δεικτών

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

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

σχέση με το λόγο των θερμοκρασιών  $\frac{t_{mean} - t_a}{I_n}$ , όπου  $t_{mean} = \frac{(t_o + t_n)}{2}$  [19]



Σχήμα 4  
Βαθμός απόδοσης μονωμένου και μη μονωμένου συλλέκτη

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

περιπτώσεις, η αύξηση του λόγου  $\frac{t_{mean} - t_a}{I_n}$  οδήγησε σε μείωση του βαθμού απόδοσης και μάλιστα με γραμμικό τρόπο.

### 2.2.3 ΟΜΟΑΞΟΝΙΚΟΣ ΘΕΡΜΙΚΟΣ ΣΩΛΗΝΑΣ

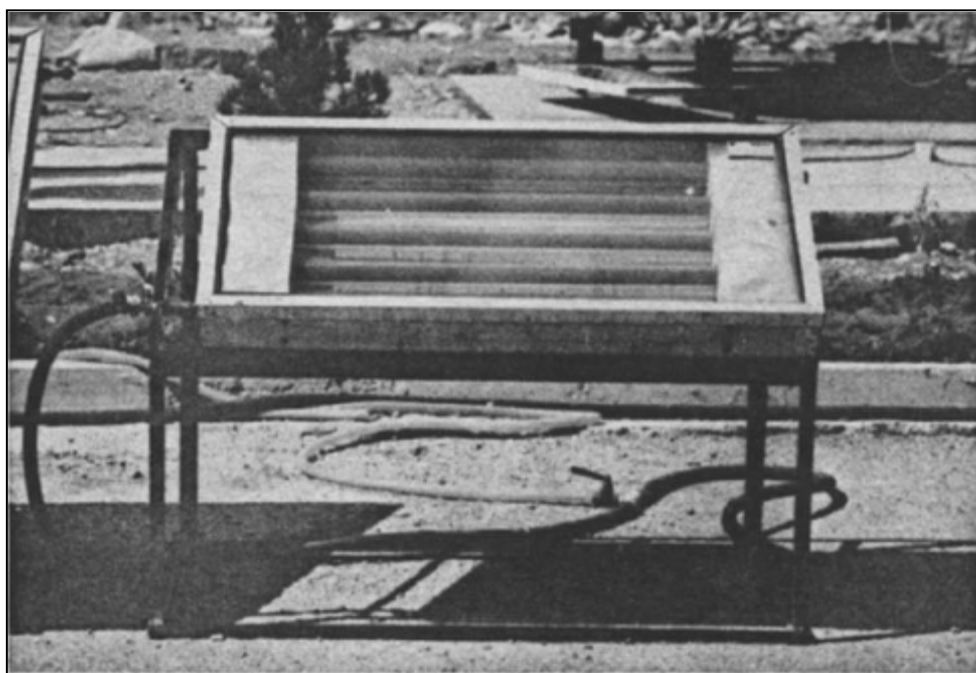
#### ΓΕΝΙΚΑ

Ο ομοαξονικός θερμικός σωλήνας παρουσιάζει τα παρακάτω πλεονεκτήματα:

- Μπορεί να απορροφήσει μικρής ροής ενέργεια, πάνω σε σχετικά μεγάλη επιφάνεια, ενώ αντιθέτως να την απάγει σε μικρή επιφάνεια [20].
- Μπορεί να σχεδιαστεί κατά τρόπο ο οποίος να ευνοεί τη μεταφορά θερμότητας από τον εξατμιστή στον απορροφητή [20].
- Είναι ανεξάρτητος της γωνίας κλίσης του, λόγω του κυκλικού σχήματος του απορροφητή, συνέπεια του οποίου είναι να μπορεί να εγκατασταθεί από οριζόντια έως και κατακόρυφη θέση [20].

#### ΔΟΜΗ

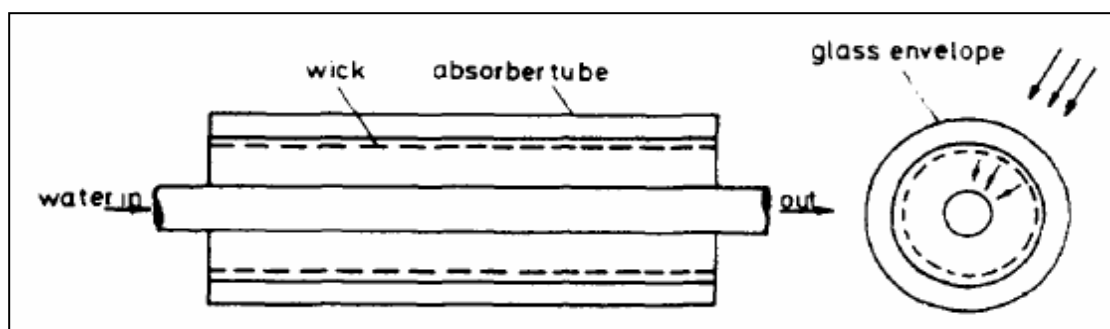
Ο συλλέκτης αυτός αποτελείται από δύο σωλήνες διαφορετικής διαμέτρου, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι ο ένας στο εσωτερικό του άλλου κατά ομοαξονικό τρόπο.



Σχήμα 1  
Ομοαξονικός θερμικός σωλήνας

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



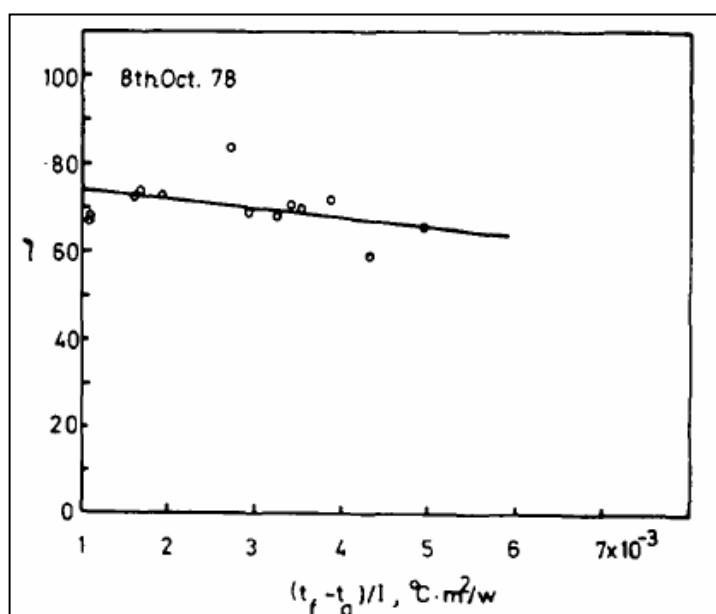


Σχήμα 2  
Τομή ομοαξονικού θερμικού σωλήνα

Η ηλιακή ακτινοβολία λαμβάνεται από την εξωτερική επιφάνεια του εξωτερικού σωλήνα (εξατμιστής), προκαλώντας την εξάτμιση του εργαζόμενου μέσου. Ο ατμός που δημιουργείται, ρέει ακτινικά προς την εξωτερική επιφάνεια του εσωτερικού σωλήνα, όπου και συμπυκνώνεται. Κατά αυτόν τον τρόπο μεταφέρει λανθάνουσα θερμότητα στο κρύο εργαζόμενο μέσο, που ρέει στο εσωτερικό του μικρού εσωτερικού σωλήνα [20]. Το συμπύκνωμα οδηγείται, λόγω βαρύτητας, στο κάτω μέρος του εξωτερικού μεγάλου σωλήνα και από εκεί, με τη βοήθεια της άνωσης, κατευθύνεται στο τμήμα της εξάτμισης όπου και η διαδικασία ξεκινά εκ νέου.

### ΑΝΑΛΥΣΗ

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

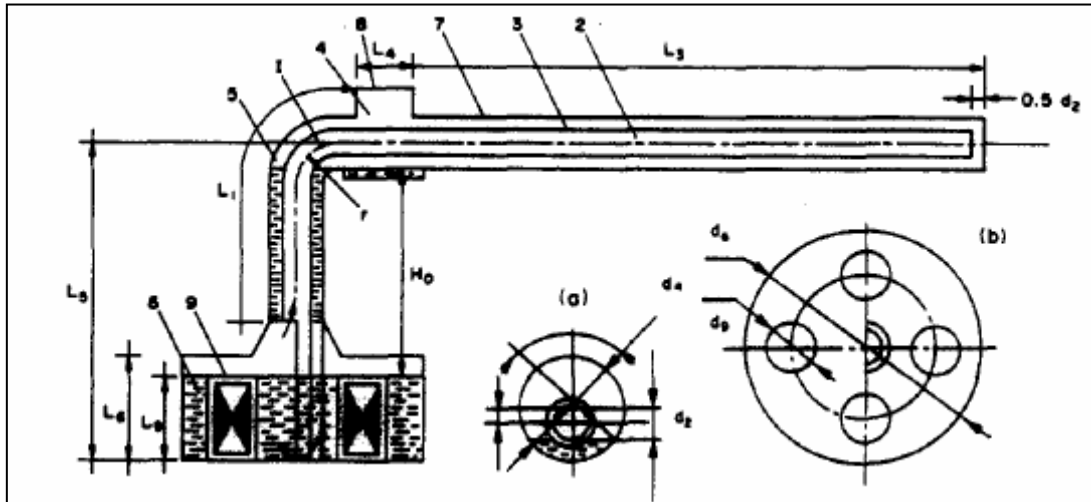


Σχήμα 3  
Βαθμός απόδοσης συλλέκτη

## 2.2.4 ΦΥΓΟΚΕΝΤΡΙΚΟΣ ΘΕΡΜΙΚΟΣ ΣΩΛΗΝΑΣ

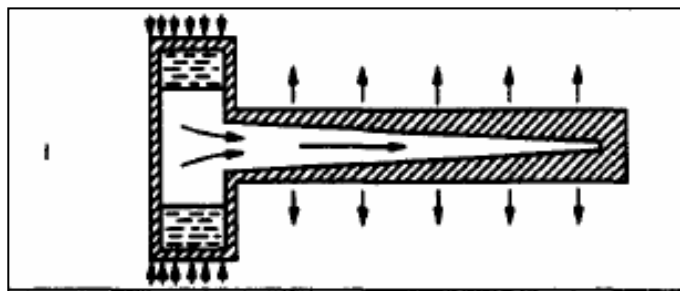
### ΓΕΝΙΚΑ

Οι συλλέκτες αυτού του τύπου μοιάζουν με τους τυπικούς θερμικούς σωλήνες, ωστόσο η διαφοροποίησή τους έγκειται στο γεγονός ότι χρησιμοποιούνται για ψύξη γεννητριών. Για αυτό το λόγο, περιστρέφονται κατά ανάλογο τρόπο με τη γεννήτρια. Σχηματικά, οι φυγοκεντρικοί θερμικοί σωλήνες έχουν την παρακάτω μορφή:



Σχήμα 1  
Φυγοκεντρικός θερμικός σωλήνας

Μια παραλλαγή αυτών αποτελεί η κωνική μορφή των άκρων τους:



Σχήμα 2  
Φυγοκεντρικός θερμικός σωλήνας με κωνικά άκρα

Για το συγκεκριμένο τύπο συλλέκτη, δεν θα γίνει επιπλέον αναφορά καθώς ο αναγνώστης μπορεί να συμβουλευτεί τον τυπικό θερμικό συλλέκτη (2.2.1) για περαιτέρω ανάλυση.

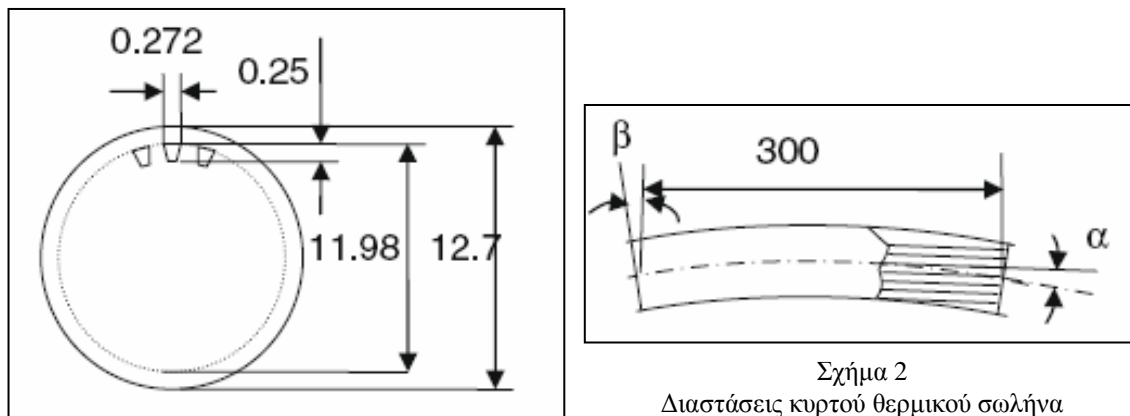
## 2.2.5 ΚΥΡΤΟΣ ΘΕΡΜΙΚΟΣ ΣΩΛΗΝΑΣ

### ΓΕΝΙΚΑ

Οι κυρτοί θερμικοί σωλήνες αποτελούν την πιο εξελιγμένη μορφή του είδους, καθώς για την πλήρη μελέτη τους απαιτούν σύγχρονο υπολογιστικό εξοπλισμό. Αν και δεν διαφέρουν πολύ από τον απλό θερμικό σωλήνα, η κυρτή μορφή τους προκαλεί σημαντικές διαφοροποιήσεις όσον αφορά τη ροή της θερμότητας.

### ΔΟΜΗ

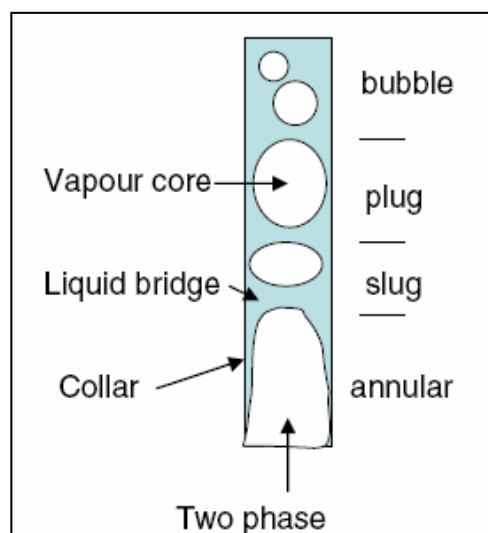
Τα παρακάτω σχήματα απεικονίζουν αναλυτικά το είδος αυτό του θερμικού σωλήνα μαζί με όλες του τις διαστάσεις [22].



Σχήμα 1  
Διαστάσεις κυρτού θερμικού σωλήνα

Σχήμα 2  
Διαστάσεις κυρτού θερμικού σωλήνα

Κατά τη διάρκεια της συμπύκνωσης του εργαζόμενου μέσου, παρατηρούνται τέσσερα διαφορετικά είδη ροής: δακτυλοειδούς μορφής, σφαιρικής μορφής, μορφής εμβόλου και μορφής φυσαλίδας

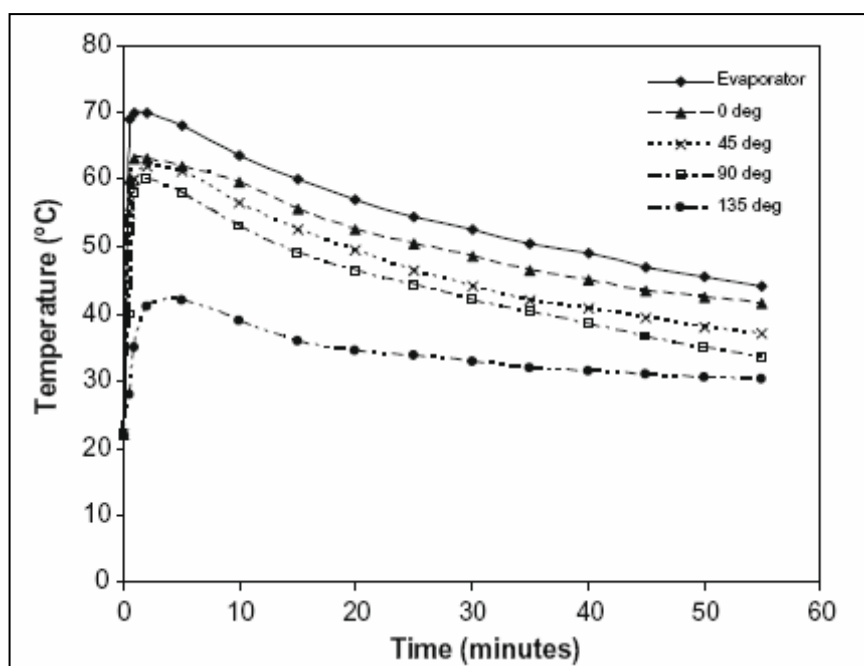


Σχήμα 3  
Είδη ροής κατά τη διάρκεια της συμπύκνωσης του εργαζόμενου μέσου

## ΑΝΑΛΥΣΗ

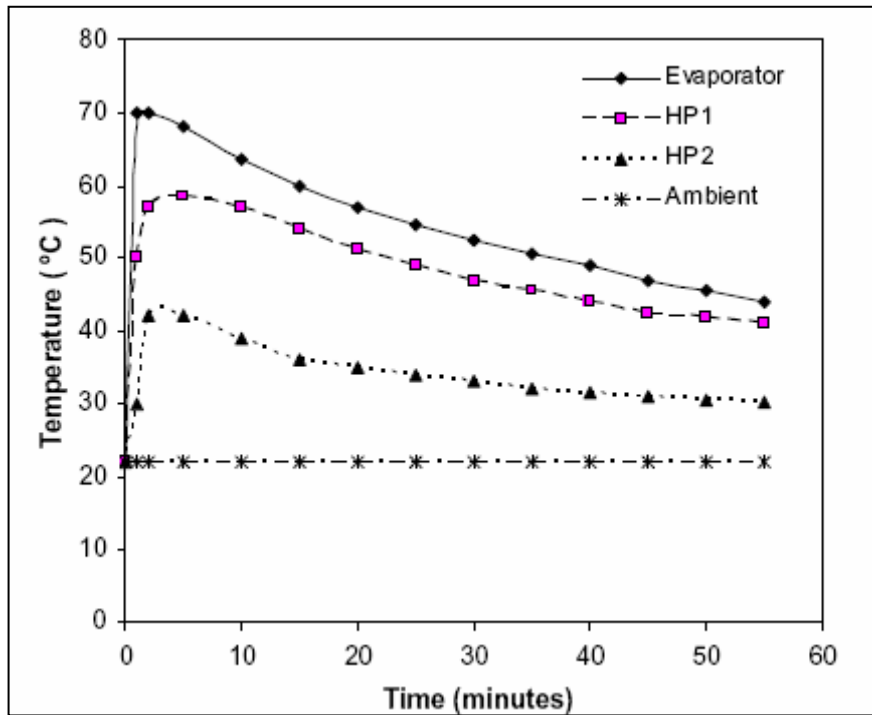
Συγκρίνοντας τον κυρτό σωλήνα σε σχέση με τον τυπικό, καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα. Ο κυρτός είναι πιο ευαίσθητος στην αλλαγή κλίσης του, όσον αφορά την ικανότητα μεταφοράς θερμότητας. Αυξάνοντας τη γωνία κλίσης του, αυξάνεται και η θερμοκρασιακή διαφορά, με αποτέλεσμα να αυξάνεται και η μεταφερόμενη θερμότητα [22]. Σε αντίθεση, όταν βρίσκεται σε κατακόρυφη θέση, έχει τα ίδια χαρακτηριστικά με τον τυπικό. Σε περίπτωση ξαφνικού θερμικού φορτίου, η χρονική απόκριση του κυρτού είναι αργότερη από ό,τι του τυπικού, σε κατακόρυφη θέση [22].

Στο σχήμα 4 παρουσιάζονται οι θερμοκρασιακές μεταβολές του κυρτού σωλήνα, για διαφορετικές γωνίες κλίσης.



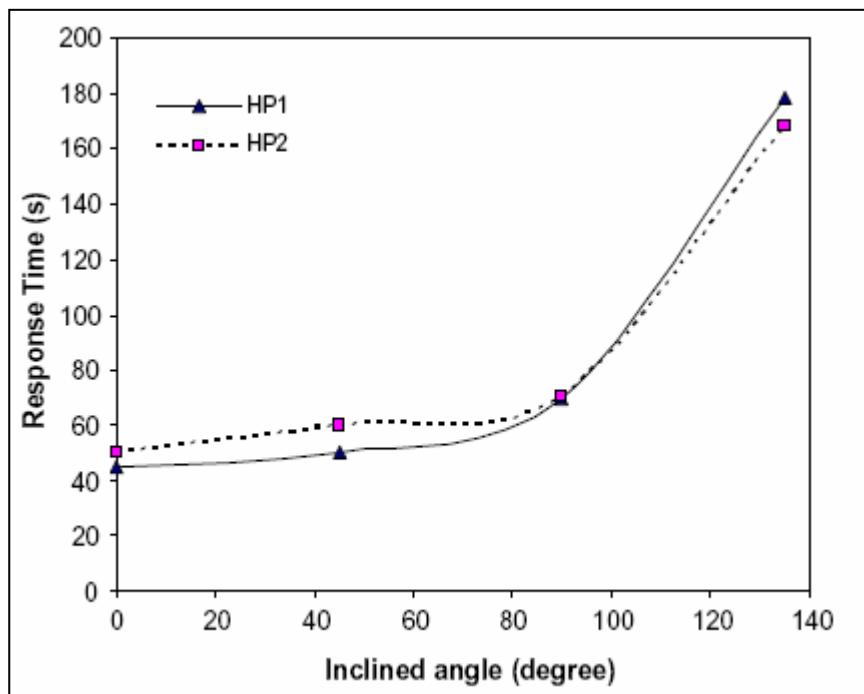
Σχήμα 4  
Θερμοκρασιακές μεταβολές κυρτού σωλήνα για διάφορες γωνίες κλίσης

Το σχήμα 5 είναι ένα συγκριτικό διάγραμμα του κυρτού με τον τυπικό σωλήνα, όσον αφορά τη θερμοκρασιακή μεταβολή σε κατακόρυφη θέση.



Σχήμα 5  
Θερμοκρασιακή μεταβολή κυρτού και τυπικού σωλήνα

Τέλος, το σχήμα 6 δείχνει το χρόνο απόκρισης και των δύο τύπων συλλεκτών για διάφορες γωνίες κλίσης.



Σχήμα 6  
Χρόνος απόκρισης κυρτού και τυπικού σωλήνα

## ΜΕΡΟΣ 2<sup>ο</sup>

### ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΙ ΗΛΙΑΚΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ

Οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες, σε αντίθεση με τους επίπεδους, χρησιμοποιούνται κυρίως όταν επιθυμείται υψηλότερη θερμική απόδοση, όταν υπάρχουν υψηλότερα θερμικά φορτία και όπου υπάρχουν περιορισμοί στη διαθέσιμη περιοχή εγκατάστασης συλλεκτών, εξαιτίας του γεγονότος ότι παράγουν περισσότερη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας του συλλέκτη.

Η παραγωγή υψηλότερων θερμοκρασιών έγκειται στη χρήση ενός συγκεντρωτικού ανακλαστή, ο οποίος κατευθύνει την ηλιακή ακτινοβολία από μια μεγάλη επιφάνεια σε έναν μικρότερο δέκτη και στην απορροφητική επιφάνεια. Ένα εργαζόμενο μέσο αντλείται διαμέσω του απορροφητή, όπου και θερμαίνεται, και από εκεί κατευθύνεται στο αποθηκευτικό σύστημα ή χρησιμοποιείται απευθείας για θέρμανση.

Ευνοϊκές συνθήκες για τη λειτουργία ενός συγκεντρωτικού συλλέκτη είναι η ύπαρξη μεγάλης ποσότητας άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας, σε αντίθεση με την ύπαρξη διάχυτης ακτινοβολίας η οποία έχει αρνητική επίδραση στην απόδοσή του. Άλλες παράμετροι που καθορίζουν την μέγιστη απόδοση του συλλέκτη αποτελούν η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, το μέγεθος του ανακλαστή, τα χαρακτηριστικά του απορροφητή, καθώς επίσης και το εργαζόμενο μέσο.

Ένα σύστημα συγκεντρωτικού συλλέκτη μπορεί να έχει είτε ένα σταθερό είτε ένα κινητό συλλέκτη. Στην πρώτη περίπτωση, ο ανακλαστής και ο απορροφητής βρίσκονται σε μια προκαθορισμένη θέση, η οποία είναι συνήθως προσανατολισμένη προς τον νότο. Για την μεγιστοποίηση της αποθηκευμένης ποσότητας ηλιακής ακτινοβολίας στον δέκτη, χρησιμοποιούνται συσκευές εντοπισμού, οι οποίες αλλάζουν τη θέση του ανακλαστή και του δέκτη. Στην περίπτωση κινητού συλλέκτη, αυτός μπορεί να είναι είτε μονού είτε διπλού άξονα. Οι συσκευές εντοπισμού μονού άξονα μετακινούν τον συλλέκτη από ανατολή σε δύση ή από βορρά σε νότο, ενώ αυτές του διπλού άξονα επιτυγχάνουν μετακίνηση προς όλους τους άξονες. Το γεγονός αυτό τις καθιστά ικανές για την απορρόφηση της μέγιστης ποσότητας ηλιακής ακτινοβολίας, οπότε και μέγιστων θερμοκρασιών, όφελος που αντισταθμίζεται από την πολύπλοκη κατασκευή τους και το μεγάλο κόστος.

## ΕΙΔΗ

### ➤ ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΟ ΚΑΤΟΠΤΡΟ

Το πιο διαδεδομένο είδος συγκεντρωτικών συλλεκτών είναι το παραβολικό κάτοπτρο. Τα κάτοπτρα σχήματος U, συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ένα γραμμικό σωληνοειδή δέκτη, ο οποίος είναι τοποθετημένος παράλληλα με την εστιακή γραμμή του κατόπτρου. Ο δέκτης μπορεί να βρίσκεται στο εσωτερικό ενός διάφανου, γυάλινου σωλήνα έτσι ώστε να μειώνονται οι απώλειες από τον απορροφητή. Συνήθως περιλαμβάνουν σύστημα εντοπισμού του ήλιου μονού άξονα, με κατεύθυνση βορρά – νότου. Η θερμοκρασία που μπορεί να επιτευχθεί είναι της τάξης των 400°C, ενώ η θερμική απόδοση μεταξύ 60 – 80%.

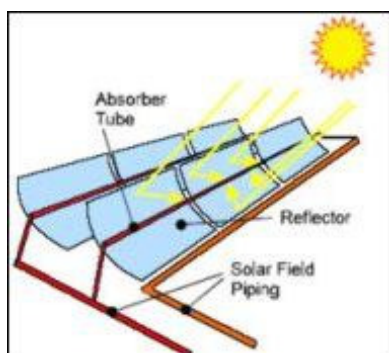
### ➤ ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΟ ΠΙΑΤΟ

Ένα διαφορετικό είδος συγκεντρωτικού συλλέκτη είναι το παραβολικό πιάτο. Εκ πρώτης όψεως, παρομοιάζεται με ένα τεράστιο δορυφορικό πιάτο με τη διαφορά ότι αποτελείται από ανακλαστές τύπου καθρέπτη και απορροφητή στο εστιακό σημείο. Το παραβολικό πιάτο χρησιμοποιεί συστήματα διπλού άξονα για να ακολουθεί τον ήλιο και να συλλέγει τις ακτίνες του στο δέκτη που βρίσκεται στο εστιακό σημείο μπροστά από το πιάτο. Σε μερικά συστήματα, μια μηχανή, όπως Stirling, συνδέεται με το δέκτη για την παραγωγή ενέργειας. Τα παραβολικά πιάτα μπορούν να φτάσουν θερμοκρασία δέκτη έως και 1000 °C και επιτυγχάνουν τους μεγαλύτερους βαθμούς απόδοσης μετατροπής ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρισμό.

### ➤ ΠΥΡΓΟΣ ΙΣΧΥΟΣ (ΗΛΙΟΣΤΑΤΗΣ)

Ένας πύργος ισχύος αποτελείται από πολυάριθμους και μετακινούμενους καθρέπτες (ηλιοστάτες) για την συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας στον δέκτη που βρίσκεται στην κορυφή του πύργου. Το εργαζόμενο μέσο θερμαίνεται στον δέκτη, οπότε και παράγει ατμό και στη συνέχεια χρησιμοποιείται σε ένα συμβατικό σύστημα τουρμπίνας – γεννήτριας για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Για την ευθυγράμμιση των καθρεπτών χρησιμοποιείται υπολογιστής, έτσι ώστε οι ανακλώμενες ακτίνες του ήλιου να στοχεύουν πάντα στον δέκτη, όπου επιτυγχάνεται θερμοκρασία πάνω από 1000°C.

### 3. ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΑ ΚΑΤΟΠΤΡΑ



Σχήμα 1  
Παραβολικό κάτοπτρο



Σχήμα 2  
Παραβολικό κάτοπτρο

Υπάρχουν δύο βασικά είδη παραβολικών κατόπτρων: τα παραβολικά κάτοπτρα σχήματος σκάφης και οι κυρτοί σύνθετοι παραβολικοί συγκεντρωτικοί συλλέκτες (CPC).

#### 3.1 ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΑ ΚΑΤΟΠΤΡΑ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΣΚΑΦΗΣ

Το παραβολικό κάτοπτρο σχήματος σκάφης αποτελείται από παραβολικούς ανακλαστήρες (συνήθως είναι επικαλυμμένοι με αλουμίνιο), οι οποίοι συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία σε έναν σωλήνα, ο οποίος διατρέχει κατά μήκος το εστιακό σημείο του ανακλαστή. Εξαιτίας του παραβολικού του σχήματος, το κάτοπτρο μπορεί να συγκεντρώσει την ακτινοβολία κατά 30 με 60 φορές περισσότερο σε σχέση με την κανονική έντασή της. Το κάτοπτρο είναι συνήθως προσανατολισμένο κατά τη βόρεια – νότια κατεύθυνση και περιστρέφεται έτσι ώστε να ακολουθεί τον ήλιο κάθε μέρα. Εναλλακτικά, μπορεί να προσανατολιστεί κατά την ανατολική – δυτική κατεύθυνση, μέτρο το οποίο αν και ελαττώνει τη συνολική απόδοση του συλλέκτη δεν απαιτεί την καθημερινή περιστροφή του, αλλά περιορίζεται σε εποχιακές ρυθμίσεις. Το εργαζόμενο μέσο, συνήθως λάδι, διατρέχει τον σωλήνα για να απορροφήσει την συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία και εν συνεχεία χρησιμοποιείται για την θέρμανση ατμού και την παραγωγή υπέρθερμου ατμού, υψηλής πίεσης. Ο ατμός αυτός οδηγείται στο σύστημα τουρμπίνας – γεννήτριας για την παραγωγή ηλεκτρισμού, ενώ ο ατμός που διέφυγε, συμπυκνώνεται και επιστρέφει στους εναλλάκτες θερμότητας για να ξαναγίνει ατμός. Η θερμική απόδοση της μεθόδου ποικίλλει από 60 – 80%.



Πολύ διαδεδομένη είναι η χρήση των κατόπτρων αυτών για την κατασκευή ηλιακών πάρκων, ενώ τα τελευταία χρόνια παρουσιάζουν σημαντικές εξελίξεις στην τεχνολογία κατασκευής τους..

### 3.1.1 ΗΛΙΑΚΑ ΠΑΡΚΑ

Για την κατασκευή των ηλιακών πάρκων έχουν αναπτυχθεί τρία διαφορετικά είδη συλλεκτών:

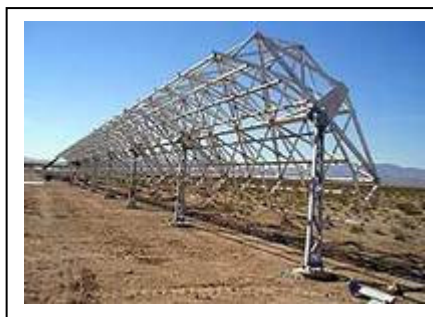
- Το σύστημα Luz
- Το σύστημα EuroTrough
- Το σύστημα Solargenix

Το σύστημα Luz αποτελεί πρότυπο σύστημα, για την κατασκευή του οποίου απαιτείται γαλβανισμένος χάλυβας. Υπάρχουν δύο τύποι για αυτή την κατηγορία, ο LS-2 και ο LS-3. Ο LS-2 συλλέκτης αποτελείται από έξι σωλήνες δομής στροφορμής (τρεις από κάθε πλευρά), οι οποίοι παρέχουν ακαμψία σε στρέψη και οι οποίοι είναι εύκολο να συναρμολογηθούν. Παρόλ' αυτά, οι σωλήνες αυτού του τύπου απαιτούν πολύ χάλυβα γεγονός που οδήγησε στη σχεδίαση των συλλεκτών LS-3. Οι συλλέκτες αυτοί χρησιμοποιούν δοκούς ενίσχυσης στη θέση των σωλήνων στροφορμής, αποτέλεσμα του οποίου είναι να μειώνεται το κόστος κατασκευής τους.

Απόγονος των συστημάτων Luz υπήρξαν τα συστήματα EuroTrough, τα οποία σχεδιάστηκαν έτσι ώστε να συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα των Luz-2 και Luz-3. Οι EuroTrough συλλέκτες χρησιμοποιούν κουτί στροφορμής έτσι ώστε αυτό να παρέχει την ακαμψία σε στροφορμή καθώς επίσης και την χαμηλότερη ποσότητα απαιτούμενου χάλυβα. Για πρώτη φορά χρησιμοποιήθηκαν στην κατασκευή του [SEGS V](#).

Στις μέρες μας, η αιχμή της τεχνολογίας είναι οι συλλέκτες Solargenix. Είναι κατασκευασμένοι από εξελασμένο αλουμίνιο και χρησιμοποιούν μια μοναδική δομή που στηρίζεται στην αρχή της πλήμνης και η οποία αρχικά χρησιμοποιούταν για κτίρια και γέφυρες. Ο καινούργιος σχεδιασμός υπερಿಸχύει των προαναφερθέντων στο ότι ζυγίζει λιγότερο από τον χάλυβα, απαιτεί λιγότερους συνδέσμους, συναρμολογείται εύκολα και δεν απαιτεί ραφή συγκόλλησης ούτε ευθυγράμμιση

πεδίου. Οι συλλέκτες Solargenix έχουν χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή του [Nevada Solar One](#).



Σχήμα 3

Συλλέκτες στο ηλιακό πάρκο Nevada Solar One

Τα ηλιακά πάρκα αποτελούνται από πολλά παραβολικά κάτοπτρα διατεταγμένα παράλληλα. Το πρώτο πάρκο που κατασκευάστηκε είναι αυτό της Καλιφόρνιας. Δημιουργήθηκε το 1985 και είναι γνωστό με την ονομασία SEGS. Είναι το μεγαλύτερο εν λειτουργία πάρκο, αφού αποτελείται από εννιά επί μέρους πάρκα συνολικής ισχύος 354MW. Ένα νεότερο πάρκο είναι το Nevada Solar One. Αποτελείται από 760 παραβολικά κάτοπτρα και παράγει ισχύ ίση με 64MW, η οποία το καθιστά το τρίτο μεγαλύτερο ηλιακό πάρκο. Δυο μικρότερα πάρκα βρίσκονται στην Αίγυπτο και στην Αλγερία ισχύος 40 και 25MW αντίστοιχα.

Το πρώτο ηλιακό πάρκο της Ευρώπης είναι το Andasol 1, ισχύος 50 MW το οποίο βρίσκεται στην Ανδαλουσία της Ισπανίας και το οποίο αναμένεται να λειτουργήσει στα μέσα του 2008. Κατά την ίδια χρονική περίοδο αναμένεται να λειτουργήσει επίσης και το ηλιακό πάρκο ισχύος 50 MW στην Κίνα και συγκεκριμένα στην κεντρική Μογγολία.

Υπό κατασκευή βρίσκονται και τα Andasol 2 και Andasol 3 στην ίδια περιοχή με το Andasol 1. Η διαφορά τους με τα προαναφερθέντα έγκειται στο γεγονός ότι απαιτούν μικρότερη αλλά αποτελεσματικότερη γεννήτρια, με αποτέλεσμα να παράγουν περισσότερη ενέργεια όταν λειτουργούν σε 24ωρη βάση. Ένα πολύ μικρό ηλιακό πάρκο κατασκευάζεται στη Χαβάη ισχύος 1 MW. Το 2011 αναμένεται να κατασκευαστεί ένα νέο ηλιακό πάρκο στην περιοχή Mojave στην Καλιφόρνια, ισχύος 553MW, ενώ έχει ανακοινωθεί και η επέκταση του ηλιακού πάρκου στο Ισραήλ (έρημος Negev) από ισχύ 250MW σε 500 MW.

## ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΤΑΙΡΕΙΑ SANDIA

Η εταιρεία Sandia εφηύρε την τεχνολογία TOP (φωτογραφική μέθοδος) για να ευθυγραμμίσει με ακρίβεια τους καθρέπτες στα ηλιακά πάρκα παραβολικών κατόπτρων. Αποτελείται από έναν στύλο, στον οποίο είναι τοποθετημένες περιμετρικά πέντε κάμερες. Οι τέσσερις από αυτές τραβούν ψηφιακές φωτογραφίες τις τέσσερις σειρές καθρεπτών στο παραβολικό μέρος, ενώ η πέμπτη επικεντρώνεται στο κέντρο της δοκού. Στη συνέχεια, οι φωτογραφίες αυτές συγκρίνονται με τις πρότυπες που ήδη υπάρχουν και γίνονται οι απαιτούμενες διορθώσεις.

Αν και η μέθοδος είναι αρκετά απλή, μπορεί να εφαρμοστεί τόσο κατά τον σχεδιασμό και κατασκευή του πάρκου όσο και κατά τη διάρκεια της συντήρησης. Η απλότητα της μεθόδου έγκειται στο γεγονός ότι δεν απαιτεί σύνθετο εξοπλισμό, είναι εύκολο να εγκατασταθεί και δεν είναι απαραίτητη η απομάκρυνση του συλλέκτη.

### 3.1.2 ΤΥΠΙΚΟ ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΟ ΚΑΤΟΠΤΡΟ

#### ΘΕΡΜΙΚΟΣ ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

Το πιο σημαντικό πλεονέκτημα του παραβολικού κατόπτρου έναντι των επίπεδων συλλεκτών είναι ο μεγάλος θερμικός βαθμός απόδοσής του. Αυτός μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση που προκύπτει από το ενεργειακό ισοζύγιο στον δέκτη και δίνεται σαν το λόγο της ωφέλιμης προσπιπτόμενης ενέργειας προς την ολική προσπιπτόμενη ακτινοβολία [25]:

$$n = n_0 - \left( \frac{U_L(T_r - T_a)}{I \times CR} \right) \quad (1)$$

όπου

$n_0$ : ο βέλτιστος βαθμός απόδοσης

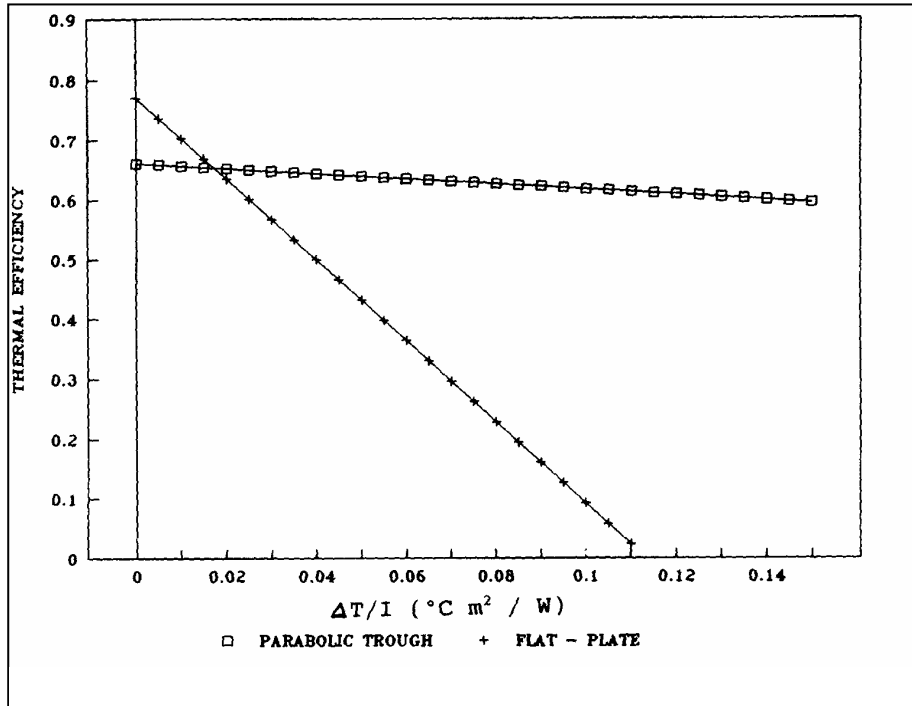
$U_L$ : ο συντελεστής απωλειών [ $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ]

$T_r$  και  $T_a$ : η μέση θερμοκρασία του δέκτη και του περιβάλλοντος αντίστοιχα

$I$ : η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας [ $W/m^2$ ]

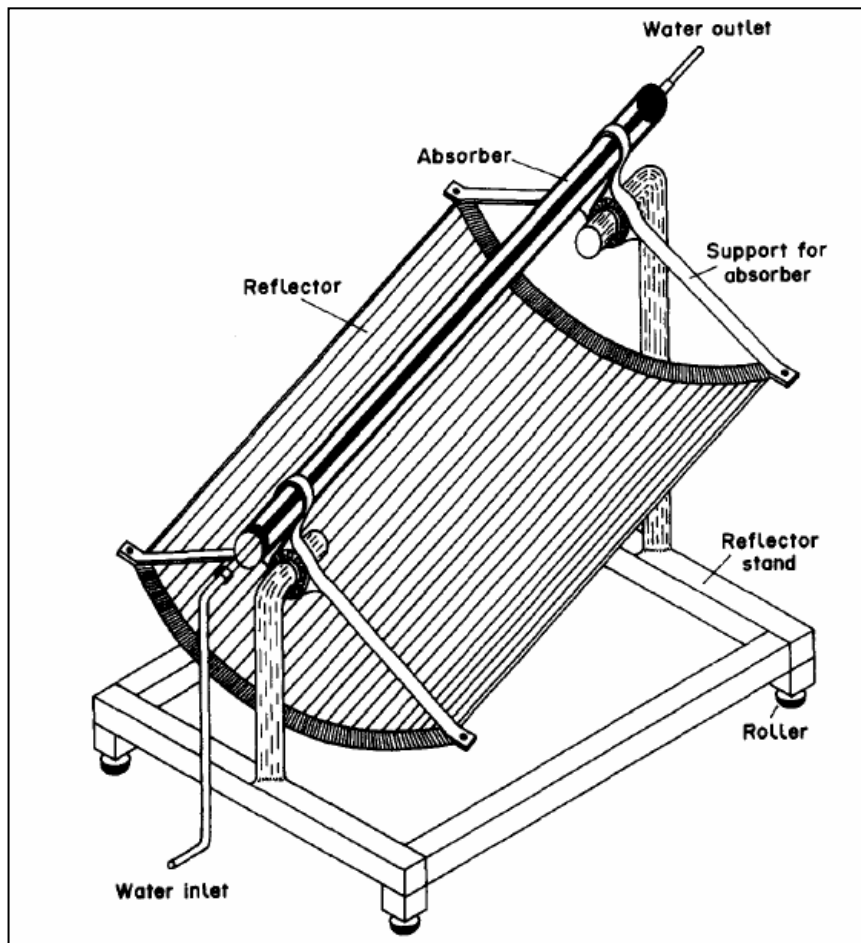
$CR$ : ο λόγος συγκέντρωσης.

Από την εξίσωση (1) μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η αποτελεσματικότητα ενός παραβολικού κατόπτρου εξαρτάται από τις ιδανικές ιδιότητες των υλικών από τα οποία κατασκευάζεται και από το μέγεθος των απωλειών, οι οποίες εκφράζονται από το δεύτερο όρο της εξίσωσης. Το πλεονέκτημα είναι ότι αυτές οι απώλειες είναι αντιστρόφως ανάλογες με τον λόγο συγκέντρωσης [25]. Το παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζει την συμπεριφορά ενός παραβολικού κατόπτρου σε αντιπαράθεση με αυτή ενός επίπεδου συλλέκτη, στον οποίο  $CR=1$ . Η μικρή απόκλιση της γραφικής παράστασης (σχήμα 1) από την ευθεία οφείλεται στις πολύ μικρές απώλειες.



Σχήμα 1  
Βαθμός απόδοσης παραβολικού κατόπτρου και επίπεδου συλλέκτη

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ



Σχήμα 1  
Τυπικό παραβολικό κάτοπτρο

Ο σχεδιασμός του συστήματος επιτυγχάνεται, λαμβάνοντας υπόψη τρεις παράμετρους: το βέλτιστο άνοιγμα του συλλέκτη, τη γωνία εξωτερικής στεφάνης και τη διάμετρο του δέκτη.

### Βέλτιστο άνοιγμα συλλέκτη

Το άνοιγμα του συλλέκτη επηρεάζει τόσο τον μέγιστο βαθμό απόδοσης όσο και τον λόγο συγκέντρωσης. Όσον αφορά το μέγιστο βαθμό απόδοσης, καθορίζεται από τις απώλειες λόγω γεωμετρικών παραγόντων, δηλαδή όσο μικρότερο είναι το άνοιγμα τόσο μικρότερες είναι και οι γεωμετρικές απώλειες οπότε μεγαλύτερος και ο μέγιστος βαθμός απόδοσης [25]. Από την άλλη, για μια σταθερή τιμή της διαμέτρου του δέκτη, ο λόγος συγκέντρωσης μειώνεται όταν το άνοιγμα ελαττώνεται, το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα μεγαλύτερες θερμικές απώλειες [25]. Ο στόχος είναι να υπάρχει μικρός γεωμετρικός παράγοντας με μεγάλο λόγο συγκέντρωσης.

Έστω:

$$\frac{U_L(T_i - T_a)}{I \times CR} = K \quad (2)$$

όπου K μια σταθερά. Τότε η εξίσωση (1) μπορεί να γραφτεί ως

$$n = n_0 - \frac{K}{CR} \quad (3)$$

Στον πίνακα 1 παρουσιάζονται διάφορες τιμές ανοίγματος και πως αυτές επηρεάζουν την αποδοτικότητα και τον λόγο συγκέντρωσης [25].

Πίνακας 1  
Βελτιστοποίηση ανοίγματος συλλέκτη

Optimisation of Collector Aperture			
Aperture width ( $W_a$ ) (m)	Concentration ratio (CR)	Optical efficiency (%)	Thermal efficiency (%)
0.5	13.26	57.3	34.7
0.6	15.92	55.9	37.1
0.7	18.57	54.2	38.0
0.8	21.22	52.2	38.1
0.9	23.87	49.9	37.3
1.0	26.53	46.9	35.6

Notes:  $\phi_r = 90^\circ$ ,  $D = 12$  mm,  $A_a = 1$  m<sup>2</sup>,  $K = 3.0$ ,  $U_L = 7$  W/m<sup>2</sup> °C,  $T_a = 32^\circ\text{C}$ ,  $T_r = 250^\circ\text{C}$ .

Το πρόβλημα με αυτή τη μέθοδο είναι ότι η σταθερά  $K$  εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν και από τη δομή του δέκτη. Στον πίνακα 2 φαίνονται διάφορες τιμές του  $K$  σε συνάρτηση με το πλάτος ανοίγματος [25].

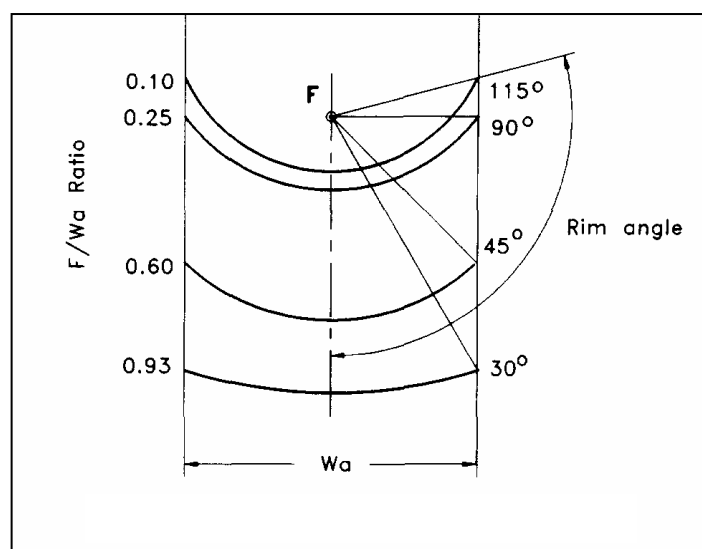
Πίνακας 2  
Τιμές σταθεράς  $K$

Maximum Thermal Efficiency for a Range of $K$ -Values	
$K$ -value range	$W_a$ at which $n_{\max}$ occurs ( $m$ )
0–1.2	0.5
1.3–1.9	0.6
2.0–2.9	0.7
3.0–4.5	0.8

Από τους παραπάνω πίνακες, καταλήγουμε ότι ο μέγιστος θερμικός βαθμός απόδοσης συμβαίνει όταν  $W = 0,8m$ .

### Βέλτιστη γωνία εξωτερικής στεφάνης

Η γωνία εξωτερικής στεφάνης (rim angle) καθορίζεται στο σχήμα 2.



Σχήμα 2  
Σχηματική απεικόνιση γωνίας εξωτερικής στεφάνης

Σύμφωνα με το σχήμα αυτό, είναι φανερό ότι στο ίδιο άνοιγμα δέκτη αντιστοιχούν πολλές γωνίες. Επίσης φαίνεται ότι για διαφορετικές γωνίες, ο λόγος εστίασης προς άνοιγμα, ο οποίος καθορίζει την καμπυλότητα του κατόπτρου, αλλάζει. Λόγω του

γεγονότος ότι η επιφάνεια του συλλέκτη μειώνεται όσο μειώνεται και η γωνία, γίνεται φανερό ότι επιδιώκεται όσο το δυνατόν μικρότερη γωνία. Ωστόσο, έχει αποδειχθεί ότι η μείωση της επιφάνειας του συλλέκτη οδηγεί σε σημαντική μείωση της απόδοσής του. Οπότε επιλέγεται ως βέλτιστη τιμή της γωνίας η γωνία  $90^0$ , καθώς τότε οι απώλειες ηλιακής ακτινοβολίας ελαχιστοποιούνται [25].

### Διάμετρος δέκτη

Η διάμετρος του δέκτη καθορίζει τον παράγοντα ανακοπής ( $\gamma$ ) και κατά συνέπεια τον βέλτιστο βαθμό απόδοσης. Ο παράγοντας ανακοπής ορίζεται ως ο λόγος της ενέργειας που αναχαιτίζεται από τον δέκτη προς την συνολική ενέργεια που ανακλάται ( $\sigma$ ) [25]. Η τιμή του εξαρτάται από το μέγεθος του δέκτη, τα σφάλματα στις γωνίες ευθυγράμμισης των παραβολικών καθρεπτών και τη διάχυση της ηλιακής δέσμης [25]. Συμβολίζοντας τις τιμές που υπεισέρχονται σφάλματα με έναν αστερίσκο, ο παράγοντας  $\gamma$  δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\gamma = \frac{1 + \cos \phi_r}{2 \sin \phi_r} \int_0^{\phi_r} \text{Erf} \left( \frac{\sin \phi_r (1 + \cos \phi) (1 - 2d^* \sin \phi) - \pi\beta^* (1 + \cos \phi_r)}{\sqrt{2\pi\sigma^* (1 - \cos \phi_r)}} \right) - \text{Erf} \left( - \frac{\sin \phi_r (1 + \cos \phi) (1 + 2d^* \sin \phi) + \pi\beta^* (1 + \cos \phi_r)}{\sqrt{2\pi\sigma^* (1 - \cos \phi_r)}} \right) \frac{d\phi}{(1 + \cos \phi)} \quad (4)$$

Θεωρώντας γνωστές τις τιμές των απωλειών και με τη βοήθεια ενός υπολογιστικού προγράμματος [25], καταλήγουμε στα αποτελέσματα του πίνακα 3.

Πίνακας 3  
Τιμές παράγοντα ανακοπής

Intercept Factors for Various Receiver Diameters		
<i>Receiver diameter</i> (mm)	<i>CR</i>	<i>Intercept factor</i>
6	42.44	0.80
9	28.29	0.94
12	21.22	0.98
15	16.98	0.99
18	14.15	1.00
21	12.13	1.00



Λαμβάνοντας υπόψη τα δεδομένα αυτά, η καλύτερη επιλογή διαμέτρου θα ήταν είτε 12 είτε 15mm. Η τελική όμως επιλογή θα εξαρτηθεί και από τη θερμική ανάλυση, τα αποτελέσματα της οποίας συγκεντρώθηκαν στον πίνακα 4.

Πίνακας 4  
Αποτελέσματα θερμικής ανάλυσης

Thermal Efficiency as a Function of Receiver Diameter		
<i>Receiver diameter (mm)</i>	<i>Optical efficiency</i>	<i>Thermal efficiency</i>
6	0.529	0.496
9	0.618	0.568
12	0.648	0.582
15	0.661	0.579
18	0.661	0.562
21	0.661	0.545

Τελικά, η μέγιστη θερμική απόδοση επιτυγχάνεται με δέκτη διαμέτρου 12mm.

### 3.1.3 ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΑ ΚΑΤΟΠΤΡΑ

Σημαντικές προσπάθειες για βελτίωση των παραβολικών κατόπτρων έχουν διεξαχθεί και αφορούν κάθε παράμετρο που υπεισέρχεται στο σύστημα. Συγκεκριμένα:

Όσον αφορά τον συλλέκτη:

- Η αμερικανική εταιρεία SolarGenix ανέπτυξε ένα νέο σύστημα υποστήριξης, το οποίο είναι ένα αλουμινένιο πλαίσιο, βασισμένο στο σχεδιασμό του Luz, αλλά πολύ ανώτερο όσον αφορά το βάρος, την κατασκευαστική απλότητα, την αντοχή σε καταπονήσεις, το κόστος και την εγκατάστασή του. Με αυτό τον σχεδιασμό, οι καθρέπτες συγκεντρώνονται με ακρίβεια πάνω στο συλλέκτη.
- Μια παρόμοια πατέντα κατασκευάστηκε και από την εταιρεία FLAGSOL και δοκιμάστηκε στο ηλιακό πάρκο SEGS.
- Η εταιρεία βιομηχανικής ηλιακής τεχνολογίας (IST) ανέπτυξε έναν συλλέκτη που ενσωματώνει την ανακλαστική επιφάνεια σαν μέρος του συλλέκτη. Αυτό οδηγεί σε έναν πολύ δυνατό συλλέκτη, μικρού βάρους και κόστους.

Όσον αφορά τους ανακλαστήρες:

Οι ανακλαστήρες αποτελούνται συνήθως από επιμέρους τμήματα συλλέκτη, τα οποία είναι κομμάτια χάλυβα με έναν καθρέπτη πάνω τους.

Οι έρευνες που διεξάγονται στοχεύουν στη μείωση του πάχους του καθρέπτη, σε καλύτερες επιστρώσεις για βελτίωση της αποτελεσματικότητάς τους και στην δημιουργία ενός σύνθετου συλλέκτη με ελαφρούς καθρέπτες, στη θέση των βαρέων (4mm) γυάλινων καθρεπτών που χρησιμοποιούνται στις μέρες μας.

Όσον αφορά τους απορροφητήρες:

Οι απορροφητήρες αποτελούνται από χαλύβδινους σωλήνες με έναν γυάλινο σωλήνα να τους περιβάλλει, ενώ το κενό που δημιουργείται μεταξύ τους μονώνεται έτσι ώστε να μειωθούν οι θερμικές απώλειες. Οι χαλύβδινοι σωλήνες επικαλύπτονται με ένα υλικό για αύξηση της απορροφούμενης ακτινοβολίας. Αρκετές βελτιώσεις έχουν βρεθεί, μερικές από τις οποίες είναι:

- Η εταιρεία Solel κατασκεύασε το νέο μοντέλο UVAC2003, το οποίο παρουσιάζει βελτιώσεις σε θέματα απορροφητικότητας, μετάδοσης

θερμότητας και απωλειών. Το αποτέλεσμα είναι να είναι 20% αποτελεσματικότερο από τα προηγούμενα μοντέλα.

- Η IST επικάλυψε τους απορροφητήρες με μια μαύρη, από νικέλιο επίστρωση, η οποία δεν αντανακλά το φως και έτσι αυξάνεται η ποσότητα απορροφώμενης ακτινοβολίας.
- Τέλος, καινούρια μονωτικά υλικά δοκιμάζονται για την καλύτερη μόνωση του κενού που δημιουργείται μεταξύ γυαλιού και σωλήνα.

Όσον αφορά το σύστημα αποθήκευσης:

- Κατασκευάστηκε ένα σύστημα αποθήκευσης που αποτελείται από δύο δεξαμενές αποθήκευσης, το οποίο λειτουργεί με τετηγμένο άλας σαν εργαζόμενο μέσο. Πειράματα μεταξύ οργανικών αλάτων γίνονται, για τον καθορισμό του πιο αποτελεσματικού.
- Ευρωπαϊκές μελέτες ανέδειξαν το τσιμέντο ή χυτά υλικά ως κατάλληλα για αποθήκευση ενέργειας σε υψηλές θερμοκρασίες. Το σύστημα αυτό λειτουργεί με εργαζόμενο μέσο το συνθετικό πετρέλαιο.
- Χρήση υλικών που υπόκεινται σε αλλαγή φάσης (συνήθως από στερεή σε υγρή) σε θερμοκρασία ίση με της προσπιπτόμενης ακτινοβολίας. Η υψηλή λανθάνουσα θερμότητα κατά την αλλαγή φάσης ευνοεί τη μεγαλύτερη αποθήκευση ενέργειας.

Ακολουθεί εκτεταμένη αναφορά σε κάποιες από τις προαναφερθείσες βελτιώσεις.

### 3.1.3.1 ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΟΣ ΣΥΛΛΕΚΤΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΣΚΑΦΗΣ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΕΣΤΙΑΣΗΣ

#### ΓΕΝΙΚΑ

Οι παραβολικοί συλλέκτες σχήματος σκάφης, εξαιτίας της ικανότητάς τους να λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες (από 300 – 400°C) με υψηλό βαθμό απόδοσης, αποτελούν το καταλληλότερο είδος συλλεκτών για παραγωγή ατμού.

Η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται ο συλλέκτης χρησιμοποιείται για τη θέρμανση του σωλήνα, στο εσωτερικό του οποίου ρέει το εργαζόμενο μέσο. Ένας κενός χώρος γύρω από τον σωλήνα, καθώς επίσης και ένα θερμομονωτικό στο πίσω μέρος του, εξασφαλίζουν την ελαχιστοποίηση των θερμικών απωλειών.

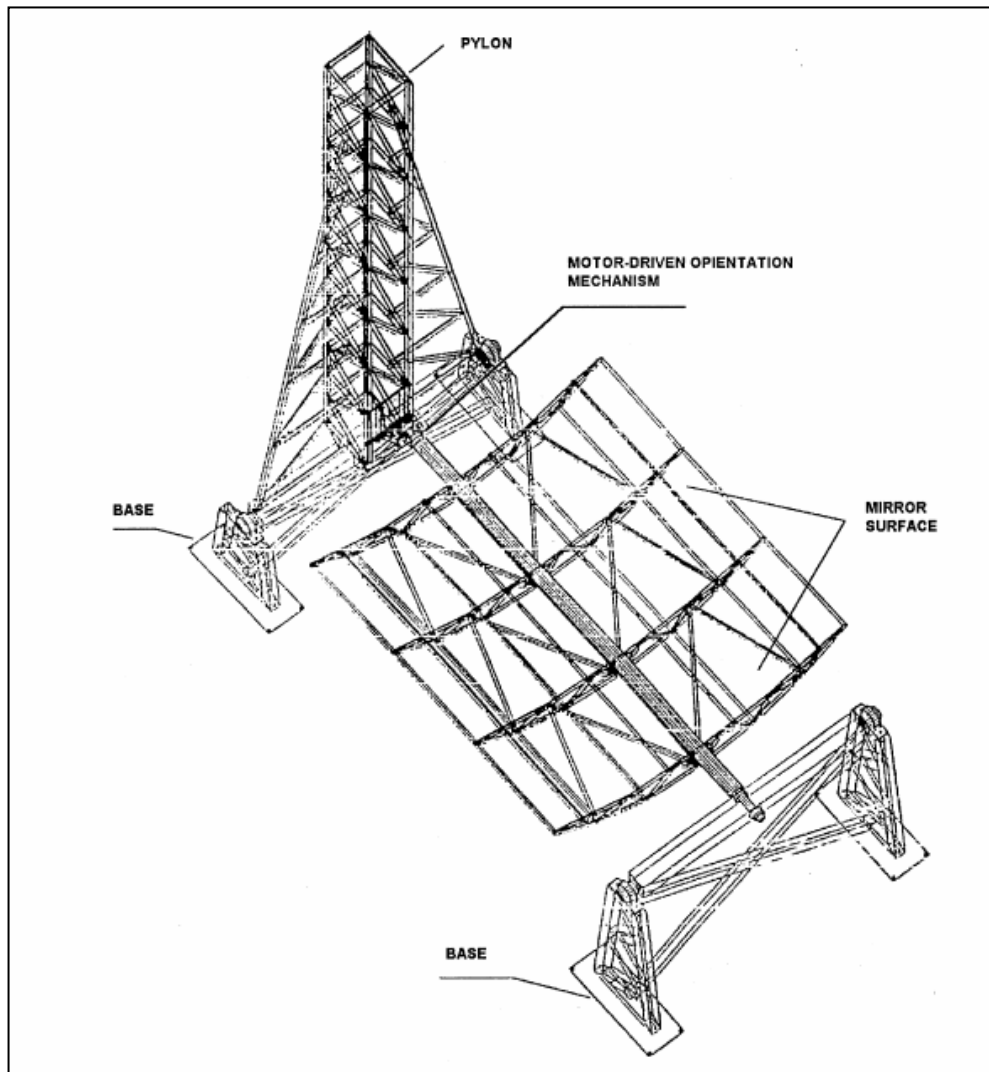
#### ΔΟΜΗ

Ο συλλέκτης αποτελείται από τέσσερις βασικές συνιστώσες: το μεταλλικό πλαίσιο, τους παραβολικούς καθρέπτες, το απορροφητικό σύστημα και το σύστημα ελέγχου.

##### ➤ *Μεταλλικό πλαίσιο*

Το μεταλλικό πλαίσιο φέρει δύο σταθερές βάσεις και τρία κινούμενα μέρη, ένα εκ των οποίων συνδέεται με μια σταθερή βάση, γεγονός το οποίο παρέχει τη δυνατότητα στον συλλέκτη να μετακινείται κατά τις σφαιρικές συνιστώσες ( $\varphi, \theta$ ) [23].

Όταν ο συλλέκτης βρίσκεται σε οριζόντια θέση, ένας μικρός τροχός μετακινείται κατά μήκος του πυλώνα, με κατεύθυνση την κορυφή του, αναγκάζοντας το ένα άκρο του άξονα του συλλέκτη (στροφέα) να μετακινηθεί κατά την ίδια φορά. Κατά αυτόν τον τρόπο, αφού το ένα άκρο του καθώς επίσης και το μήκος του παραμένουν σταθερά, ο πυλώνας μπορεί να αλλάζει θέση σε σχέση με το έδαφος και να παρακολουθεί τον ήλιο ανάλογα με την εποχή. Περιστρέφοντας τον άξονα του συλλέκτη, αποκτά την επιπρόσθετη δυνατότητα να εντοπίζει την ηλιακή ακτινοβολία καθόλη τη διάρκεια της ημέρας. Για τις δύο αυτές προαναφερθείσες κινήσεις του συλλέκτη, απαιτούνται δύο εναλλασσόμενες γεννήτριες 1.5 kW η κάθε μία [23].



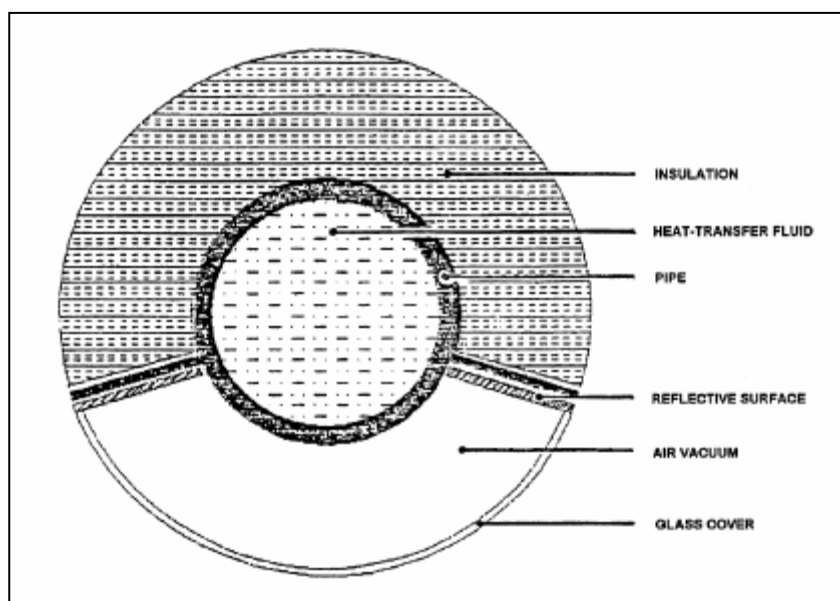
Σχήμα 1  
Παραβολικός συλλέκτης σχήματος σκάφης γραμμικής εστίασης

➤ *Παραβολικοί καθρέπτες*

Η ενεργή επιφάνεια του συλλέκτη αποτελείται από τέσσερις παραβολικούς καθρέπτες ( $3 \text{ m}^2$  έκαστος), η τοποθέτηση των οποίων πάνω στην πλατφόρμα πρέπει να γίνεται κατά τρόπο συμμετρικό ως προς τον άξονα περιστροφής. Η συνολικά εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία εστιάζεται σε μια παράλληλη προς τον άξονα περιστροφής, γραμμή η οποία απέχει  $170 \text{ cm}$  από αυτόν. Το πάχος των καθρεπτών είναι μικρό ( $0.4 \text{ cm}$ ) επομένως έχουν και μικρό βάρος. Επιπρόσθετα, χαρακτηρίζονται από ιδιαίτερα υψηλό συντελεστή ανακλαστικότητας (98%) [23].

➤ *Απορροφητικό σύστημα*

Το απορροφητικό σύστημα αποτελείται από έναν αγωγό τοποθετημένο παράλληλα με τον άξονα περιστροφής και συγκεκριμένα στο σημείο, το οποίο δέχεται τη μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία. Το σημαντικότερο μέρος του συστήματος είναι ο μονωμένος χώρος (φάκελος) διαμέτρου 9 cm που περικλείει τον απορροφητήρα (σχήμα 2) [23]. Το κενό μεταξύ του γυαλιού και του μεταλλικού αγωγού εξασφαλίζει τη μείωση των θερμικών απωλειών



Σχήμα 2  
Μονωμένος φάκελος που περικλείει τον απορροφητήρα

➤ *Σύστημα ελέγχου*

Το σύστημα ελέγχου αποτελείται από τέσσερις αισθητήρες για μετρήσεις θερμοκρασιών, έντασης ηλιακής ακτινοβολίας, μεταφοράς θερμότητας και θέσης του άξονα του συλλέκτη [23].

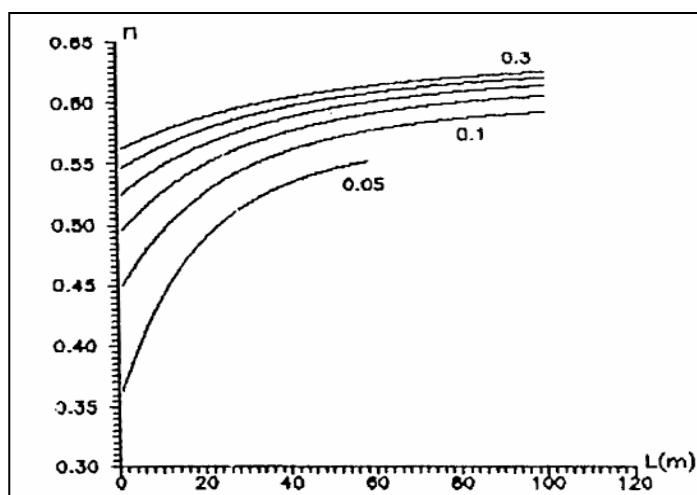
### ΑΝΑΛΥΣΗ

Η ανάλυση της λειτουργίας του συγκεκριμένου συλλέκτη πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια ηλεκτρονικού προγράμματος [23]. Όλα τα απαραίτητα στοιχεία που απαιτήθηκαν για τους υπολογισμούς, παρέχονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 1  
Τιμές παραμέτρων συλλέκτη

Parameter	Value
Reflection coefficient	0.9
Transmission coefficient	0.85
Absorption coefficient	0.92
Active area thermal loss	2 W/m <sup>2</sup> °C
Passive area thermal loss	0.2 W/m <sup>2</sup> °C
Thermal conductivity	0.5 W/m <sup>2</sup> °C
Insulation's thermal transmittance	0.045 W/m <sup>2</sup> °C
Ambient temperature	17 °C

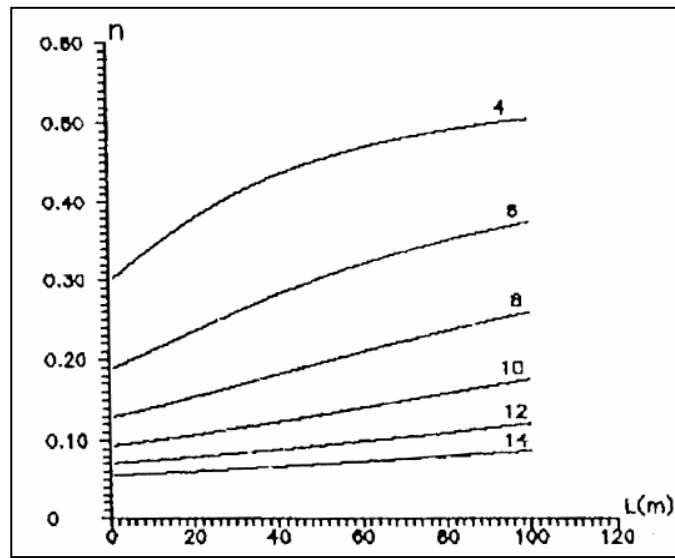
Οι γραφικές παραστάσεις που έπονται, δίνουν μια απεικόνιση της συσχέτισης του βαθμού απόδοσης του συλλέκτη με διάφορες συνιστώσες. Πιο αναλυτικά, παρατηρούμε ότι όταν η παροχή εργαζόμενου μέσου αυξάνεται, ο βαθμός απόδοσης βελτιώνεται. Βέβαια αυτό δεν είναι δυνατόν για πολύ μεγάλες παροχές, διότι τότε η θερμοκρασία του εργαζόμενου μέσου μειώνεται και δεν μπορεί να παραχθεί ατμός. Από το ίδιο σχήμα (σχήμα 3) είναι εμφανής η αντιστρόφως ανάλογη σχέση μεταξύ του βαθμού απόδοσης και του μήκους του αγωγού.



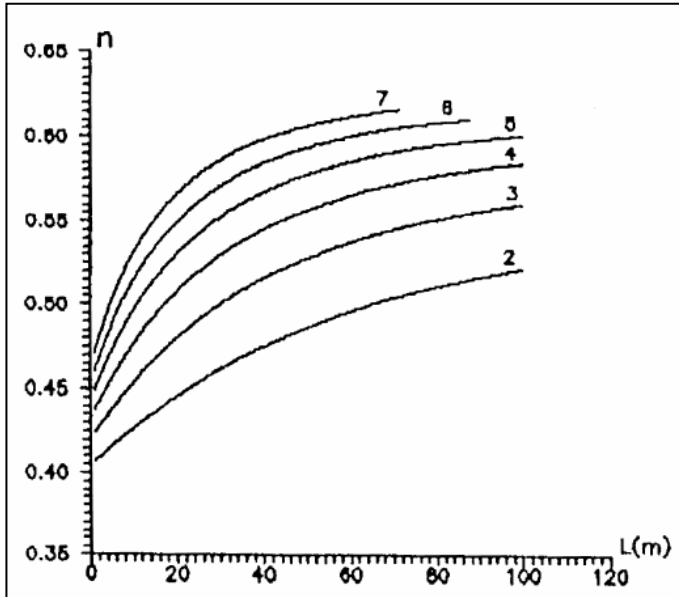
Σχήμα 3  
Βαθμός απόδοσης συλλέκτη σε συνάρτηση με μήκος του αγωγού

Από το σχήμα 4 παρατηρούμε ότι ο βαθμός απόδοσης αυξάνεται καθώς μειώνεται η διάμετρος του αγωγού. Αυτό εξηγείται από τη μεγαλύτερη πυκνότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην ενεργή επιφάνεια του συλλέκτη. Εξαιτίας όμως της ανακλαστικότητας του ήλιου, υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί όσον αφορά τη μείωση της διαμέτρου.

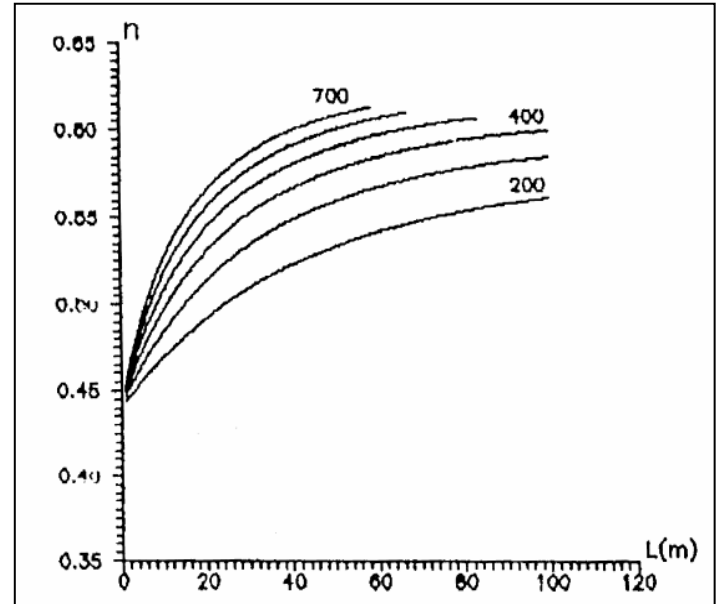
Τέλος, τα σχήματα 5 και 6 παριστούν την σχέση του βαθμού απόδοσης με την διάμετρο του καθρέπτη και την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας αντίστοιχα.



Σχήμα 4  
Βαθμός απόδοσης συλλέκτη σε συνάρτηση με διάμετρο αγωγού



Σχήμα 5  
Βαθμός απόδοσης συλλέκτη σε συνάρτηση με τη διάμετρο του καθρέπτη



Σχήμα 6  
Βαθμός απόδοσης συλλέκτη σε συνάρτηση με ένταση ηλιακής ακτινοβολίας



### 3.1.3.2 ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΟΣ ΣΥΛΛΕΚΤΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΣΚΑΦΗΣ ΜΕ ΠΟΡΩΔΗ ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΗ

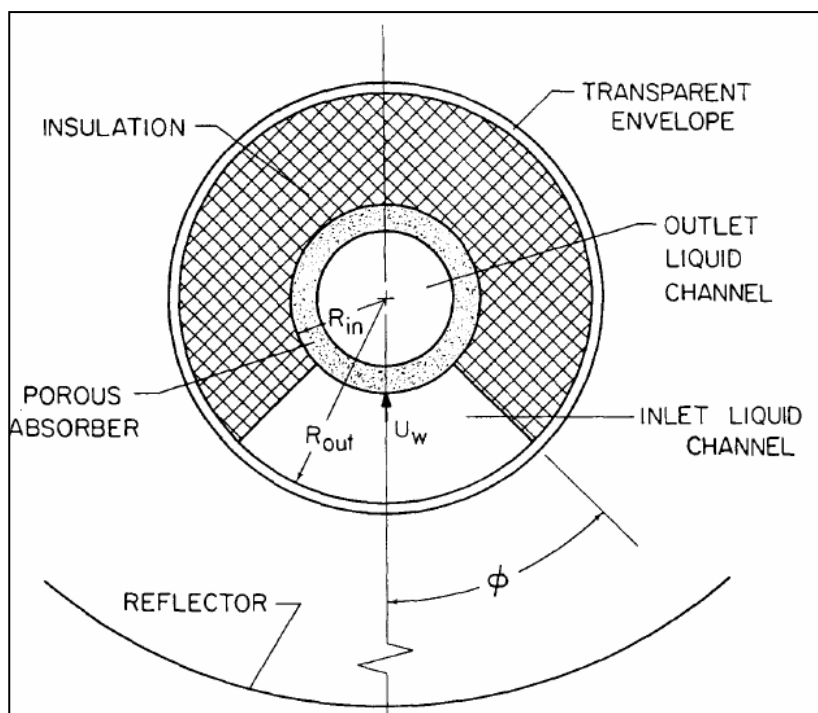
#### ΓΕΝΙΚΑ

Οι θερμικές απώλειες του δέκτη ενός συγκεντρωτικού συλλέκτη υπονομεύουν την αποτελεσματικότητά του όταν αυτός λειτουργεί σε υψηλές θερμοκρασίες. Οι συμβατικοί συλλέκτες αυτού του τύπου συνοδεύονται από έναν εκκενωμένο χώρο, στον οποίο εμπεριέχεται ο συλλέκτης έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες.

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται ένας συλλέκτης, ο οποίος αποτελείται από απορροφητή πορώδους υλικού και ο οποίος κατασκευάζεται εύκολα και με χαμηλό κόστος.

#### ΔΟΜΗ

Τομή του συγκεκριμένου συλλέκτη απεικονίζεται στο σχήμα 1. Η ηλιακή ακτινοβολία περνά από το κάτω μέρος του εκκενωμένου χώρου και διοχετεύεται σε διαφανές υλικό, το οποίο ρέει στο κανάλι εισόδου. Μέσω του πορώδη απορροφητή, εισέρχεται στο κανάλι εξόδου (όπου και επικρατούν χαμηλότερες συνθήκες πίεσης) και τελικά εξέρχεται από το άλλο άκρο του.

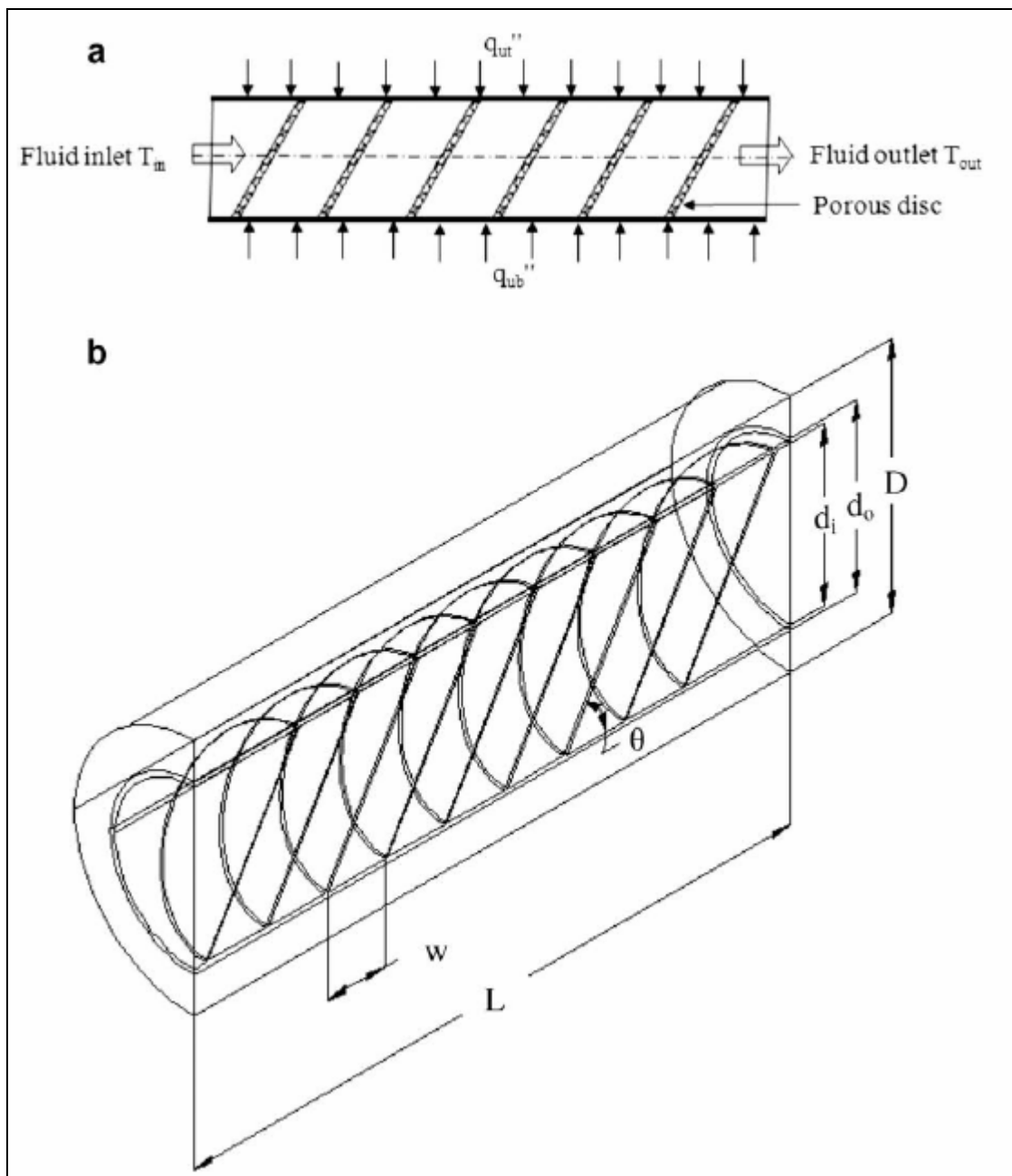


Σχήμα 1

Τομή παραβολικού συλλέκτη σχήματος σκάφης με πορώδη απορροφητή

## ΑΝΑΛΥΣΗ

Όπως φαίνεται και από το σχήμα 2, θεωρούμε δύο μισά μέρη του απορροφητή. Το πάνω μέρος του υπόκειται σε ροή θερμότητας ίση με  $q''_{ut}$  και το κάτω σε με  $q''_{ub}$  [24]. Οπότε ο απορροφητής θεωρείται συμμετρικός ως προς τον κατακόρυφο άξονά του.



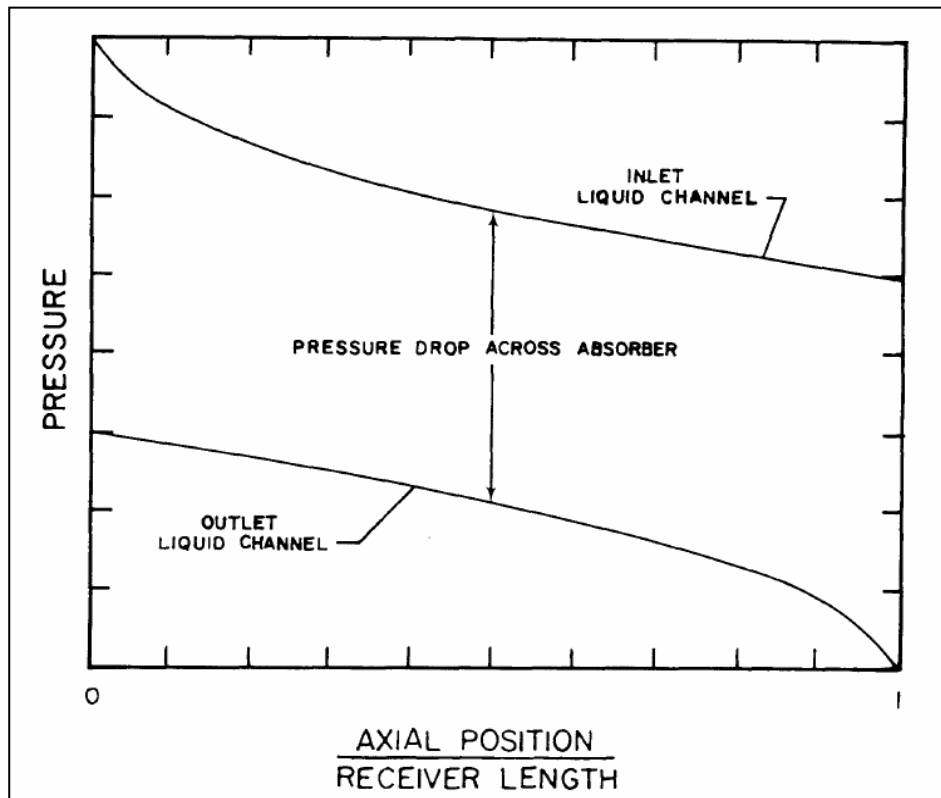
Σχήμα 2

Ροή θερμότητας στον συλλέκτη

Η ροή θερμότητας υπολογίζεται από:

$$q_{ut}'' = q_{ub}'' = I_b \times (\tau\alpha)_b - U_1 \times (T_{wo} - T_a) \quad (1)$$

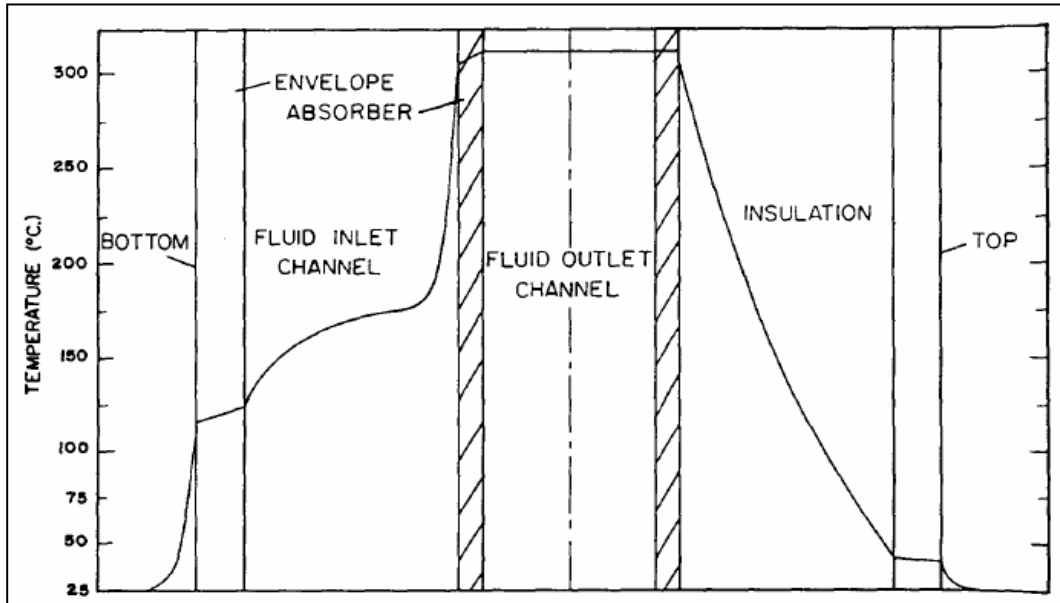
Τα σχήματα που ακολουθούν απεικονίζουν τις μεταβολές διαφόρων παραμέτρων κατά μήκος του συλλέκτη. Αναλυτικά, στο σχήμα 3 φαίνεται η πτώση πίεσης, η οποία αυξάνεται όσο απομακρυνόμαστε από το κανάλι εισόδου [24].



Σχήμα 3

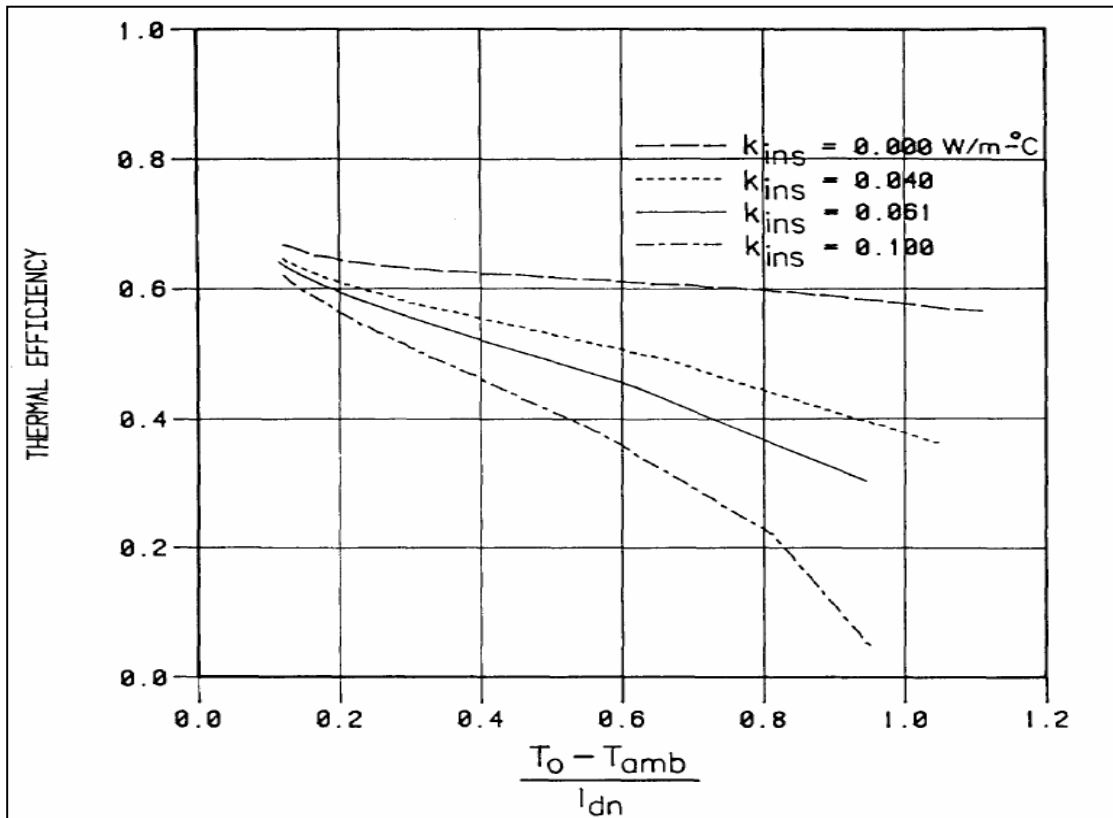
Πτώση πίεσης από κανάλι εισόδου

Στο σχήμα 4 φαίνεται η μεταβολή των θερμοκρασιών, ενώ στο σχήμα 5 ο βαθμός απόδοσης για διάφορα μονωτικά υλικά. Τέλος, το σχήμα 6 απεικονίζει ποικίλλες μορφές μόνωσης.



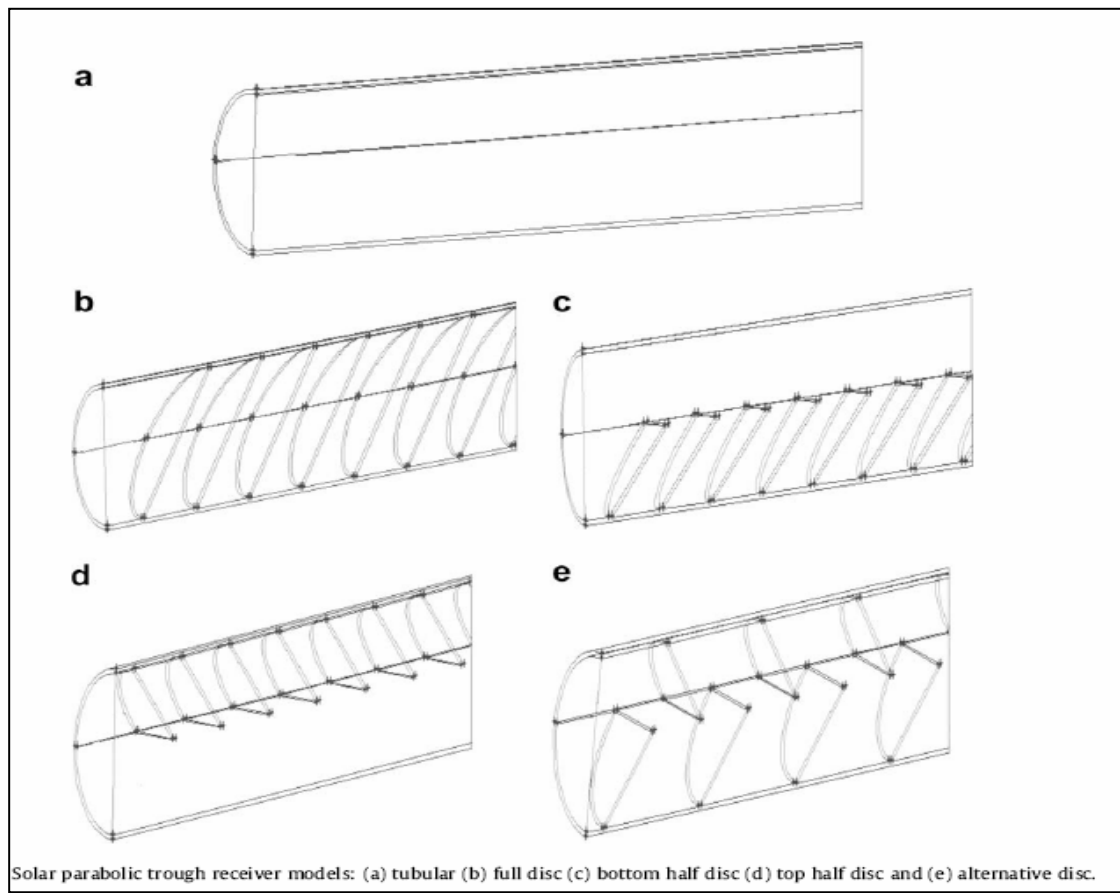
Σχήμα 4

Μεταβολή θερμοκρασιών κατά μήκος του συλλέκτη



Σχήμα 5

Βαθμός απόδοσης για διάφορα μονωτικά υλικά



Σχήμα 6  
Διάφορες μορφές μόνωσης

### 3.1.3.3 ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΟΣ ΣΥΛΛΕΚΤΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΣΚΑΦΗΣ ΜΕ ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝΤΕΣ ΑΝΑΚΛΑΣΤΕΣ

#### ΓΕΝΙΚΑ

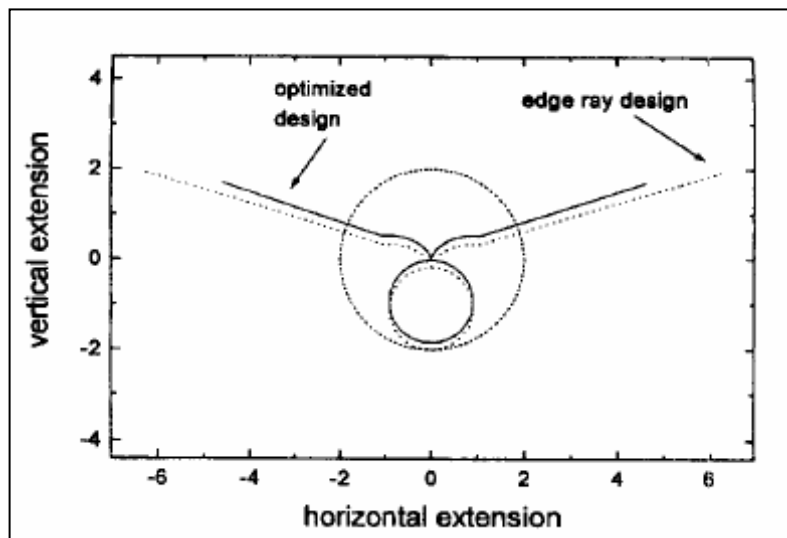
Η χρήση δευτερευόντων ανακλαστήρων είναι πολύ διαδεδομένη στους σύγχρονους συλλέκτες. Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι οι δευτερεύοντες ανακλαστήρες επιτυγχάνουν υψηλότερες θερμοκρασίες, συνέπεια του οποίου είναι να αυξάνεται ο βαθμός απόδοσης του συλλέκτη. Επιπλέον, η χρήση των δευτερευόντων ανακλαστήρων έχει ως αποτέλεσμα μικρότερες διαστάσεις του απορροφητή, γεγονός που ευνοεί τον έλεγχο της ροής του εργαζόμενου μέσου καθώς επίσης και των πιέσεων λειτουργίας του. Τέλος, η παρουσία των ανακλαστήρων επιτυγχάνει ομοιόμορφη κατανομή της ακτινοβολίας στον απορροφητή, οπότε και μικρότερες θερμικές τάσεις [26].

#### ΔΟΜΗ

Πολυάριθμοι ασύμμετροι δευτερεύοντες ανακλαστήρες έχουν προταθεί για χρήση με παραβολικούς συλλέκτες. Ωστόσο, αρκετή ακτινοβολία χάνεται ανάμεσα από τα πτερύγια των ανακλαστήρων, με αποτέλεσμα να απαιτείται τροποποίηση της δομής τους.

Μια λύση είναι ο βασικός ανακλαστήρας να χωριστεί σε δύο μικρότερους κλίσης  $45^\circ$  [26]. Αυτή όμως η λύση που παρουσιάζεται στην παρούσα ενότητα, δεν απαιτεί αλλαγές στον βασικό ανακλαστήρα, αλλά βελτιστοποιεί το σχήμα του απορροφητή, ώστε να μπορεί να συνδυαστεί με τους δευτερεύοντες ανακλαστήρες.

Το σχήμα 1 απεικονίζει ένα συλλέκτη με επεξεργασμένους δευτερεύοντες ανακλαστήρες και σωληνοειδείς απορροφητές. Για να μην επέλθει μεταβολή στη δομή του βασικού συλλέκτη, το κέντρο του μετατοπίζεται ως προς τον εστιακό άξονα του βασικού και κατά αυτόν [26].



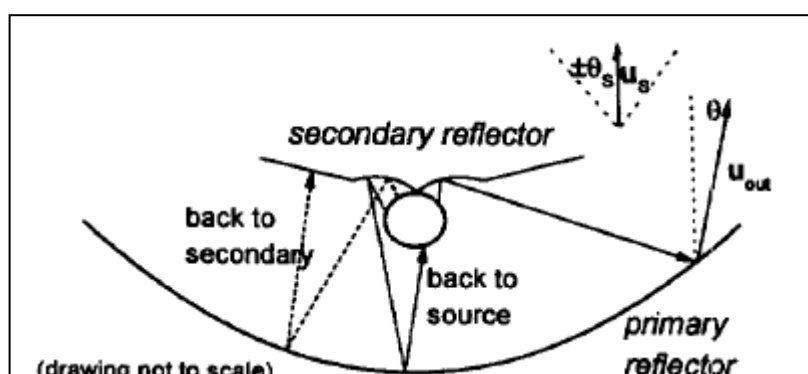
Σχήμα 1

Παραβολικός συλλέκτης σχήματος ακάφης με δευτερεύοντες ανακλαστές

Ο δευτερεύοντας ανακλαστήρας αποτελείται από ένα τμήμα δια εξελιγμένης, το οποίο ευρύνεται και προς τις δύο κατευθύνσεις και το οποίο ακολουθείται από ένα επεξεργασμένο άκρο, αποκλίνοντος τύπου το οποίο προσομοιάζει τον ευθύ ανακλαστήρα. Η μεταβολή από το τμήμα δια εξελιγμένης στο επεξεργασμένο τμήμα χαρακτηρίζεται από μία ασυνέχεια [26].

## ΑΝΑΛΥΣΗ

Έστω  $N$  το πλήθος των ηλιακών ακτινών που απορροφά ο απορροφητής. Ένα μέρος αυτών διοχετεύεται στον δευτερεύοντα ανακλαστήρα μέσω του βασικού, ενώ οι υπόλοιπες ανακλώνται και επιστρέφουν στον απορροφητή (σχήμα 2).



Σχήμα 2

Σχηματική απεικόνιση πορείας ηλιακών ακτινών

Ο βαθμός απόδοσης [26] τότε υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$n = \frac{P_{abs}}{P_p} = \gamma \times C_{rel} \quad (1)$$

όπου  $P_{abs}$  : η απορροφόμενη ισχύς

$P_p$  : η προσπίπτουσα ισχύς

$\gamma$  : συντελεστής γεωμετρικών διαστάσεων

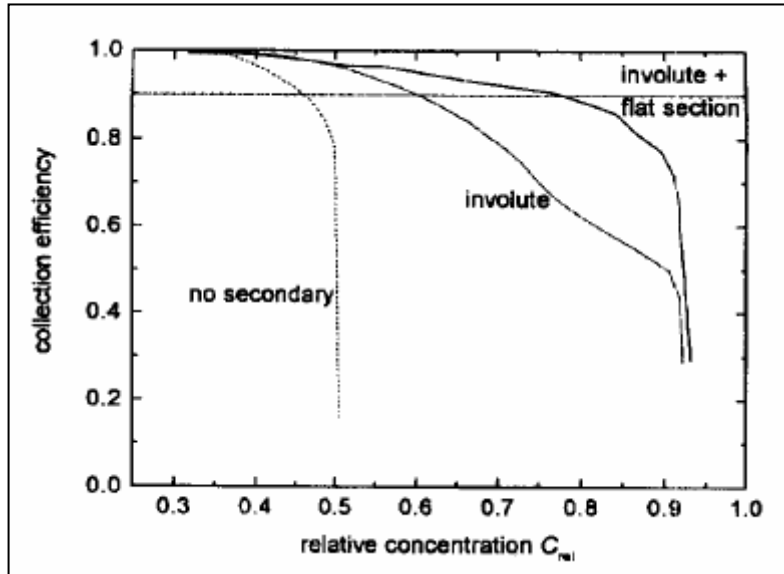
$C_{rel}$  : σχετική συγκέντρωση

Για τη μελέτη του συγκεκριμένου είδους συλλέκτη υποθέτουμε τρία διαφορετικά είδη ανακλαστήρων, τα οποία και συγκρίνουμε:

- Στο πρώτο είδος δε χρησιμοποιείται καθόλου δευτερεύοντα ανακλαστήρα. Ο σωλήνας τοποθετείται κατακόρυφα και κοντά στο κέντρο του παραβολικού πιάτου.
- Χρησιμοποιείται ένας ανακλαστήρας με ένα τμήμα δια εξελιγμένης που ξεκινά από την κορυφή του κυλινδρικού απορροφητή. Και εδώ ο σωλήνας είναι τοποθετημένος κατακόρυφα, αλλά ο απορροφητής είναι μετατοπισμένος από το κέντρο του βασικού ανακλαστήρα.
- Η τρίτη περίπτωση αφορά τον υπό μελέτη συλλέκτη. Το μήκος του ευθύ ανακλαστήρα υπολογίζεται ως η βέλτιστη λύση όσον αφορά την παγίδευση της ηλιακής ακτινοβολίας και το φαινόμενο της σκίασης.

Θεωρώντας  $N = 10^4$ , υπολογίζεται ότι η σχετική συγκέντρωση της πρώτης περίπτωσης είναι της τάξης του 0.5 ενώ για τη δεύτερη 0.92 και για την τελευταία 0.93 (σχήμα 3) [26]. Αν και οι δύο τελευταίες περιπτώσεις δεν παρουσιάζουν σημαντική διαφορά στο μέγεθος της συγκέντρωσης, η χρήση συλλέκτη με δευτερεύοντα ανακλαστήρα με τμήμα δια εξελιγμένης και ευθύ απαιτεί μικρότερο αριθμό ανακλαστήρων.





Σχήμα 3  
Βαθμός απόδοσης σε συνάρτηση με σχετική συγκέντρωση

Η σχετική συγκέντρωση των δευτερευόντων ανακλαστήρων (για τις δύο τελευταίες περιπτώσεις) υπολογίζεται, για δεδομένο βαθμό απόδοσης, από την παρακάτω σχέση:

$$C_{sec}(n) = \frac{C_{rel}(n)}{C_{rel}^0(n)} \quad (2)$$

όπου  $C_{rel}^0(n)$ : η σχετική συγκέντρωση χωρίς δευτερεύοντες ανακλαστήρες

Για  $n = 0.9$ , είναι  $C_{sec} = 1.4$  όσον αφορά τη δεύτερη περίπτωση και  $C_{sec} = 1.7$  όσον αφορά την τρίτη. Είναι εμφανής η υπεροχή της τρίτης περίπτωσης, αν και για τη μελέτη αυτή δεν λήφθηκαν υπόψη φαινόμενα σκίασης και ατελούς ανακλαστικότητας. Σε αυτές τις περιπτώσεις, χρησιμοποιείται ανακλαστήρας μικρότερου μήκους από τον ιδανικό και ο απορροφητής είναι λιγότερο μετατοπισμένος. Στις ιδανικές περιπτώσεις, ο βαθμός απόδοσης βρέθηκε ίσος με 0.973, ενώ για τις πραγματικές 0.969.

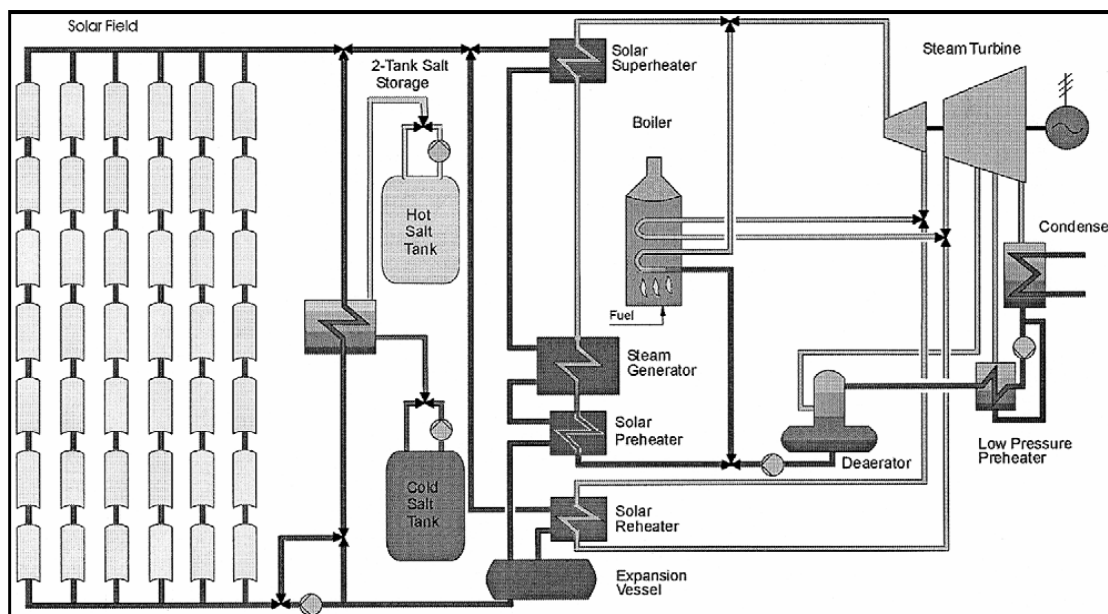
### 3.1.3.4 ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΟ ΚΑΤΟΠΤΡΟ ΜΕ ΔΥΟ ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ

#### ΓΕΝΙΚΑ

Όπως έχει ήδη προαναφερθεί, τα παραβολικά κάτοπτρα χρησιμοποιούν την ηλιακή ακτινοβολία ως τη βασική πηγή για παραγωγή ηλεκτρισμού. Με επαρκή ηλιακή ακτινοβολία (κυρίως τους καλοκαιρινούς μήνες) μπορούν να λειτουργήσουν για 10 – 12 ώρες την ημέρα. Αντίθετα, το χειμώνα και κατά τη διάρκεια της νύχτας, όπου η ακτινοβολία είναι ελάχιστη, είναι απαραίτητο να βρεθούν άλλοι τρόποι υποβοήθησης του συστήματος. Για αυτό τον σκοπό έχουν σχεδιαστεί υβριδικά ηλιακά συστήματα με σύστημα υποστήριξης που λειτουργεί με καύσιμα και το οποίο ενεργοποιείται σε περιόδους με χαμηλή ηλιακή ακτινοβολία. Ένας άλλος τρόπος, είναι να υπάρχει ενσωματωμένο στο σύστημα, ένα υποσύστημα αποθήκευσης ηλιακής ακτινοβολίας. Μια πολύ διαδεδομένη εκδοχή είναι η χρήση διπλής δεξαμενής αποθήκευσης που λειτουργεί με τετηγμένο άλας.

#### ΔΟΜΗ

Στο σχήμα 1 παριστάνεται η σχηματική απεικόνιση του συστήματος.



Σχήμα 1  
Σύστημα με διπλή δεξαμενή αποθήκευσης

Ένας θερμικός εναλλάκτης, ο οποίος χρησιμεύει για την πλήρωση της δεξαμενής αποθήκευσης, χρησιμοποιεί ένα μέρος του εργαζόμενου μέσου για να θερμάνει το άλας που βρίσκεται στην ψυχρή δεξαμενή από 300°C σε 385°C και το οποίο στη

συνέχεια αποθηκεύεται στη θερμή δεξαμενή [27]. Όταν το σύστημα αποθήκευσης εκκενωθεί, τότε το άλας από την θερμή δεξαμενή χρησιμοποιείται για να θερμάνει το ψυχρό εργαζόμενο μέσο και στη συνέχεια οδηγείται στην ψυχρή δεξαμενή αποθήκευσης.

Το σύστημα αποθήκευσης αποτελείται από τα ακόλουθα βασικά στοιχεία: τα αποθέματα νιτρικού άλατος, τις δεξαμενές αποθήκευσης νιτρικού άλατος, τους θερμικούς εναλλάκτες και τις αντλίες κυκλοφορίας των νιτρικών αλάτων.

### **Απόθεματα νιτρικού άλατος**

Τα ανόργανα νιτρικά άλατα είναι τα προτεινόμενα αποθηκευτικά μέσα γιατί συνδυάζουν την πυκνότητα ( $1880\text{kg/m}^3$ ), ειδική θερμότητα ( $1500\text{J/kg.K}$ ), μικρή χημική αντίδραση, πίεση ατμοποίησης ( $<0.01\text{Pa}$ ) και κόστος ( $\$0.40-\$0.90/\text{kg}$ ). Μετά από συγκρίσεις σε διάφορα νιτρικά μίγματα, το μίγμα  $\text{NaNO}_3$  και  $\text{KNO}_3$  επιλέχθηκε ως το βέλτιστο αφού το σημείο πήξης του ( $220\text{ }^\circ\text{C}$ ) είναι κατά  $80\text{ }^\circ\text{C}$  υψηλότερο από το σημείο πήξης του συστήματος και είναι και το πιο οικονομικό [27].

### **Δεξαμενές αποθήκευσης**

Η μικρή πίεση ατμοποίησης των αλάτων επιτρέπει τη χρήση κάθετων δεξαμενών αποθήκευσης [27]. Οι τεράστιες δεξαμενές που λειτουργούν σε ατμοσφαιρική πίεση, κατασκευάζονται από χάλυβα και έχουν αυτόνομες οροφές. Τόσο τα τείχη όσο και η οροφή των δεξαμενών επικαλύπτονται από μονωτικά για εξάλειψη των θερμικών απωλειών.

### **Θερμικοί εναλλάκτες**

Οι θερμικοί εναλλάκτες πρέπει να σχεδιάζονται με εύρος  $3 - 10\text{ }^\circ\text{C}$  έτσι ώστε να ελαχιστοποιούν τυχόν λάθη κατά τη διάρκεια της εκκένωσης των δεξαμενών και για να διατηρούν λογική μεταφορά ρευστού κατά τη διάρκεια της πλήρωσής τους [27]. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η πίεση ατμοποίησης του εργαζόμενου μέσου είναι περίπου  $10\text{bar}$  (σε εξωτερική θερμοκρασία συλλέκτη ίση με  $390\text{ }^\circ\text{C}$ ) και προσμετρώντας τις απώλειες πίεσης στους εναλλάκτες και στις αντλίες, τότε η πίεση στο εσωτερικό του εναλλάκτη πρέπει να είναι περίπου  $20\text{ bar}$  [27]. Αντιθέτως, η πίεση ατμοποίησης των αλάτων είναι πολύ μικρή οπότε για να είναι εφικτή η κυκλοφορία του θα πρέπει η

πίεση να είναι γύρω στα 5 bar [27]. Επομένως, ο θερμικός εναλλάκτης πρέπει να προσαρμόζει μια διαφορά πίεσης της τάξης των 15 bar μεταξύ του εργαζόμενου μέσου και του ρευστού αποθήκευσης. Ο πιο οικονομικός θερμικός εναλλάκτης που συνδυάζει όλα τα παραπάνω είναι ένας που συνδυάζει σωληνοειδές σχεδιασμό με κέλυφος. Κατά αυτόν τον τρόπο, το ρευστό υψηλής πίεσης βρίσκεται στην σωληνοειδή πλευρά του εναλλάκτη και τα νιτρικά άλατα στην κελυφοειδή [27].

### **Αντλίες κυκλοφορίας**

Ειδικές αντλίες κυκλοφορίας που να αντέχουν στις διαβρώσεις των νιτρικών αλάτων δεν έχουν εφευρεθεί ακόμη, οπότε χρησιμοποιούνται κατακόρυφες αντλίες, οι οποίες με την βοήθεια της βαρύτητας επιτρέπουν την ανακυκλοφορία του εργαζόμενου μέσου [27].

### ΑΝΑΛΥΣΗ

Για να υπολογιστεί η ηλεκτροπαραγωγή ενός ηλιακού πάρκου, δημιουργήθηκε ένα υπολογιστικό πρόγραμμα. Με δεδομένες τις τιμές της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, το πρόγραμμα υπολογίζει τη ροή μάζας και θερμοκρασίας, την απορροφώμενη ενέργεια, την θερμική ενέργεια που αποθηκεύεται στις δεξαμενές, τις θερμικές απώλειες και την ισχύ που παρέχει η γεννήτρια.

Για τα παραβολικά κάτοπτρα με δεξαμενές αποθήκευσης, η ανάλυση πρέπει πρώτα να γίνει για την λειτουργία της γεννήτριας και κατόπιν για τις δεξαμενές. Και αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι μόνο αν η απορροφώμενη ενέργεια ξεπεράσει τις προδιαγραφές του συστήματος, τότε αυτή αποθηκεύεται. Αν από την άλλη, η απορροφώμενη ακτινοβολία είναι μικρότερη, τότε προσροφάται ενέργεια από την ήδη αποθηκευμένη. Κατά αυτόν τον τρόπο, διασφαλίζεται η λειτουργία της γεννήτριας στο πλήρες φορτίο της.

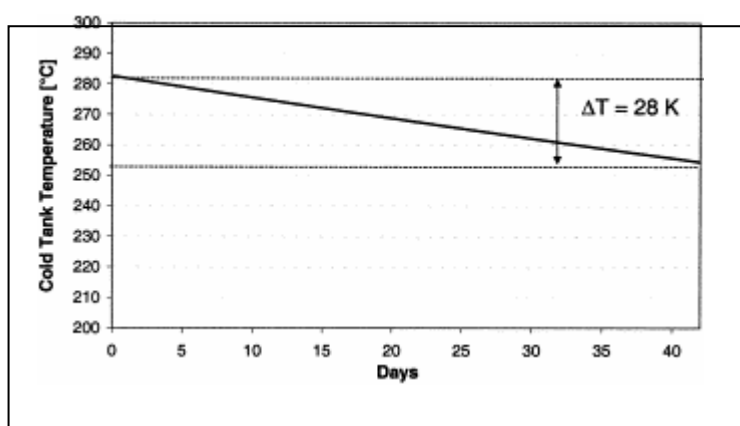
Στο υπολογιστικό μοντέλο που προείπαμε, είναι αναγκαίο να προστεθούν οι θερμικές απώλειες των δεξαμενών.

Αυτές υπολογίζονται από την παρακάτω εξίσωση:

$$q_{\text{loss}} = 0.00017 \cdot T_{\text{salt}} + 0.012 \quad [\text{kW/m}^2] \quad (1)$$

όπου  $T_{\text{salt}}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] η θερμοκρασία των νιτρικών αλάτων στην ψυχρή ή στην θερμή δεξαμενή αποθήκευσης.

Ο υπολογισμός των θερμικών απωλειών είναι απαραίτητος για τον καθορισμό της απόδοσης των δεξαμενών αλλά και για την εξασφάλιση ότι το νιτρικό άλας δεν θα φτάσει την θερμοκρασία πήξης του [27]. Το σχήμα 2 απεικονίζει τα αποτελέσματα υπολογισμών για την ψύξη της ψυχρής δεξαμενής μετά από 6 ώρες αποθήκευσης, αν είναι εκτός λειτουργίας για αρκετές εβδομάδες τον χρόνο. Το σχήμα δείχνει ότι μετά από 6 εβδομάδες αποθήκευσης χωρίς να λειτουργεί, η θερμοκρασία ήταν πάνω από  $250^{\circ}\text{C}$  οπότε και αρκετά υψηλότερα από το σημείο πήξης των αλάτων.

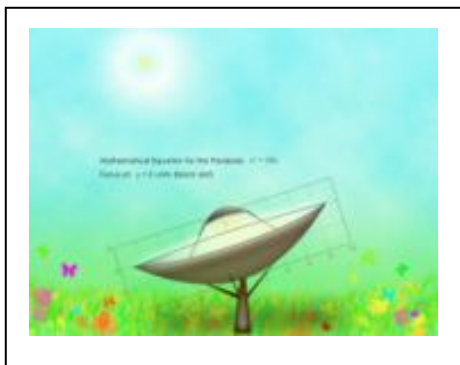


Σχήμα 2

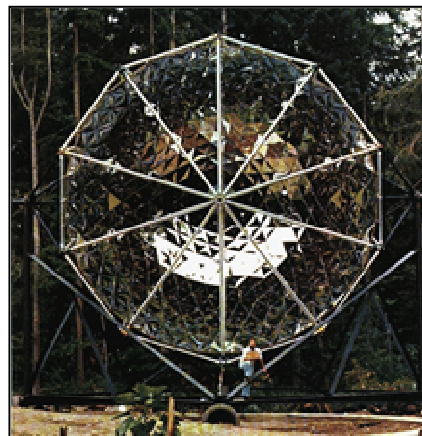
Θερμοκρασία ψυχρής δεξαμενής σε περίοδο μη λειτουργίας της

Τα παραπάνω ισχύουν για κανονικές συνθήκες περιβάλλοντος. Σε ακραίες συνθήκες, ενδείκνυται η χρήση ενός αισθητήρα ο οποίος θα παρεμβαίνει και θα πραγματοποιεί διορθώσεις στο σύστημα [27].

### 3.2 ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΟΙ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ CPC



Σχήμα  
Συλλέκτης τύπου CPC



Σχήμα 2  
Συλλέκτης τύπου CPC

Οι κυρτοί σύνθετοι παραβολικοί συγκεντρωτικοί συλλέκτες (CPC) αποτελούνται από δυο μισούς – παραβολικούς ανακλαστές και έναν μεταλλικό ανακλαστή, ο οποίος είναι τοποθετημένος στο κάτω μέρος του κατόπτρου. Αν είναι προσανατολισμένος σε ανατολή προς δύση, τότε το κάτοπτρο είναι σταθερό. Οι CPC είναι ικανοί να συλλέγουν και διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία, εκτός από άμεση. Επίσης είναι αποτελεσματικοί για μεσαίες θερμοκρασίες. Αν και δεν είναι τόσο διαδεδομένοι όσο τα κάτοπτρα σχήματος σκάφης, έχουν παρουσιάσει σημαντική εξέλιξη κατά το πέρασμα των χρόνων, οπότε και κεντρίζουν το ενδιαφέρον μας για περαιτέρω αναφορά τους.

Όλοι οι δισδιάστατοι συλλέκτες (2-D) CPC έχουν επιθυμητή γωνία πρόσπτωσης, η οποία συχνά τους δίνει την δυνατότητα να λειτουργούν κατά τη διάρκεια μιας πλήρους ημέρας χωρίς να χρειάζεται η διαδικασία παρακολούθησης του ήλιου, που είναι αναγκαίος στους τρισδιάστατους (3-D), όταν ο επιμήκης άξονας προσανατολίζεται στην ανατολή – δύση.

Υπάρχουν πολλά μοντέλα αυτού του είδους συλλέκτη, μερικά από τα οποία μελετώνται στα παρακάτω κεφάλαια.

### 3.2.1 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΙ ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ ΜΕ ΕΠΙΠΕΔΟΥΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΕΣ ΔΙΠΛΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ (CPC)

#### ΓΕΝΙΚΑ

Ο προτεινόμενος συλλέκτης βασίζεται σε ένα ασύμμετρο κόλουρο παραβολικό ανακλαστή, ο οποίος αποτελείται από ένα παραβολικό και ένα κυκλικό μέρος [32]. Ένας επίπεδος απορροφητής διπλής επιφάνειας εγκαθίσταται στο επάνω μέρος του συλλέκτη παράλληλα στο τζάμι για να σχηματίσει ένα κενό παγίδευσης θερμότητας μεταξύ της ανάστροφης επιφάνειας του απορροφητή και του κυκλικού μέρους του καθρέπτη. Ο καθρέπτης αυτός στοχεύει στην επίτευξη μεγίστου βαθμού απόδοσης και στην ελαχιστοποίηση των θερμικών απωλειών που εισάγονται στο κενό από τις μη απορροφούμενες ακτίνες του ηλίου. Ο καθρέπτης μπορεί να εγκατασταθεί παράλληλα ή κάθετα σε σχέση με τον υαλοπίνακα. Η παράλληλη εγκατάσταση θεωρείται πιο αποτελεσματική όσον αφορά τον βαθμό απόδοσης του συλλέκτη, διότι αυξάνει το ποσοστό της άμεσης απορρόφησης της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας.

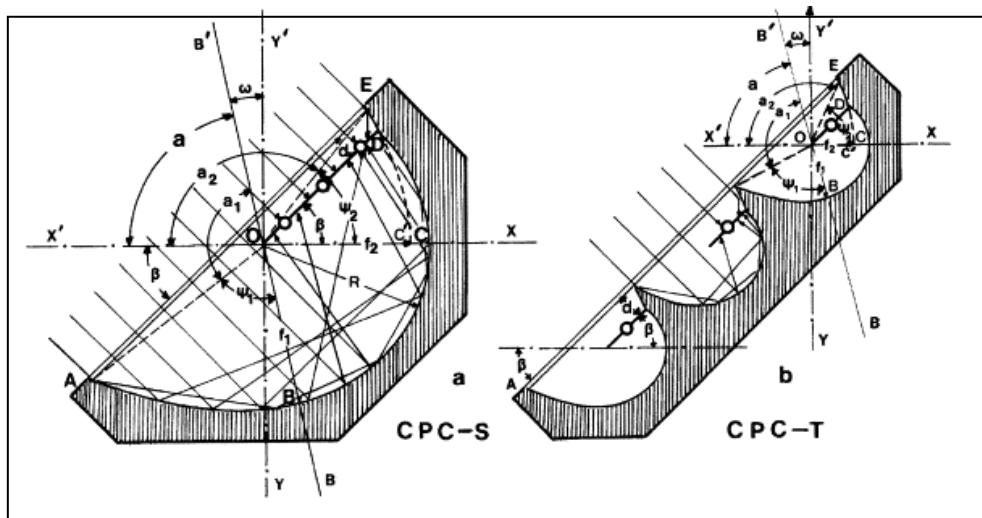
Η χρήση των κολουρων καθρεπτών με μεγάλη αντανακλαστικότητα και των επίπεδων απορροφητών με μεγάλο πλάτος σε σχέση με το κενό, μπορεί να καταλήξει σε βαθμό απόδοσης σχεδόν ίσο με αυτόν των επίπεδων συλλεκτών [32]. Το κενό πρέπει να πληρωθεί με μονωτικό έτσι ώστε να αποτραπεί η κυκλοφορία του αέρα. Περαιτέρω μείωση των θερμικών απωλειών μπορεί να επιτευχθεί με χρήση επιλεκτικών επικαλύψεων είτε στην μια είτε και στις δυο επιφάνειες του απορροφητή.

#### ΔΟΜΗ

Στο παρακάτω σχήμα, διακρίνουμε δυο είδη συλλεκτών, τον CPC-S και τον CPC-T. Τα κύρια μέρη και των δυο συλλεκτών είναι ο επίπεδος απορροφητής, ο κύριος καθρέπτης, ο μικρός καθρέπτης στην κορυφή του συλλέκτη, το διαφανές κάλυμμα και η εξωτερική θερμική μόνωση.

Ο επίπεδος απορροφητής του CPC-S αποτελείται από τρεις σειρές από σωλήνες κατάλληλα τοποθετημένους έτσι ώστε να διαμορφώνουν ένα μόνο απορροφητή [32]. Αντιθέτως, στον CPC-T, οι τρεις σειρές σωλήνων αποτελούν τρεις ξεχωριστές

μονάδες, συνέπεια του οποίου είναι μικρότερο βάθος συλλέκτη από αυτόν του CPC-S [32].



Σχήμα 1  
Συλλέκτες CPC – S και CPC – T

## ΑΝΑΛΥΣΗ

Με βάση το σύστημα συντεταγμένων  $XOX'$  και  $YOY'$  σχηματίζονται οι εξής γωνίες:

- $\beta$ , από τον υαλοπίνακα AE και το παράλληλο σε αυτόν απορροφητή OD
- $\omega$ , από τους άξονες  $BOB'$  και  $YOY'$
- $\psi_1$  η οποία καθορίζει και την γωνία  $\alpha_1$  ( $\alpha_1 = \pi - \psi_1$ )
- $\psi_2$  η οποία καθορίζει την  $\alpha_2$  ( $\alpha_2 = \pi - \psi_2$ )

Οι γωνίες  $\beta$  και  $\omega$  εξαρτώνται κυρίως από το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής στην οποία είναι εγκατεστημένοι οι συλλέκτες καθώς επίσης και από την εποχή κατά την οποία αυτοί λειτουργούν [32].

Από το σχήμα 1, το πλάτος του απορροφητή είναι

$$W = [OD] \quad (1)$$

και ο βαθμός συγκέντρωσης

$$C = A_a / A_r = [AE] / (2 [OD]) \quad (2)$$

όπου

$A_a$ : η διατομή της σπής



$A_r$  : η διατομή της ολικής επιφάνειας.

Το πλάτος και η γωνία  $\beta$  επηρεάζουν τη διαμόρφωση του κενού μεταξύ της επιφάνειας του απορροφητή και του κυκλικού μέρους του καθρέπτη. Μεγάλα μεγέθη αυτών δημιουργούν ένα ικανό μέγεθος κενού το οποίο αντισταθμίζει τις απώλειες μέσω συναγωγής.

Ενδεικτικές τιμές των παραπάνω μεγεθών είναι:  $\beta = 40^\circ$ ,  $\omega = 0^\circ$  και  $\alpha = 90^\circ$  για γεωγραφικό πλάτος  $30 - 50^\circ$  [32].

Ο βαθμός απόδοσης υπολογίζεται από την σχέση

$$n = Q_u / Q_s \quad (3)$$

όπου

$Q_u$  : η ωφέλιμη εισερχόμενη ενέργεια του συλλέκτη κατά το χρονικό διάστημα  $\Delta t$

$Q_s$  : η εισερχόμενη ηλιακή ενέργεια πάνω στην διατομή  $A_a$  κατά το ίδιο χρονικό διάστημα.

Είναι:

$$Q_u = m * c_{p,w} * (T_0 - T_i) \quad (4)$$

$$\dot{m} = \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad (5)$$

$$Q_s = G * A_a \quad (6)$$

όπου

$T_0$  : η εισερχόμενη θερμοκρασία του νερού

$T_i$  : η εξερχόμενη θερμοκρασία του νερού

Ο βαθμός απόδοσης καθορίζεται από την παράμετρο

$$\Delta T / G = (T_i - T_a) / G = (T_r - T_a) / G \quad (7)$$

όπου

$T_a$  : η θερμοκρασία περιβάλλοντος

$T_r$  : η μέση θερμοκρασία του απορροφητή.

Πραγματοποιήθηκε πείραμα μεταξύ έξι τύπων CPC-S, δυο CPC-T και δυο επίπεδων συλλεκτών, τα αποτελέσματα του οποίου έχουν συγκεντρωθεί στον παρακάτω πίνακα [32].

Πίνακας 1  
Αποτελέσματα βαθμών απόδοσης για διάφορους συλλέκτες

Collector model: CPC-S	Efficiency curve fitting
CPC-S1 (in-bl/bl)	$\eta = 0.6512 - 4.0966 (\Delta T/G) - 15.953 (\Delta T/G)^2$
CPC-S2 (in-sel/bl)	$\eta = 0.6438 - 3.0840 (\Delta T/G) - 16.067 (\Delta T/G)^2$
CPC-S3 (in-sel/sel)	$\eta = 0.6441 - 2.7818 (\Delta T/G) - 10.880 (\Delta T/G)^2$
CPC-S4 (al-bl/bl)	$\eta = 0.7274 - 3.6212 (\Delta T/G) - 15.459 (\Delta T/G)^2$
CPC-S5 (al-sel/bl)	$\eta = 0.7295 - 3.2510 (\Delta T/G) - 11.361 (\Delta T/G)^2$
CPC-S6 (al-sel/sel)	$\eta = 0.7244 - 2.3608 (\Delta T/G) - 16.283 (\Delta T/G)^2$
<b>Collector model: CPC-T</b>	
CPC-T1 (al-sel/bl)	$\eta = 0.7070 - 2.8193 (\Delta T/G) - 9.9639 (\Delta T/G)^2$
CPC-T2 (al-sel/sel)	$\eta = 0.7035 - 2.5896 (\Delta T/G) - 7.4878 (\Delta T/G)^2$
<b>Collector model: FLAT</b>	
FLAT-1 (bl)	$\eta = 0.7773 - 5.6249 (\Delta T/G) - 16.510 (\Delta T/G)^2$
FLAT-2 (sel)	$\eta = 0.7837 - 3.9226 (\Delta T/G) - 13.900 (\Delta T/G)^2$

Σχολιάζοντας τα αποτελέσματα του πίνακα 1, παρατηρούμε ότι τα μοντέλα CPC έχουν μικρότερο βαθμό απόδοσης σε σχέση με τους επίπεδους συλλέκτες.

Ο CPC-T συλλέκτης παρουσιάζει τον καλύτερο βαθμό απόδοσης σε σχέση με τους υπόλοιπους CPC καθώς επίσης και από τους επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες για  $\Delta T/G > 0.04 \text{ KW}^{-1}\text{m}^2$ . Για αυτό ο CPC-T συλλέκτης είναι προτιμότερος για θερμοκρασίες  $T_i$  μεταξύ  $40^\circ$  και  $50^\circ$ .

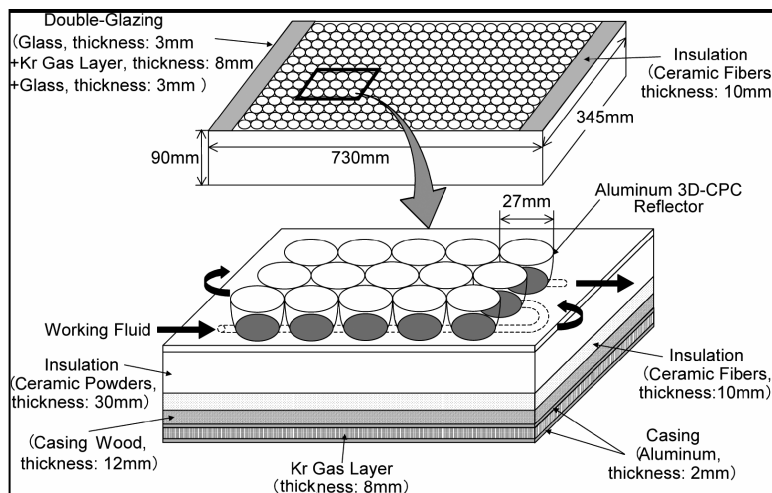
Ο CPC-T συλλέκτης εγκαθίσταται σε οριζόντιο έδαφος και σε στέγες κτιρίων.

### 3.2.2 ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΟΙ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΙ (3-D) CPC ΗΛΙΑΚΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ

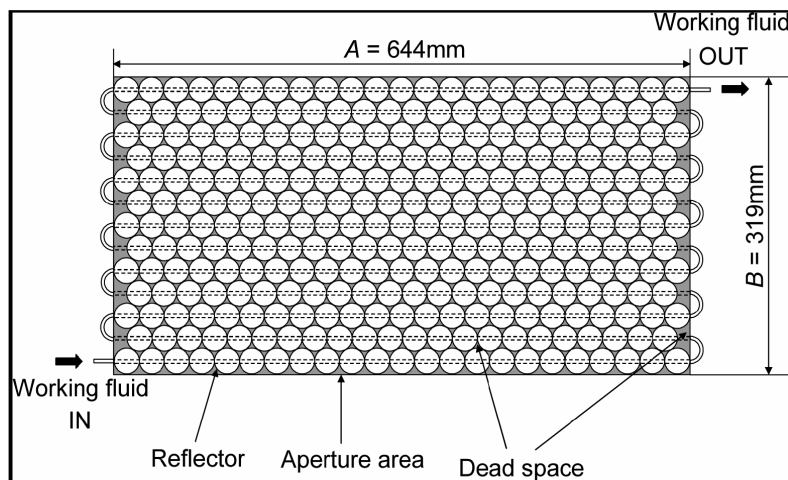
#### ΓΕΝΙΚΑ

Οι τρισδιάστατοι (3-D) CPC ηλιακοί συλλέκτες χαρακτηρίζονται από την εξαιρετική θερμική απόδοσή τους σε υψηλό εύρος θερμοκρασιών της τάξης των 100 – 200°C [30]. Σε άλλους συλλέκτες για να βελτιωθεί η θερμική απόδοσή τους σε υψηλές θερμοκρασίες, επικράτησαν λόγοι συγκέντρωσης μεταξύ 1.5 και 2 και συστήματα εντοπισμού. Αντιθέτως, σε αυτό τον τύπο ηλιακών συλλεκτών επικρατούν λόγοι συγκέντρωσης της τάξης των 2 - 5 και δεν υπάρχουν συστήματα εντοπισμού [30].

Στο σχήμα 1 απεικονίζεται ένας 3-D CPC ηλιακός συλλέκτης καθώς και στο σχήμα 2 μια όψη αυτού, στην οποία απεικονίζονται οι ανακλαστήρες και οι σωλήνες απορρόφησης.



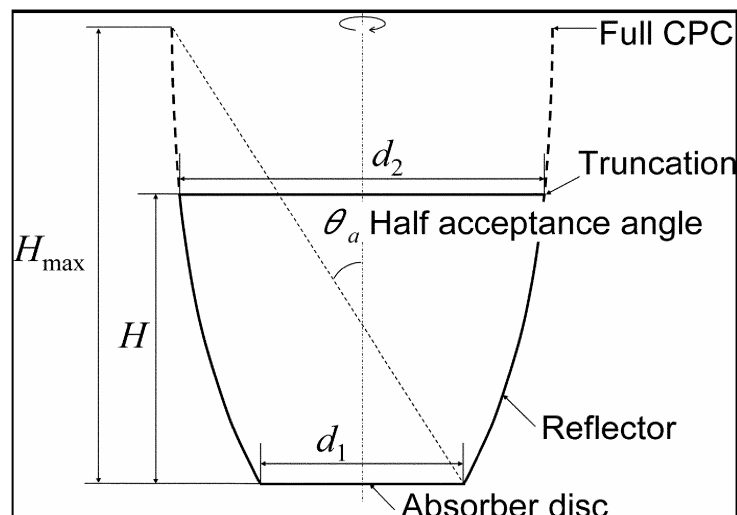
Σχήμα 1  
3 -D CPC



Σχήμα 2  
Ανακλαστήρες και σωλήνες απορρόφησης CPC συλλέκτη

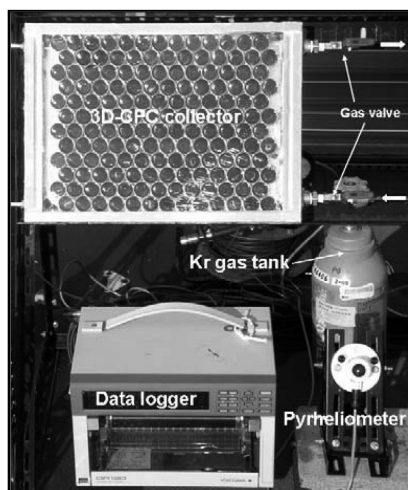
## ΔΟΜΗ

Ο 3-D CPC ηλιακός συλλέκτης χαρακτηρίζεται από την γωνία εισόδου  $\theta_a$  και από τον λόγο  $H/H_{\max}$  ο οποίος καθορίζει την μορφή του συλλέκτη [30]. Τα μεγέθη αυτά φαίνονται στο παρακάτω σχήμα 3.



Σχήμα 3  
Διαστάσεις συλλέκτη

Για την μελέτη του ηλιακού αυτού συλλέκτη, θεωρούμε δυο διαφορετικούς τύπους, τους Spec-A και Spec-B. Ο Spec-A αποτελείται από διπλό υαλοπίνακα πληρωμένο με αέριο κρύπτον (ολική μετάδοση: 0.8) και επιλεκτικές επιφάνειες απορρόφησης (εκπομπή 0.3) [30]. Από την άλλη, ο Spec-B αποτελείται από ένα μονό μη ανακλώμενο υαλοπίνακα (ολική μετάδοση 0.93) και από εξαιρετική επιλεκτική επιφάνεια απορροφητή (εκπομπή 0.05 στους 100°C) [30]. Επιπλέον για να ελαττωθούν οι θερμικές απώλειες του Spec-B συλλέκτη, χρησιμοποιείται μόνωση με θερμική αγωγιμότητα 0.006 W/(m\*K) [30].



Σχήμα 4  
Spec-B ηλιακός συλλέκτης

## ΑΝΑΛΥΣΗ

Ο βαθμός απόδοσης και των δυο τύπων συλλεκτών υπολογίζεται από την σχέση:

$$n_C = \frac{m \cdot \rho \cdot C_p \cdot (T_{out} - T_{in})}{I \cdot S_C} \quad (1)$$

όπου

$T_{in}$  : η θερμοκρασία εισόδου του νερού [K]

$T_{out}$  : η θερμοκρασία εξόδου του νερού [K]

$\dot{m}$  : η παροχή νερού [l/min]

$\rho$  : η πυκνότητα του νερού [kg/m<sup>3</sup>]

$C_p$  : συντελεστής θέρμανσης του νερού [J/(kg\*K)]

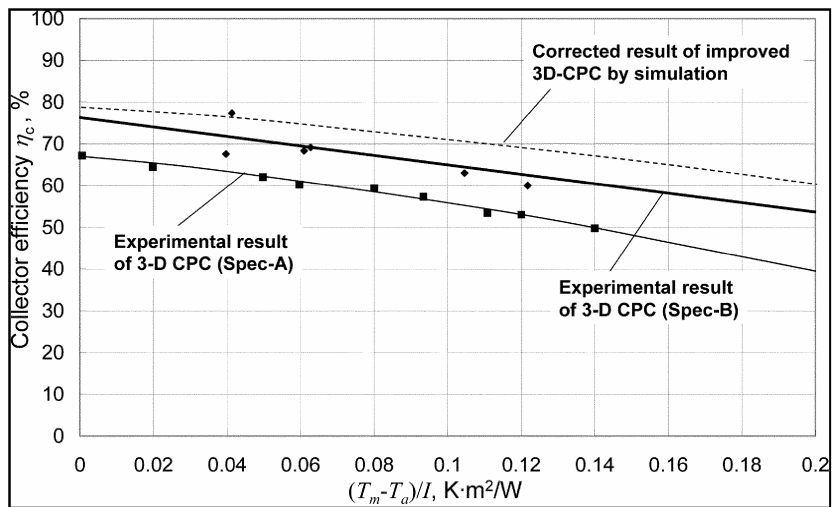
$S_C$  : η διατομή εισόδου του συλλέκτη [m<sup>2</sup>]

Οι πειραματικές μετρήσεις που διεξήχθησαν [30], συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 1  
Αποτελέσματα πειραματικών μετρήσεων

Factor	unit	Spec-A	Spec-B
Effective aperture area, $S_C$	m <sup>2</sup>	0.205	0.114
Number of reflectors	-	293	156
Tilt angle	°	45	45
Azimuth angle	°	0	0
Flow rate	liter/min	0.4	0.05
Half acceptance angle, $\theta_a$	°	32	32
Truncation ratio, $H/H_{max}$	-	0.62	0.62
Absorber disc diameter, $d_2$	mm	15	15
CPC aperture diameter, $d_1$	mm	27	27
Concentration ratio, $C$	-	3.2	3.2
Reflectance of reflector, $\rho$	-	0.88	0.88
Transmittance of cover glass, $\tau$	-	0.80	0.93
Absorption of absorber, $\alpha$	-	0.95	0.94
Thermal conductivity of insulation (thickness)	W/(m·K)	0.05 (30mm)	0.006 (15mm)
Emissivity of absorber, $\varepsilon_b$	-	0.3	0.05

Ο βαθμός απόδοσης και για τους δυο τύπους ηλιακών συλλεκτών χαράσσεται στο σχήμα 5:

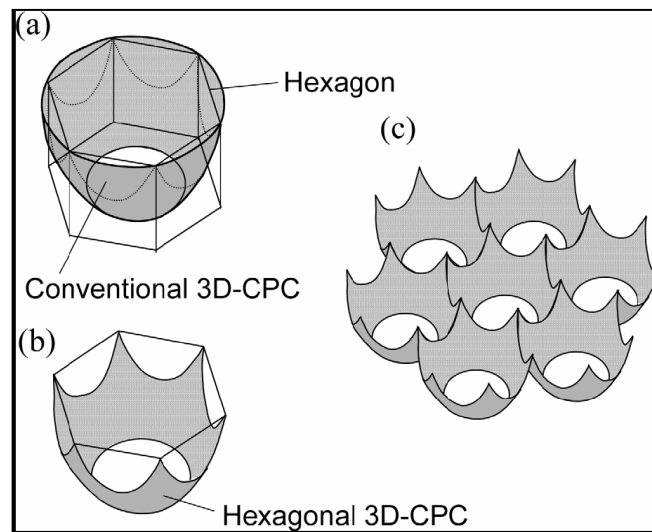


Σχήμα 5  
Βαθμός απόδοσης συλλεκτών Spec – A και Spec – B

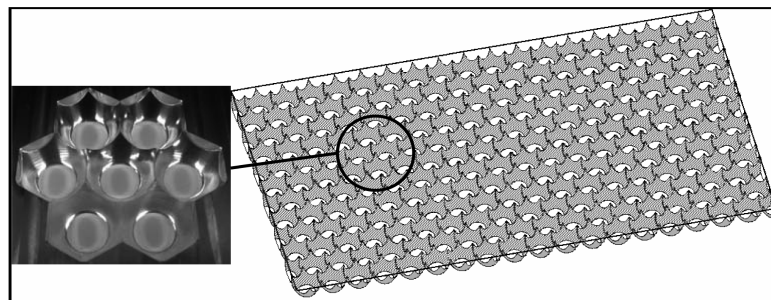
Από τα παραπάνω φαίνεται ότι ο Spec-B έχει καλύτερο συντελεστή απόδοσης από ότι ο Spec-A και ειδικά σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών.

## ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΣ ΕΞΑΓΩΝΙΚΟΣ 3-D CPC ΗΛΙΑΚΟΣ ΣΥΛΛΕΚΤΗΣ

Στον συμβατικό 3-D CPC ηλιακό συλλέκτη που παρουσιάσαμε παραπάνω παρουσιάζεται ένα σημαντικό μειονέκτημα. Εξαιτίας του κυκλικού σχήματος του ανακλαστήρα, δημιουργείται κενός χώρος στον οποίο δεν απορροφάται ηλιακή ακτινοβολία. Αυτή η περιοχή καταλαμβάνει το 20% της ολικής διατομής εισόδου του συλλέκτη. Το πρόβλημα αυτό λύνεται με την χρήση του εξαγωνικού 3-D CPC ηλιακού συλλέκτη, ο οποίος έχει την μορφή των σχημάτων 6 και 7:



Σχήμα 6  
Εξαγωνικός 3 -D CPC συλλέκτης



Σχήμα 7  
Εξαγωνικός 3 -D CPC συλλέκτης

Θεωρώντας γνωστά τα δεδομένα του πίνακα 2:

Πίνακας 2  
Τιμές παραμέτρων

Simulation period	days	365
Place	-	Sendai, Japan (Lat.38 °, Long.140 °)
Operating period for electric generation	-	April – September 10:00–13:00
Tilt angle	°	20
Azimuth angle	°	0
Operating temperature, $T_m$	K	200
Absorptance of absorber surface, $\alpha$	-	0.94
Emittance of absorber surface, $\varepsilon_b$	-	0.05
Reflectance of CPC reflector, $\rho$	-	0.93
Transmittance of cover, $\tau_B, \tau_D$	-	0.93
Reflector height, $H$	m	0.01
Thermal conductivity of Kr, $\lambda$	W/(m·K)	$14.9 \times 10^{-3}$

υπολογίζουμε τον βαθμό απόδοσης από τις παρακάτω σχέσεις[30] :

$$n_c = \frac{\alpha \times \left( (\tau_B \times \rho_B^{<m>} \times I_B) + (\tau_D \times \rho_D^{<m>} \times I_D) \right)}{I_B + I_D} - \frac{\left( (\varepsilon_b \times \sigma \times T_b^4) + K(T_b - T_\alpha) \right)}{(I_B + I_D) \times C} \quad (2)$$

$$K = K_1 + K_2 = 1 / [(1 / h_w) + (d_{Kr} / \lambda_{Kr})] + 1 / [(1 / h_w) + (d_i / \lambda_i)] \quad (3)$$

$$h_w = 5.7 + 3.8 v \quad (4)$$

όπου

$\alpha$  : η απορροφητικότητα της επιφάνειας

$\tau_B$  : η μετάδοση δέσμης ηλιακής ακτινοβολίας

$\tau_D$  : η μετάδοση της διάχυτης ακτινοβολίας

$\rho_B^{<m>}$  : ενεργειακή σταθερά για δέσμη ηλιακής ακτινοβολίας

$\rho_D^{<m>}$  : ενεργειακή σταθερά για διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία

$I_B$  : η ένταση ηλιακής δέσμης [ W/m<sup>2</sup> ]

$I_D$  : η ένταση της διάχυτης ακτινοβολίας [ W/m<sup>2</sup> ]

$\varepsilon_b$  : η σταθερά εκπομπής της επιφάνειας απορροφητή

$\sigma$  : η σταθερά Stefan-Boltzmann, [ W/(m<sup>2</sup>\*K<sup>4</sup>) ]

$T_b$  : η θερμοκρασία απορρόφησης [ K ]



$T_a$  : η θερμοκρασία περιβάλλοντος [ K ]

$h_w$  : ο συντελεστής αγωγιμότητας [ W/(m<sup>2</sup>\*K) ]

$d_{Kr}$  : το ύψος του ανακλαστήρα [ m ]

$d_i$  : το πάχος της μόνωσης [ m ]

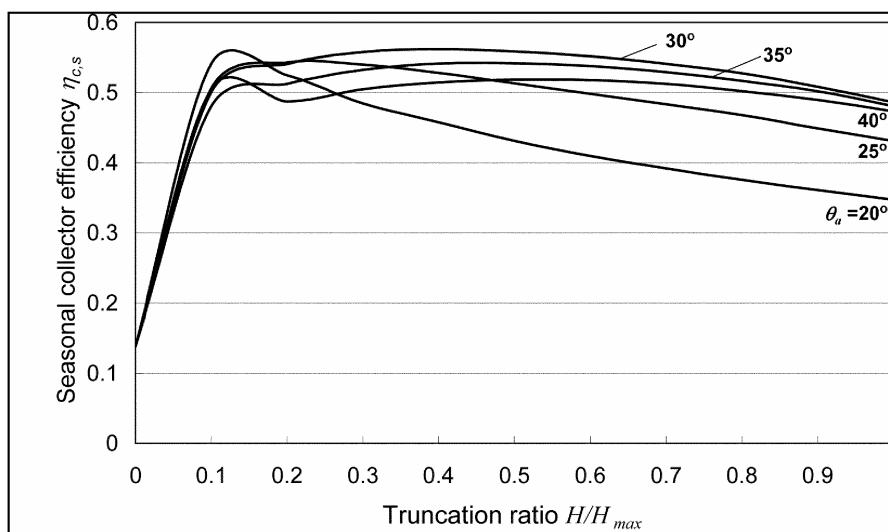
$\lambda_{Kr}$  : ο θερμικός συντελεστής του αερίου κρύπτον [ W/(m\*K) ]

$\lambda_i$  : ο θερμικός συντελεστής της μόνωσης [ W/(m\*K) ]

$v$  : η μέση ταχύτητα του ανέμου [ m/s ]

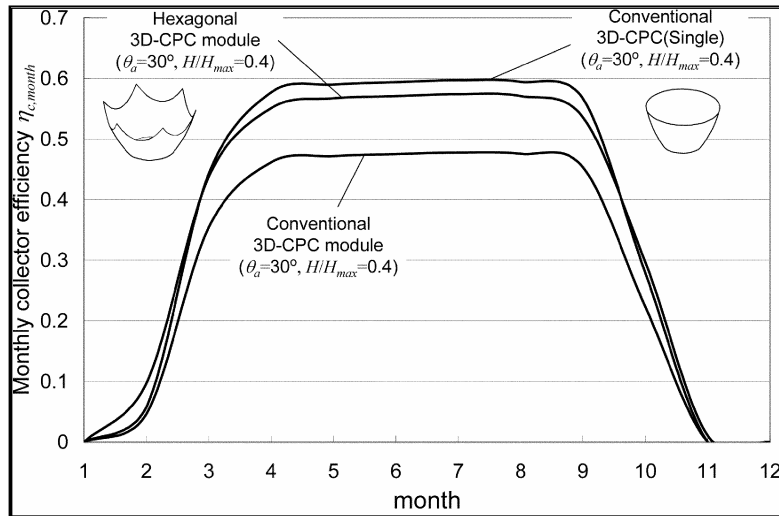
Επίσης θεωρούμε ότι η θερμοκρασία απορρόφησης ισούται με την θερμοκρασία λειτουργίας:  $T_m = (T_{in} + T_{out}) / 2$  και είναι περίπου ίση με 200 °C[30] .

Με βάση τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν, χαράσσουμε το παρακάτω διάγραμμα:

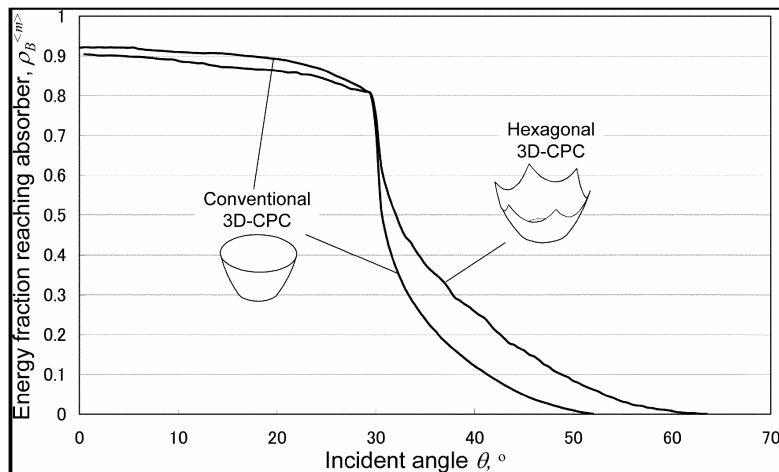


Σχήμα 8  
Εποχιακός βαθμός απόδοσης συλλέκτη

Συγκρίνοντας τον συμβατικό 3-D CPC ηλιακό συλλέκτη και τον εξαγωνικό:



Σχήμα 9  
Μηνιαίος βαθμός απόδοσης συλλέκτη



Σχήμα 10  
Ποσοστό απορροφώμενης ενέργειας

καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι υπερέρχει ο εξαγωνικός έναντι του συμβατικού 3-D CPC ηλιακού συλλέκτη.

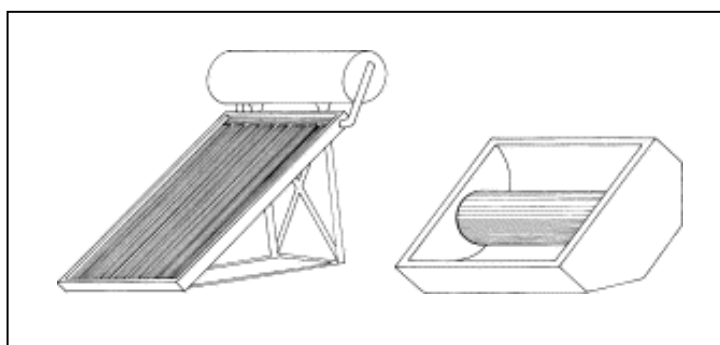
### 3.2.3 ΗΛΙΑΚΟΙ ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ CPC ΤΥΠΟΥ ICS

#### ΓΕΝΙΚΑ

Η θέρμανση νερού με χρήση ηλιακής ενέργειας σε θερμοκρασίες μεταξύ 40 – 70 °C μπορεί να επιτευχθεί μέσω των επίπεδων ηλιακών θερμοσίφωνων (FPTU) και των μονάδων πλήρων συλλεκτών αποθήκευσης (ICS). Και οι δυο προαναφερθείσες ηλιακές μονάδες καλύπτουν τις οικιακές ανάγκες για περίπου 100–200 l ζεστού νερού την ημέρα και χαρακτηρίζονται από απλή κατασκευή, εγκατάσταση και λειτουργία.

Το κύριο πλεονέκτημα των FPTU είναι η ικανότητά τους να διατηρούν την θερμοκρασία του αποθηκευμένου νερού. Από την άλλη πλευρά, τα συστήματα ICS έχουν πιο απλή κατασκευή και χαμηλότερο κόστος καθώς επίσης το μικρό τους ύψος καθιστά τα συστήματα αυτά πιο εναρμονισμένα με την περιβάλλουσα αρχιτεκτονική.

Το κύριο πρόβλημα των συστημάτων ICS είναι οι αυξημένες θερμικές απώλειες του αποθηκευμένου νερού, το οποίο δικαιολογείται από το γεγονός ότι σημαντική επιφάνεια της αποθηκευτικής δεξαμενής εκτίθεται στην ατμόσφαιρα για την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται δυο συστήματα FPTU και ICS.

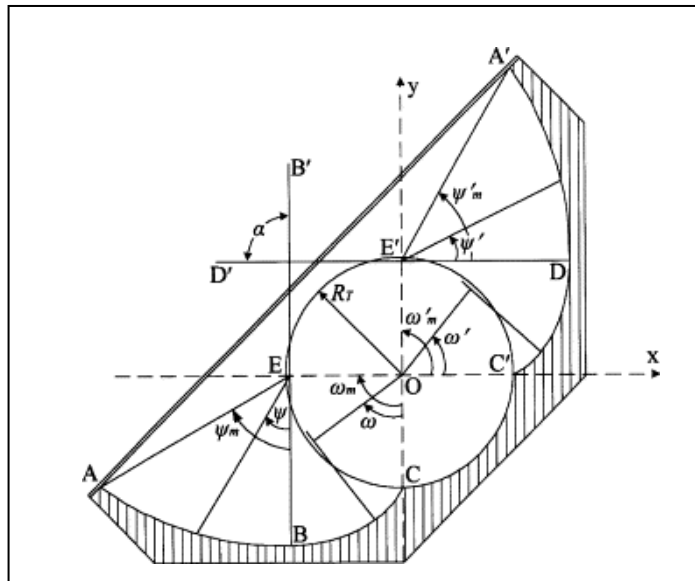


Σχήμα 1  
Επίπεδος ηλιακός συλλέκτης και συλλέκτης τύπου ICS

#### ΔΟΜΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ICS

Στα συστήματα αυτά, μια κυλινδρική οριζόντια δεξαμενή αποθήκευσης τοποθετείται σε έναν συμμετρικό CPC ανακλαστή. Στο σχήμα 2 παρουσιάζεται μέρος του

μοντέλου ICS, το οποίο αποτελείται από συμμετρικούς κόλινους ανακλαστές. Η γωνία  $\alpha$  ( $\alpha = 90^\circ$ ) καθορίζει την γωνία εισόδου της ηλιακής ακτινοβολίας που ανακλάται από την επιφάνεια του συστήματος, η οποία σχηματίζεται από τους άξονες  $BB'$  και  $DD'$  [31]. Θεωρούμε  $W_a = [AA']$  το πλάτος εισόδου,  $R_T$  και  $D_T$  την ακτίνα και διάμετρο της κυλινδρικής δεξαμενής αποθήκευσης αντίστοιχα,  $\omega$  και  $\omega'$  τις γωνίες που σχηματίζουν τα τμήματα  $(BC)$  και  $(C'D)$  αντίστοιχα και  $\psi$ ,  $\psi'$  τις γωνίες που σχηματίζουν τα τμήματα  $(AB)$  και  $(DA')$  αντίστοιχα. Επίσης, στο σχήμα αυτό δηλώνεται η φορά αύξησης των γωνιών  $\omega$ ,  $\omega'$ ,  $\psi$  και  $\psi'$  των οποίων οι μέγιστες τιμές είναι:  $\omega_m = \omega'_m = 90^\circ$ ,  $\psi_m = \psi'_m = 58.78^\circ$  [31].



Σχήμα 2  
Τομή συλλέκτη

## ΑΝΑΛΥΣΗ

Η γεωμετρία των ανακλαστών σε σχέση με το σύστημα αξόνων  $O,x,y$  συσχετίζεται με τις παραμέτρους  $R_T$ ,  $\omega$ ,  $\omega'$ ,  $\psi$  και  $\psi'$  ως εξής:

➤ *Τμήμα (AB) :*

$$x = -R_T [ 1 + \pi \sin \psi / ( 1 + \cos \psi ) ] \quad (1)$$

$$y = -R_T \pi \cos \psi / ( 1 + \cos \psi ) \quad (2)$$

➤ *Τμήμα (BC):*

$$x = -R_T (\sin\omega - \omega \cos\omega) \quad (3)$$

$$y = -R_T (\cos\omega + \omega \sin\omega) \quad (4)$$

➤ *Τμήμα (C'D):*

$$x = R_T (\cos\omega' + \omega' \sin\omega') \quad (5)$$

$$y = R_T (\sin\omega' - \omega' \cos\omega') \quad (6)$$

➤ *Τμήμα (DA'):*

$$x = R_T \pi \cos\psi' / (1 + \cos\psi') \quad (7)$$

$$y = R_T [1 + \pi \sin\psi' / (1 + \cos\psi')] \quad (8)$$

Για την καλύτερη μελέτη των συστημάτων ICS, θεωρούμε τρία διαφορετικά συστήματα ICS-1, ICS-2, ICS-3 τα οποία διαφέρουν στη διάμετρο  $D_T$  των δεξαμενών αποθήκευσης νερού. Οι κύριες κατασκευαστικές παράμετροι και για τα τρία αυτά συστήματα φαίνονται στον πίνακα 1, όπου  $A_T$  η εκτιθέμενη, στην ηλιακή ακτινοβολία, κυλινδρική επιφάνεια της δεξαμενής και CR ο λόγος συγκέντρωσης με  $CR = A_a / A_T$ .

Πίνακας 1  
Κατασκευαστικές παράμετροι συστημάτων ICS

System	$D_T$ (m)	$V_T$ (l)	$W_a$ (m)	$A_a$ (m <sup>2</sup> )	$A_T$ (m <sup>2</sup> )	$A_S$ (m <sup>2</sup> )	CR	$V_T/A_a$ (lm <sup>-2</sup> )	$V_T/A_S$ (lm <sup>-2</sup> )
ICS-1	0.26	53.62	0.68	0.67	0.61	2.36	1.098	80.03	22.72
ICS-2	0.32	81.23	0.82	0.81	0.75	2.92	1.080	100.28	27.82
ICS-3	0.36	102.81	0.92	0.91	0.84	3.38	1.083	112.98	30.42

Στην διάρκεια των πειραμάτων, διεξήχθησαν μετρήσεις σε 24ωρη βάση στις θερμοκρασίες που επικρατούσαν μέσα στην δεξαμενή αποθήκευσης  $T_D$  (κάτω),  $T_M$  (μέσο) και  $T_U$  (πάνω) [°C], στην μέση θερμοκρασία του νερού  $T_{w,m}$  [°C], στην θερμοκρασία περιβάλλοντος  $T_a$  [°C], στην ένταση της εισερχόμενης ηλιακής

ακτινοβολίας  $G$  [ $W m^{-2}$ ] στην είσοδο των συστημάτων ICS και στην ταχύτητα του ανέμου  $V_w$  [ $m s^{-1}$ ] [31].

Η μέση θερμοκρασία του νερού κάθε πειραματικού μοντέλου δίνεται από την σχέση:

$$T_{w,m} = (T_D + T_M + T_U) / 3 \quad (9)$$

και ποικίλλει ανάλογα με την εποχή και τις εκάστοτε συνθήκες περιβάλλοντος.

Για την μέτρηση της ημερήσιας μέσης αποδοτικότητας χρησιμοποιούμε την σχέση

$$\eta_d = Q_w / Q_R \quad (10)$$

Η μάζα του νερού  $m_w$  [kg], ο συντελεστής  $C_{p,w}$  [ $J kg^{-1} K^{-1}$ ] και η αρχική  $T_{i,m}$  [ $^{\circ}C$ ] και τελική  $T_{f,m}$  [ $^{\circ}C$ ] μέση θερμοκρασία του νερού καθορίζουν την ποσότητα θερμότητας  $Q_w$  [J], η οποία προσδίδεται στο νερό, θεωρώντας μηδενική την αποβολή θερμότητας κατά την διάρκεια της ημέρας [31].

Είναι:

$$Q_w = M_w C_{p,w} (T_{f,m} - T_{i,m}) \quad (11)$$

Η συνολική ηλιακή ακτινοβολία που εισέρχεται μέσω της επιφανείας  $A_a$  [ $m^2$ ] στο χρονικό διάστημα  $\Delta t$  [s], όπου  $t_i$  (6:30) το αρχικό σημείο και  $t_f$  (18:30) το τελικό σημείο, δίνεται από την παράμετρο  $Q_R$  [J] [31].

$$Q_R = A_a \int_{t_i}^{t_f} G(t) dt \quad (12)$$

όπου

$G(t)$  : η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας.

Η μέση ημερήσια αποδοτικότητα  $\eta_d$  συσχετίζεται με το  $\Delta T_{m,D} / G_m$  [ $kW^{-1} m^2$ ] σύμφωνα με ένα πολυώνυμο δευτέρου βαθμού της μορφής [31].:

$$\eta_d = A + B (\Delta T_{m,D} / G_m) + C (\Delta T_{m,D} / G_m)^2 \quad (13)$$

Η παράμετρος  $\Delta T_{m,D}$  αντιστοιχεί στη θερμοκρασιακή διαφορά κατά τη διάρκεια της ημέρας:

$$\Delta T_{m,D} = (T_{i,m} + T_{f,m}) / 2 - T_{a,m} \quad (14)$$

όπου

$T_{a,m}$ : η μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος στο χρονικό διάστημα  $\Delta t$

$G_m$ : η μέση ηλιακή ακτινοβολία στο ίδιο χρονικό διάστημα:

$$G_m = \left( \int_{t_i}^{t_f} G(t) dt \right) / \Delta t \quad (15)$$

Στο πολυώνυμο ο συντελεστής A συσχετίζεται με την ολική απόδοση και αντιστοιχεί στη μέγιστη μέση αποδοτικότητα του συστήματος θεωρώντας μηδενικές θερμικές απώλειες. Οι συντελεστές B και C αντιστοιχούν στις θερμικές απώλειες του συστήματος στη διάρκεια της ημερήσιας λειτουργίας του. Ο πειραματικός καθορισμός του  $\eta_d$  σε σχέση με το  $\Delta T_{m,D} / G_m$  επιτυγχάνεται με μετρήσεις των συστημάτων ICS κάτω από ποικίλλες συνθήκες και θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ αποθηκευμένου νερού και περιβάλλοντος. Για λειτουργία στην διάρκεια της νύχτας, θεωρούμε τον συντελεστή θερμικών απωλειών  $U_s$ :

$$U_s = ( \rho C_{p,w} V_T / \Delta t ) \ln [ ( T_{i,m} - T_{a,m} ) / ( T_{f,m} - T_{a,m} ) ] \quad (16)$$

όπου

$V_T$  (l): το αποθηκευμένο νερό του συστήματος

$\rho C_{p,w} \approx 4180 \text{ kJ m}^{-3} \text{ K}^{-1}$  ( $\rho$  η πυκνότητα του νερού ίση με  $1000 \text{ kg m}^{-3}$ )

$T_{a,m}$ : η μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος στο χρονικό διάστημα  $\Delta t$  στην διάρκεια της νύχτας

$T_{i,m}$ : η μέση θερμοκρασία του νερού στο αρχικό σημείο (18:30)

$T_{f,m}$ : η τελική θερμοκρασία (6:30)

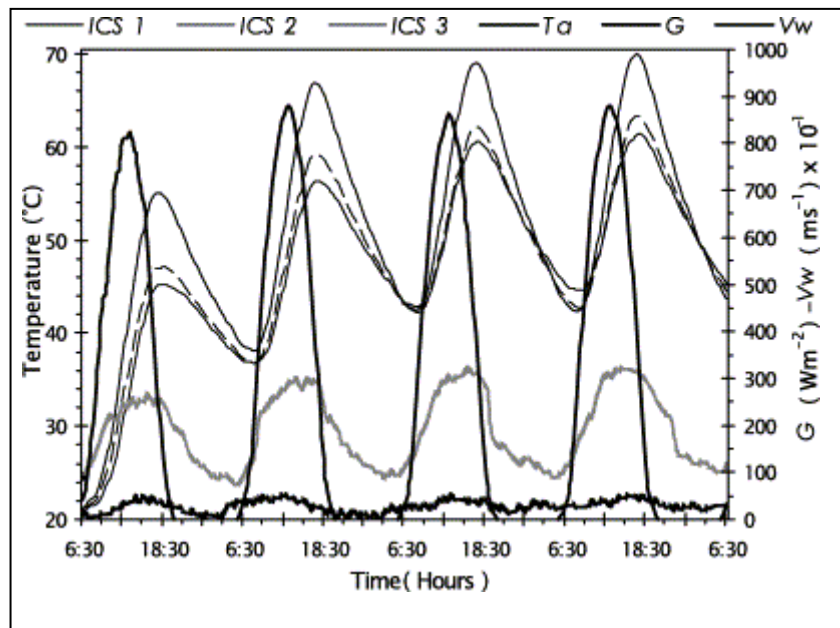
Ο συντελεστής  $U_s$  [ $\text{W K}^{-1}$ ] υπολογίζεται για διάφορες αρχικές θερμοκρασίες νερού σε κάθε σύστημα και υπολογίζεται για την μέση θερμοκρασιακή διαφορά στην διάρκεια της νύχτας

$$\Delta T_{m,N} = T_{i,m} - T_{a,m} \quad (17)$$

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν για όλα τα διαφορετικά συστήματα συνοψίζονται στον πίνακα 2 και στα διαγράμματα που έπονται:

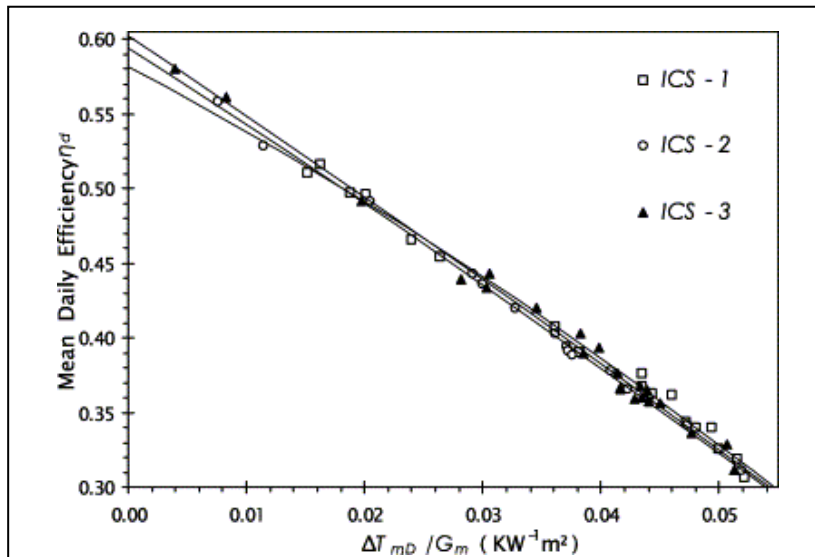
Πίνακας 2  
Αποτελέσματα πειραματικών μετρήσεων

System	Mean daily efficiency $\eta_d$	Thermal loss coefficient $U_s$ ( $WK^{-1}$ )
ICS-1	$\eta_d = 0.582$	$U_s = 4.155 + 0.009\Delta T_{m,N}$
	$4.155(\Delta T_{m,D}/G_m)$	
	$18.093(\Delta T_{m,D}/G_m)^2$	
ICS-2	$\eta_d = 0.594$	$U_s = 4.587 + 0.015\Delta T_{m,N}$
	$5.109(\Delta T_{m,D}/G_m)$	
	$6.441(\Delta T_{m,D}/G_m)^2$	
ICS-3	$\eta_d = 0.602$	$U_s = 4.724 + 0.026\Delta T_{m,N}$
	$5.272(\Delta T_{m,D}/G_m)$	
	$5.221(\Delta T_{m,D}/G_m)^2$	

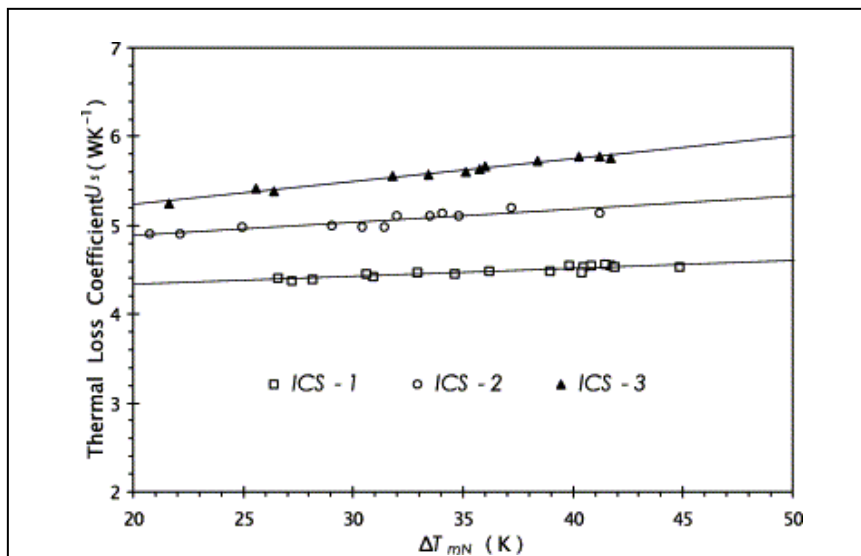


Σχήμα 3  
Θερμοκρασιακή μεταβολή σε συνάρτηση με την ώρα της ημέρας





Σχήμα 4  
Μέση ημερήσια αποδοτικότητα συλλεκτών

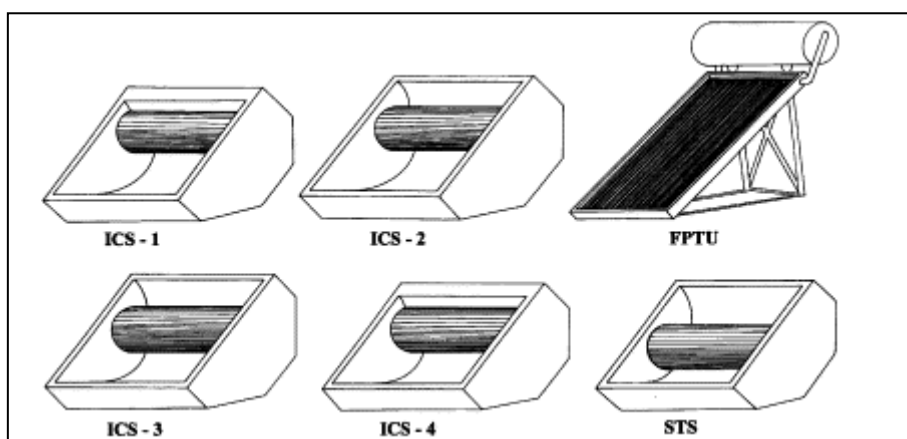


Σχήμα 5  
Συντελεστής θερμικών απωλειών

### 3.2.4 ΗΛΙΑΚΟΙ ΑΣΥΜΜΕΤΡΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ CPC ΤΥΠΟΥ ICS

#### ΓΕΝΙΚΑ

Στη μελέτη αυτή παρουσιάζονται τέσσερα μοντέλα συγκεντρωτικών συλλεκτών τύπου ICS, σκοπός των οποίων είναι να διατηρήσουν σταθερή τη θερμοκρασία του νερού κατά την διάρκεια της νύχτας. Τα μοντέλα αυτά αποτελούνται από μια δεξαμενή αποθήκευσης, έτσι ώστε να αποφευχθεί το υψηλό κόστος κατασκευής, από έναν ασύμμετρο, κόλουρο, στατικό ανακλαστήρα για ελαχιστοποίηση των απωλειών και από μια πρόσθετη θερμική μόνωση στο κυλινδρικό μέρος της δεξαμενής. Τα τέσσερα μοντέλα διαφέρουν μεταξύ τους στο σχεδιασμό του ανακλαστή και στη θερμική μόνωση. Στο σχήμα 1 απεικονίζονται οι τέσσερις αυτοί τύποι συλλεκτών, ο συγκεντρωτικός συλλέκτης με συμμετρικό ανακλαστή (STS) και ένας επίπεδος ηλιακός συλλέκτης (FPTU).



Σχήμα 1

Σύγκριση ασύμμετρων συλλεκτών CPC τύπου ICS

#### ΔΟΜΗ

Και οι τέσσερις τύποι συλλεκτών έχουν σχεδιαστεί με διάμετρο δεξαμενής  $D_T = 0.36$  m και μήκος  $L_T = 1.01$  m, οπότε και ο όγκος αποθήκευσης που δημιουργείται να ισούται με  $V_T = 102.8$  l. Το μήκος εισόδου ισούται με  $L_\alpha = 0.99$  m ενώ η διατομή εισόδου  $A_\alpha$  εξαρτάται από το πλάτος εισόδου  $W_\alpha$  [28].

Στο παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι βασικές παράμετροι για όλα τα είδη ηλιακών συλλεκτών.

Πίνακας 1

Τιμές βασικών παραμέτρων

System	$w_{\alpha}$ (m)	$A_{\alpha}$ (m <sup>2</sup> )	$D_S$ (m)	$V_T/A_{\alpha}$ (lm <sup>-2</sup> )	$A_r$ (m <sup>2</sup> )	$CR=A_{\alpha}/A_r$
ICS-1	0.95	0.94	0.79	109.4	0.84	1.12
ICS-2	1.11	1.11	0.79	92.6	0.98	1.13
ICS-3	0.94	0.93	0.57	110.5	0.84	1.11
ICS-4	0.81	0.80	0.57	128.5	0.70	1.14
STS	0.95	0.94	0.52	109.4	0.84	1.11
FPTU		2.47		55.5		

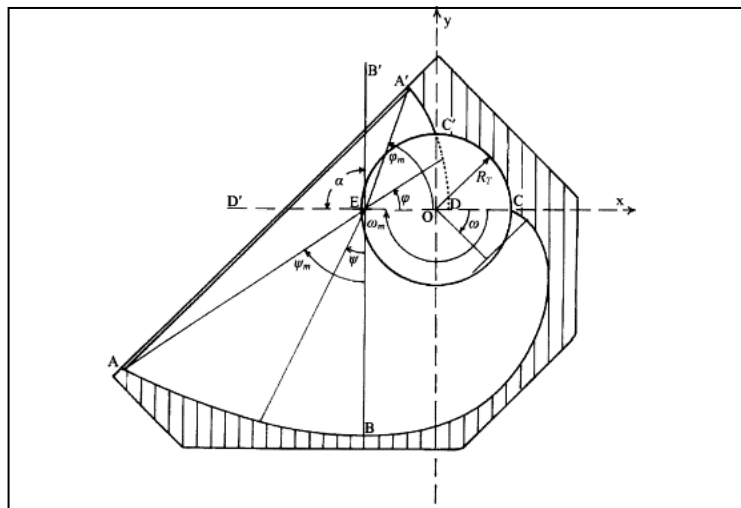
όπου

$D_S$  : το βάθος συστήματος

$A_r$  : η επιφάνεια του απορροφητή που εκτίθεται στην ηλιακή ακτινοβολία

CR : ο λόγος συγκέντρωσης

➤ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΥΠΟΥ ICS-1



Σχήμα 2  
Συλλέκτης ICS – 1

Ο κύριος ανακλαστήρας αποτελείται από το παραβολικό τμήμα (AB) και το εφαπτόμενο (BC) [28]. Το μικρό τμήμα (C'A') του ανακλαστήρα είναι επίσης παραβολικό. Η γωνία εισόδου του συστήματος είναι  $\alpha = 90^\circ$  [28]. Θεωρούμε  $R_T$  και

$D_T = 2 R_T$  την ακτίνα και την διάμετρο αντίστοιχα της κυλινδρικής δεξαμενής αποθήκευσης,  $\omega$  την γωνία που σχηματίζεται από το εφαπτόμενο τμήμα (BC) και  $\psi$ ,  $\Phi$  τις γωνίες των παραβολικών τμημάτων (AB) και (C'A') αντίστοιχα. Τα τμήματα

OC και OE καθορίζουν την μέγιστη γωνία  $\omega$  που στην περίπτωση αυτή ισούται με  $\omega_m = 180^\circ$  [28]. Τα τμήματα EB, EA και ED, EA' καθορίζουν τις μέγιστες γωνίες  $\psi_m$  και  $\Phi_m$  [28].

Η εστιακή απόσταση του τμήματος (AB) είναι

$$f_1 = [BE] = \pi R_T \text{ και η γωνία } \psi_m = 56^\circ \text{ [28].}$$

Τα αντίστοιχα μεγέθη για το τμήμα (C'A') είναι

$$f_2 = [DE] = R_T \sqrt{2} (1 + \cos 45^\circ) / 2 \text{ και } \Phi_m = 70^\circ \text{ [28].}$$

Η γεωμετρία των ανακλαστήρων στο σύστημα αξόνων Oxy είναι:

Παραβολικό τμήμα (AB):

$$\left. \begin{aligned} x &= -R_T [1 + 2\pi \sin \psi / (1 + \cos \psi)] \\ y &= -R_T 2\pi \cos \psi / (1 + \cos \psi) \end{aligned} \right\} \text{ with } 0 \leq \psi \leq \psi_m \quad (1)$$

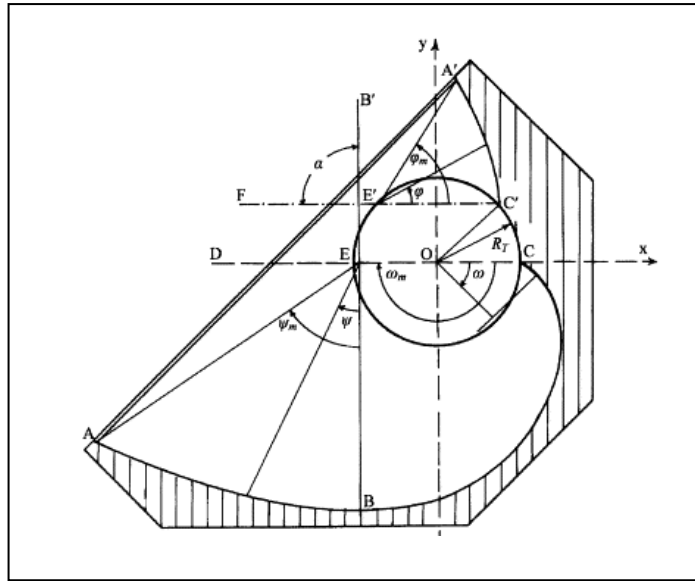
Εφαπτόμενο τμήμα (BC):

$$\left. \begin{aligned} x &= R_T (\cos \omega + \omega \sin \omega) \\ y &= -R_T (\sin \omega - \omega \cos \omega) \end{aligned} \right\} \text{ with } 0 \leq \omega \leq \omega_m \quad (2)$$

Παραβολικό τμήμα (C'A'):

$$\left. \begin{aligned} x &= R_T [-1 + (1 + \sqrt{2}) \cos \varphi / (1 + \cos \varphi)] \\ y &= R_T (1 + \sqrt{2}) \sin \varphi / (1 + \cos \varphi) \end{aligned} \right\} \text{ with } \frac{\pi}{4} \leq \varphi \leq \varphi_m \quad (3)$$

➤ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΥΠΟΥ ICS-2



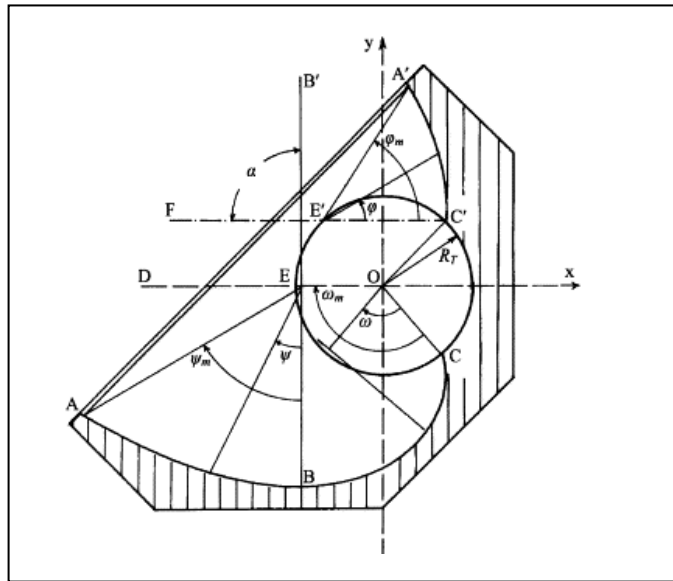
Σχήμα 3  
Συλλέκτης CPC -2

Το μοντέλο αυτό αν και έχει τον ίδιο κύριο ανακλαστήρα με αυτόν του τύπου ICS-1, αποτελείται από ένα μεγαλύτερο κοίλο ανακλαστήρα στην κορυφή του συστήματος, ο οποίος δημιουργεί μεγαλύτερο πλάτος εισόδου  $W_\alpha = [AA']$  [28]. Η γωνία εισόδου  $\alpha$ , η εστιακή απόσταση  $f_1$  και οι γωνίες  $\omega$ ,  $\omega_m$ ,  $\psi$  και  $\psi_m$  είναι ίδια με αυτά του τύπου ICS-1, ενώ η γωνία του άνω παραβολικού τμήματος ( $C'A'$ ) είναι  $\Phi_m = 58^\circ$  [28]. Η εστιακή απόσταση του τμήματος αυτού είναι  $f_2 = [C'E'] = R_T\sqrt{2}$ . Για τα τμήματα ( $AB$ ) και ( $BC$ ), η γεωμετρία στο σύστημα αξόνων  $Oxy$  είναι η ίδια με αυτή της προηγούμενης περίπτωσης, ενώ για το τμήμα ( $C'A'$ ) ισχύει:

Παραβολικό τμήμα ( $C'A'$ ):

$$\left. \begin{aligned} x &= -R_T(\sqrt{2}/2 - 2\sqrt{2} \cos \phi / 1 + \cos \phi) \\ x &= -R_T(\sqrt{2}/2 - 2\sqrt{2} \cos \phi / 1 + \cos \phi) \end{aligned} \right\} \text{ with } 0 \leq \phi \leq \phi_m \quad (4)$$

➤ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΥΠΟΥ ICS-3



Σχήμα 4

Συλλέκτης ICS – 3

Στον τύπο αυτό, ο κύριος ανακλαστήρας είναι μικρότερος σε μήκος και το σύστημα έχει μικρότερο βάθος από των τύπων 1 και 2. Το άνω τμήμα του ανακλαστήρα είναι όμοιο με αυτό του τύπου 2 καθώς επίσης και η γωνία εισόδου  $\alpha$ , και η εστιακή απόσταση του τμήματος ( C' A' ) και οι γωνίες  $\Phi$  και  $\Phi_m$  [28]. Η εστιακή απόσταση του τμήματος ( AB ) είναι  $f_1 = 3\pi R_T / 4$  και  $\psi_m = 58.24^\circ$ ,  $\omega_m = 135^\circ$  [28].

Η γεωμετρία στο σύστημα αξόνων Oxy είναι:

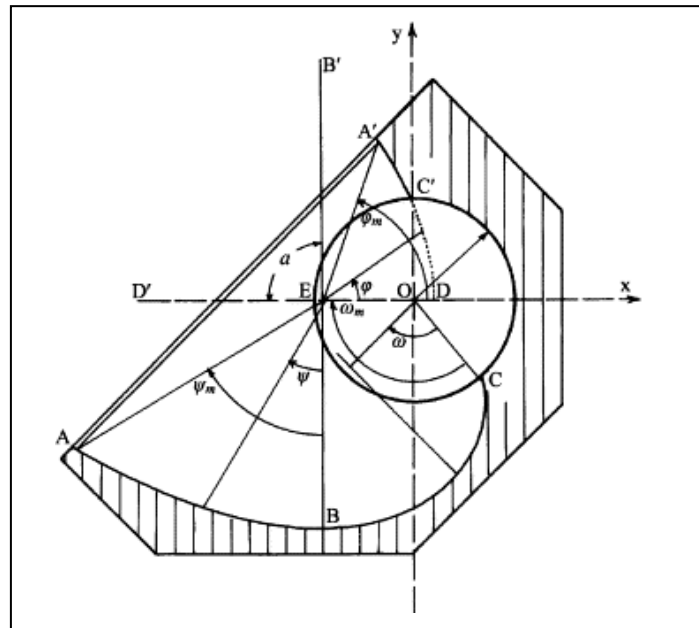
Παραβολικό τμήμα ( AB ):

$$\left. \begin{aligned} x &= -R_T \left[ 1 + (3\pi / 4) \sin\psi / (1 + \cos\psi) \right] \\ y &= -R_T (3\pi / 4) \cos\psi / (1 + \cos\psi) \end{aligned} \right\} \text{ with } 0 \leq \psi \leq \psi_m \quad (5)$$

Εφαπτόμενο τμήμα ( BC ):

$$\left. \begin{aligned} x &= -R_T \left[ \sin(\omega - \frac{\pi}{4}) - \omega \cos(\omega - \frac{\pi}{4}) \right] \\ y &= -R_T \left[ \cos(\omega - \frac{\pi}{4}) + \omega \sin(\omega - \frac{\pi}{4}) \right] \end{aligned} \right\} \text{ with } 0 \leq \omega \leq \omega_m \quad (6)$$

➤ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΥΠΟΥ ICS-4



Σχήμα 5  
Συλλέκτης ICS – 4

Ο τύπος αυτός αποτελείται από έναν μικρό παραβολικό άνω ανακλαστήρα όμοιο με αυτόν του μοντέλου ICS-1. Τα μοντέλα ICS-3 και ICS-4 έχουν μικρότερο βάθος από τα μοντέλα ICS-1 και ICS-2 και ο κύριος ανακλαστήρας του μοντέλου ICS-4 είναι της ίδιας γεωμετρίας με αυτόν του μοντέλου ICS-3. Το μοντέλο ICS-4 έχει το μικρότερο πλάτος ανοίγματος από τα υπόλοιπα και καλύτερη θερμική προστασία.

Η εστιακή απόσταση  $f_1 = [ BE ]$  του κύριου παραβολικού ανακλαστήρα είναι ίδια με αυτήν του μοντέλου ICS-3 και η εστιακή απόσταση  $f_2 = [ DE ]$  του άνω παραβολικού ανακλαστήρα είναι ίδια με αυτήν του μοντέλου ICS-1 [28]. Οι γωνίες  $\psi_m$ ,  $\omega_m$  είναι ίδιες με αυτές του μοντέλου ICS-3 και η  $\Phi_m$  με του μοντέλου ICS-1 [28].

#### ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

Και για τα τέσσερα μοντέλα πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις τόσο κατά την διάρκεια της μέρας όσο και κατά την διάρκεια της νύχτας. Οι ημερήσιες μετρήσεις έγιναν από τις 6:30 έως και 18:30, ενώ οι νυχτερινές από τις 18:30 έως και 6:30 της επόμενης μέρας.

Η μέση ημερήσια αποδοτικότητα υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$\eta_d = m C_p (T_f - T_i) / A_a G_m \quad (7)$$

όπου  $m$ : η μάζα του νερού στην κυλινδρική δεξαμενή [kg],

$$C_p = 4180 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

$G_m$ : η μέση ημερήσια εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία [ $\text{W m}^{-2}$ ]

$T_i$  και  $T_f$ : η αρχική και τελική θερμοκρασία αποθήκευσης του νερού [ $^{\circ}\text{C}$ ].

Μπορούμε επίσης να προσεγγίσουμε την σχέση αυτή με ένα πολυώνυμο δευτέρου βαθμού της μορφής:

$$\eta_d = A + B (\Delta T_{m,D} / G_m) + C (\Delta T_{m,D} / G_m)^2 \quad (8)$$

όπου ο συντελεστής  $A$  αντιστοιχεί στη μέση ημερήσια αποδοτικότητα του συλλέκτη για θερμοκρασία  $(T_i + T_f) / 2 = T_{m,a}$  και οι συντελεστές  $B, C$  στις θερμικές απώλειες κατά την διάρκεια της μέρας.

Επίσης, οι θερμικές απώλειες κατά την διάρκεια της νύχτας υπολογίζονται από την εξίσωση:

$$U_s = (\rho C_p V_T / \Delta t) \ln [ (T_i - T_{m,a}) / (T_f - T_{m,a}) ] \quad (9)$$

Όπου  $V_T$ : ο όγκος του νερού στην δεξαμενή αποθήκευσης

$$\rho C_p = 4180 \text{ kJ m}^{-3} \text{ K}^{-1}$$

$T_{m,a}$ : η μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά την διάρκεια της νύχτας

$\Delta t = t_f - t_i = 43.200 \text{ s}$ : ο χρόνος μεταξύ 18:30 και 6:30.

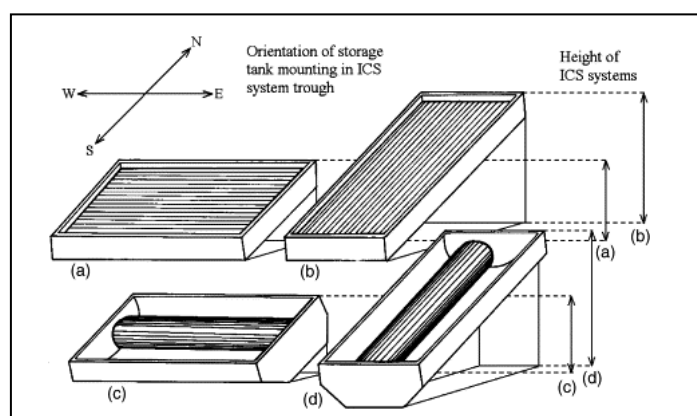


### 3.2.5 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ICS ΜΕ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΚΑΙ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΗΣ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ

#### ΓΕΝΙΚΑ

Στο κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθούμε με συστήματα τύπου ICS οριζόντιας (Ανατολή-Δύση) και κατακόρυφης (Βορράς- Νότος) διάταξης της κυλινδρικής δεξαμενής αποθήκευσης νερού, τα οποία συνδυάζονται με CPC συλλέκτες και κοιλότητες ανακλαστήρων δια εξελιγμένης. Η αύξηση της θερμοκρασίας του νερού στις δεξαμενές αποθήκευσης αποτελεί μέτρο για τον καθορισμό των θερμικών απωλειών, του λόγου  $V_T / A_a$  και του ύψους της δεξαμενής. Η βόρεια-νότια διάταξη μιας δεξαμενής αποθήκευσης συνεπάγεται συσκευές μεγαλύτερου ύψους. Από την άλλη, η οριζόντια διάταξη έχει σαν αποτέλεσμα χαμηλότερα συστήματα, καθιστώντας την εν σειρά σύνδεση των συσκευών ευκολότερη. Ωστόσο, το χαμηλό ύψος της συσκευής συνεπάγεται και χαμηλή στάθμη του νερού αποθήκευσης και λιγότερο αποτελεσματική θερμοκρασία αυτού.

Στο σχήμα 1 απεικονίζονται η μπροστινή όψη και το ύψος των προαναφερθέντων συλλεκτών με επίπεδη (a,b) και κυλινδρική (c,d) δεξαμενή αποθήκευσης. Τα σχήματα a και c αντιστοιχούν σε οριζόντια διάταξη της δεξαμενής και τα σχήματα b και d σε κατακόρυφη.

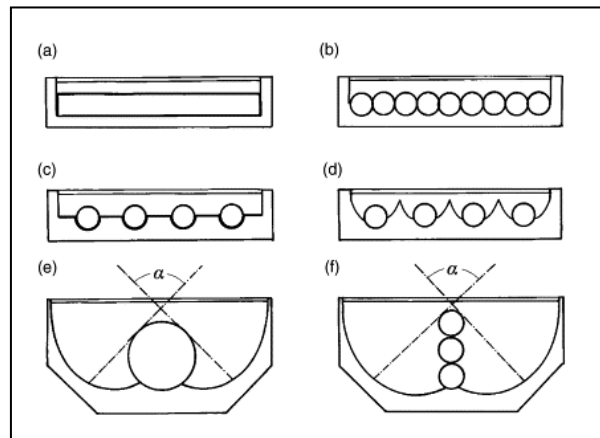


Σχήμα 1

Οριζόντια και κατακόρυφη διάταξη κυλινδρικής δεξαμενής αποθήκευσης

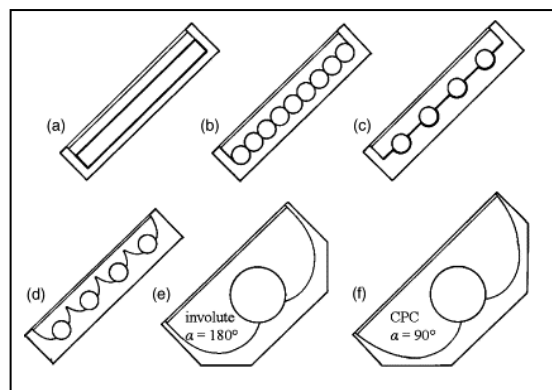
Στο σχήμα 2 απεικονίζονται έξι συστήματα σε τομή με κατακόρυφη διάταξη δεξαμενής. Το σχήμα 2a απεικονίζει έναν συλλέκτη με επίπεδη δεξαμενή αποθήκευσης, το 2b με δεξαμενή που αποτελείται από μεγάλο αριθμό σωλήνων (δεν είναι πολύ πρακτική λόγω του μεγάλου ύψους και κόστους), ενώ τα 2e και 2f

χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερο βάθος, στους οποίους οι σωληνοειδείς απορροφητές έχουν σχεδόν εξαφανιστεί με αποτέλεσμα υψηλότερη θερμοκρασία του νερού αποθήκευσης.



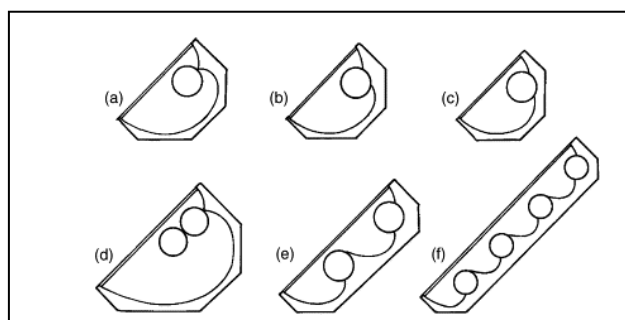
Σχήμα 2  
Τομές συστημάτων με κατακόρυφη διάταξη δεξαμενής

Στο σχήμα 3 απεικονίζονται τα αντίστοιχα συστήματα με του σχήματος 2 αλλά σε επίπεδη διάταξη. Η διαφορά αυτών έγκειται στο ύψος του συλλέκτη.



Σχήμα 3  
Τομές συστημάτων με επίπεδη διάταξη δεξαμενής

Το σχήμα 4 απεικονίζει έξι εναλλακτικούς τύπους συλλεκτών που βασίζονται στην οριζόντια διάταξη της δεξαμενής αποθήκευσης και ασύμμετρους CPC ανακλαστήρες οι οποίοι συντελούν στην καλύτερη διατήρηση της θερμότητας από τους αντίστοιχους συμμετρικούς ανακλαστήρες.



Σχήμα 4  
Εναλλακτικοί τύποι συλλεκτών οριζόντιας διάταξης δεξαμενής

### ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

Για το σχεδιασμό, θεωρούμε δυο είδη διάταξης, οριζόντιο και κατακόρυφο, όπως ήδη προαναφέρθηκε και δυο είδη συμμετρικών ανακλαστήρων, δια εξελεγμένης και τύπου CPC. Οι ανακλαστήρες δια εξελεγμένης χρησιμοποιούνται στην κατακόρυφη διάταξη, ενώ οι CPC στην οριζόντια [33]. Με αυτό τον τρόπο, δημιουργούνται τέσσερα πειραματικά μοντέλα, τα ICS-1H, ICS-1V, ICS-2H, ICS-2V. Ο αριθμός 1 αντιστοιχεί σε ανακλαστήρα δια εξελεγμένης, ο 2 σε CPC, ενώ το γράμμα Η σε οριζόντια διάταξη και το V σε κατακόρυφη. Και τα έξι συστήματα έχουν κατασκευαστεί με κυλινδρική δεξαμενή αποθήκευσης διαμέτρου  $D_T = 0.26 \text{ m}$  και μήκους  $L_T = 1.01 \text{ m}$ , τα οποία δημιουργούν όγκο αποθηκευμένου νερού ίσο με  $V_T = 53.61$  [33]. Στον πίνακα 1 συγκεντρώσαμε όλες τις παραμέτρους των υπό μελέτη μοντέλων.

Πίνακας 1  
Τιμές παραμέτρων

System	$W_\alpha$ (m)	$L_\alpha$ (m)	$A_\alpha$ (m <sup>2</sup> )	$A_r$ (m <sup>2</sup> )	$D_S$ (m)	$V_T$ (l)	$V_T/A_\alpha$ (lm <sup>-2</sup> )	CR
ICS-1 (INV)	0,589	0,99	0,583	0,607	0,312	53,6	91,9	0,96
ICS-2 (CPC)	0,679	0,99	0,672	0,607	0,312	53,6	79,8	1,11

όπου

$W_\alpha$  : το πλάτος εισόδου

$L_\alpha$  : το μήκος εισόδου

$A_\alpha$  : η διατομή εισόδου

$A_r$  : η εκτεθειμένη διατομή στην ηλιακή ακτινοβολία

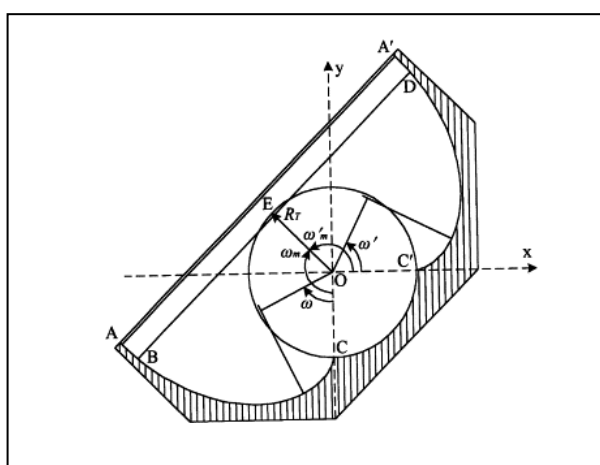
$D_s$  : το βάθος συστήματος

$V_T / A_a$  : ο λόγος όγκου νερού ανά διατομή εισόδου

$CR = A_a / A_r$  : ο λόγος συγκέντρωσης.

### ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΜΕ ΑΝΑΚΛΑΣΤΗΡΑ ΔΙΑ ΕΞΕΛΙΓΜΕΝΗΣ

Το σχήμα 5 απεικονίζει το πειραματικό μοντέλο ICS-1H το οποίο έχει την ίδια γεωμετρία με το ICS-1V.



Σχήμα 5  
Πειραματικό μοντέλο ICS – 1H

Στο μοντέλο ICS-1H η είσοδος του νερού είναι στο κάτω μέρος της μιας πλευράς της οριζόντιας δεξαμενής αποθήκευσης και η έξοδος του στην κορυφή της άλλης πλευράς. Στο μοντέλο ICS-1V η είσοδος του νερού βρίσκεται στο κάτω μέρος της κατακόρυφης δεξαμενής και η έξοδος του νερού στο πάνω μέρος της.

Ο σχεδιασμός των ανακλαστήρων των δυο αυτών μοντέλων αποτελείται από δυο τμήματα δια εξελιγμένης ( BC ) και ( C'D ) και δυο παράλληλα γραμμικά τμήματα ( AB ) και ( DA' ). Η κυλινδρική δεξαμενή αποθήκευσης είναι κατά 1/4 θερμικά μονωμένη και τα δυο τμήματα δια εξελιγμένης είναι συνάρτηση της ακτίνας  $R_T$  και των γωνιών  $\omega$  και  $\omega'$  αντίστοιχα, οι οποίες ορίζουν μια γωνία εισόδου ίση με  $\alpha = 180^\circ$  [33]. Τα τμήματα OC και OE καθορίζουν την μέγιστη γωνία  $\omega$  ίση με  $\omega_m=135^\circ$  [33]. Οι ανακλαστήρες δια εξελιγμένης έχουν λόγο συγκέντρωσης  $CR =$

1, η γωνία εισόδου της καμπύλης δια εξελεγμένης είναι  $\alpha = 180^\circ$  και το αντίστοιχο εύρος εισόδου  $[AA'] = [BD] = W_\alpha = 2 \omega_m R_T$  [33].

Οι εξισώσεις που διέπουν τον ανακλαστήρα σε συνάρτηση με το ορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων O,x,y δίνονται παρακάτω [33] :

➤ Γραμμικό τμήμα (AB)

$$y = -x - \frac{3\pi\sqrt{2}}{4}R_T \text{ with } -2.52R_T \leq x \leq -2.37R_T \quad (1)$$

➤ Τμήμα δια εξελεγμένης (BC)

$$\left. \begin{aligned} x &= -R_T (\sin\omega - \omega \cos\omega) \\ y &= -R_T (\cos\omega + \omega \sin\omega) \end{aligned} \right\} \text{ with } 0 \leq \omega \leq \omega_m \quad (2)$$

➤ Τμήμα δια εξελεγμένης (C'D)

$$\left. \begin{aligned} x &= R_T (\cos\omega' + \omega' \sin\omega') \\ y &= R_T (\sin\omega' - \omega' \cos\omega') \end{aligned} \right\} \text{ with } 0 \leq \omega' \leq \omega'_m \quad (3)$$

➤ Γραμμικό τμήμα (DA')

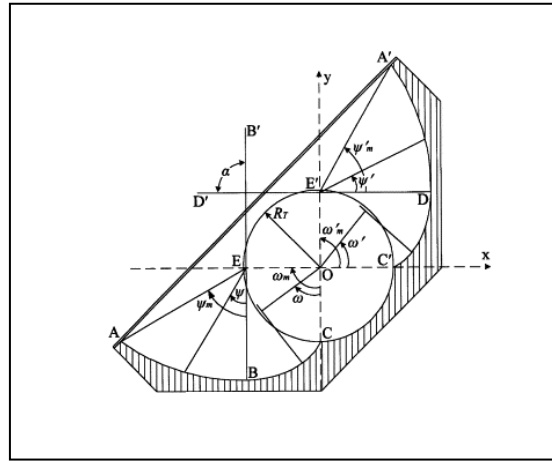
$$y = -x + \frac{3\pi\sqrt{2}}{4}R_T \text{ with } 0.82R_T \leq x \leq 0.96R_T \quad (4)$$

Ο λόγος συγκέντρωσης των μοντέλων αυτών είναι ίσος με  $CR=0.96$  [33] .

#### *ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΜΕ ΑΝΑΚΛΑΣΤΗΡΑ CPC*

Στο σχήμα 6 απεικονίζεται το πειραματικό μοντέλο ICS-2H, του οποίου η γεωμετρία είναι όμοια με αυτή του ICS-2V. Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, τα δυο συστήματα έχουν είσοδο και έξοδο νερού στο κάτω μέρος και στην κορυφή της δεξαμενής αποθήκευσης αντίστοιχα. Η χρήση CPC ανακλαστήρων συνεισφέρει σε

μεγαλύτερο πλάτος εισόδου από αυτό των προηγούμενων μοντέλων, με  $\alpha < 180^\circ$  και  $CR > 1$  [33]. Οι ανακλαστήρες αυτοί αποτελούνται από τα παραβολικά τμήματα (AB) και (AD') και από τα τμήματα δια εξελιγμένης (BC) και (C'D), ενώ η γωνία εισόδου είναι  $\alpha = 90^\circ$  και  $CR = 1.11$ [33]. Οι δυο παραβολές έχουν εστιακή απόσταση  $f_1 = [BE] = f_2 = [DE'] = \pi R_T / 2$ [33].



Σχήμα 6  
Πειραματικό μοντέλο

Οι γωνίες  $\psi$  και  $\psi'$  αντιστοιχούν στις γωνίες του παραβολικού μέρους του ανακλαστήρα και οι  $\omega$ ,  $\omega'$  στα τμήματα δια εξελιγμένης με μέγιστες τιμές αυτών  $\omega_m = \omega'_m = 90^\circ$  και  $\psi_m = \psi'_m = 58.78^\circ$  [33]. Οι εξισώσεις που διέπουν την γεωμετρία των CPC ανακλαστήρων στο ορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων O,x,y είναι οι εξής:

➤ Παραβολικό τμήμα (AB):

$$\left. \begin{aligned} x &= -R_T \left[ 1 + \pi \sin\psi / (1 + \cos\psi) \right] \\ y &= -R_T \pi \cos\psi / (1 + \cos\psi) \end{aligned} \right\} \text{ with } 0 \leq \psi \leq \psi_m \quad (5)$$

➤ Τμήμα δια εξελιγμένης (BC):

$$\left. \begin{aligned} x &= -R_T (\sin\omega - \omega \cos\omega) \\ y &= -R_T (\cos\omega + \omega \sin\omega) \end{aligned} \right\} \text{ with } 0 \leq \omega \leq \omega_m \quad (6)$$

➤ Τμήμα δια εξελεγμένης (C'D):

$$\left. \begin{aligned} x &= R_T (\cos\omega' + \omega' \sin\omega') \\ y &= R_T (\sin\omega' - \omega' \cos\omega') \end{aligned} \right\} \text{ with } 0 \leq \omega' \leq \omega'_m \quad (7)$$

➤ Παραβολικό τμήμα (DA'):

$$\left. \begin{aligned} x &= R_T \pi \cos\psi' / (1 + \cos\psi') \\ y &= R_T [1 + \pi \sin\psi' / (1 + \cos\psi')] \end{aligned} \right\} \text{ with } 0 \leq \psi' \leq \psi'_m \quad (8)$$

### ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Σκοπός των πειραμάτων είναι να προσεγγίσουμε τις παρακάτω παραμέτρους:

- Τη θερμοκρασιακή μεταβολή του νερού στην αποθηκευτική δεξαμενή κάθε συστήματος.
- Την μέση ημερήσια αποδοτικότητα  $\eta_d$  των συστημάτων.
- Τον συντελεστή θερμικών απωλειών  $U_s$ .

### *ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΜΕΣΗ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ*

Η μέση ημερήσια αποδοτικότητα  $\eta_d$  υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\eta_d = M C_p (T_f - T_i) / A_a G_m \quad (9)$$

όπου

$M$  : η μάζα του νερού στην κυλινδρική δεξαμενή [ kg ]

$C_p$  : ο συντελεστής θερμότητας του νερού  $C_p = 4180 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$

$T_i$  και  $T_f$  : η αρχική και τελική θερμοκρασία αντίστοιχα του αποθηκευμένου νερού

$G_m$  : η μέση ημερήσια εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία από τις 6:30 έως στις 18:30.

Η μέση ημερήσια αποδοτικότητα  $\eta_d$  σε συνάρτηση με τον λόγο  $\Delta T_{m,D} / G_m$  όπου

$\Delta T_{m,D} = (T_i + T_f) / 2 - T_{a,m}$  και  $T_{a,m}$  η μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά

την διάρκεια της μέρας δίνεται από το παρακάτω πολυώνυμο δευτέρου βαθμού:

$$\eta_d = A + B (\Delta T_{m,D} / G_m) + C (\Delta T_{m,D} / G_m)^2 \quad (10)$$

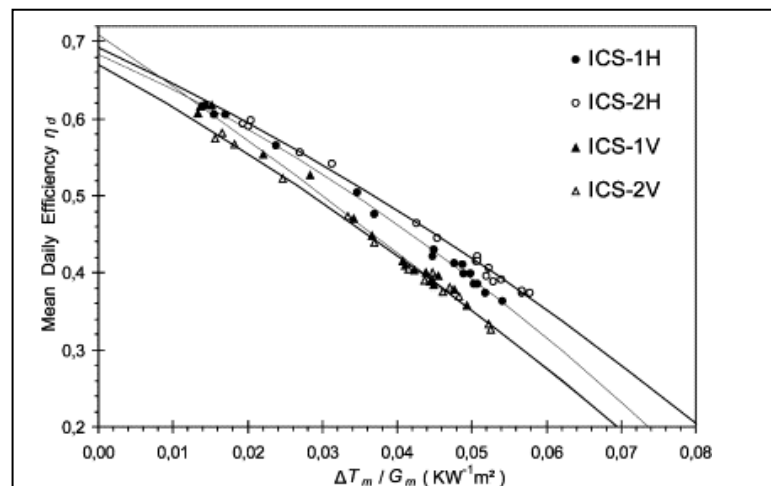
Ο συντελεστής  $A$  αντιστοιχεί στην μέση ημερήσια αποδοτικότητα του συστήματος στην περίπτωση όπου  $(T_i + T_f) / 2 = T_{a,m}$  και οι συντελεστές  $B, C$  στις θερμικές απώλειες του συστήματος στην διάρκεια της μέρας.

Κατόπιν μετρήσεων [33], καταλήγουμε στις τιμές που αναγράφονται στον πίνακα 2.

Πίνακας 2  
Βαθμοί απόδοσης για κάθε συλλέκτη

System	Mean daily efficiency $\eta_d$
ICS-1H	$\eta_d = 0.68 - 4.29 (\Delta T_{m,D} / G_m) - 30.91 (\Delta T_{m,D} / G_m)^2$
ICS-2H	$\eta_d = 0.69 - 4.45 (\Delta T_{m,D} / G_m) - 20.43 (\Delta T_{m,D} / G_m)^2$
ICS-1V	$\eta_d = 0.71 - 6.73 (\Delta T_{m,D} / G_m) - 8.84 (\Delta T_{m,D} / G_m)^2$
ICS-2V	$\eta_d = 0.67 - 5.44 (\Delta T_{m,D} / G_m) - 18.91 (\Delta T_{m,D} / G_m)^2$

και σχεδιάζουμε τις καμπύλες των μοντέλων στο σχήμα 7.



Σχήμα 7  
Μέσοι ημερήσιοι βαθμοί απόδοσης



## ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ

Υπολογίζουμε τον συντελεστή θερμικών απωλειών  $U_s$  με βάση την εξίσωση:

$$U_s = (\rho C_p V_T / \Delta t) \ln [ (T_i - T_{a,m}) / (T_f - T_{a,m}) ] \quad (11)$$

όπου

$V_T$  : ο όγκος του αποθηκευμένου νερού

$$\rho C_p = 4180 \text{ kJm}^{-3}\text{K}^{-1}$$

$T_{a,m}$ : η μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά την διάρκεια της νύχτας

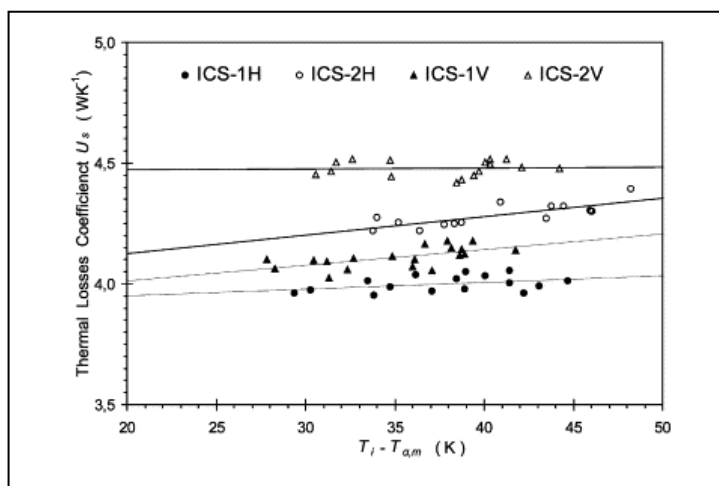
$\Delta t = t_f - t_i = 43200 \text{ s}$  ο χρόνος μεταξύ 18:30 ( $t_i$ ) και 6:30 ( $t_f$ ) της επόμενης ημέρας.

Κατόπιν μετρήσεων [33], καταλήγουμε στις τιμές που αναγράφονται στον πίνακα 3.

Πίνακας 3  
Συντελεστές θερμικών απωλειών

System	Thermal losses coefficient $U_s$ ( $\text{WK}^{-1}$ )	Thermal losses coefficient per aperture area $U_{s,\alpha}$ ( $\text{WK}^{-1}\text{m}^{-2}$ )
ICS-1H	$U_s = 3.894 + 0.0028 \Delta T_{m,N}$	$U_{s,\alpha} = 6.352 + 0.0046 \Delta T_{m,N}$
ICS-2H	$U_s = 3.973 + 0.0076 \Delta T_{m,N}$	$U_{s,\alpha} = 5.627 + 0.0108 \Delta T_{m,N}$
ICS-1V	$U_s = 3.881 + 0.0065 \Delta T_{m,N}$	$U_{s,\alpha} = 6.331 + 0.0106 \Delta T_{m,N}$
ICS-2V	$U_s = 4.464 + 0.0004 \Delta T_{m,N}$	$U_{s,\alpha} = 6.323 + 0.0006 \Delta T_{m,N}$

και σχεδιάζουμε τις καμπύλες των μοντέλων στο σχήμα 8.



Σχήμα 8  
Συντελεστές θερμικών απωλειών

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην οριζόντια διάταξη της δεξαμενής αποθήκευσης, περισσότερο από το 50% της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας απορροφάται από το πάνω μισό μέρος της κυλινδρικής επιφάνειας, επιφέροντας σημαντική αύξηση του αποθηκευμένου νερού που βρίσκεται στο πάνω μέρος. Μετά την δύση του ήλιου, μειώνεται η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ του πάνω και κάτω μέρους του αποθηκευμένου νερού, που πραγματοποιήθηκε κατά την διάρκεια της ημέρας.

Στην κατακόρυφη διάταξη της δεξαμενής, η μεταβλητή πυκνότητα του νερού επηρεάζει την θερμοκρασιακή διαστρωμάτωση του νερού, με το θερμότερο νερό στο πάνω μέρος του συστήματος και το ψυχρότερο στο κάτω. Κατά την διάρκεια της νύχτας, η πτώση της θερμοκρασίας είναι πιο αισθητή στο πάνω μέρος του συστήματος, συνέπεια του οποίου είναι να μειωθεί η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των άκρων της δεξαμενής αποθήκευσης. Η μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ του πάνω και του κάτω μέρους του συστήματος έχει σαν αποτέλεσμα την διατήρηση της θερμοκρασιακής διαστρωμάτωσης για περισσότερο διάστημα από αυτή των συστημάτων με οριζόντια διάταξη δεξαμενής.

Η χρήση ανακλαστήρων δια εξελεγμένης θεωρείται αποτελεσματική και για την οριζόντια και την κατακόρυφη διάταξη όσον αφορά την διατήρηση της θερμότητας κατά την διάρκεια της νύχτας, ενώ οι ανακλαστήρες τύπου CPC είναι πιο αποτελεσματικοί για την οριζόντια διάταξη.

## **4. ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΑ ΠΙΑΤΑ**

### 4.1 ΤΥΠΙΚΟ ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΟ ΠΙΑΤΟ

#### ΓΕΝΙΚΑ

Χαρακτηριστικό των συστημάτων αυτών αποτελεί το τεράστιο παραβολοειδές πιάτο, το οποίο είναι της μορφής δορυφορικού πιάτου. Σκοπός του αποτελεί η συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας σε ένα μόνο σημείο πάνω από το πιάτο, όπου ο δέκτης αιχμαλωτίζει την θερμότητα και την μετατρέπει σε ωφέλιμη μορφή ενέργειας. συνήθως, το πιάτο συνδυάζεται με μια μηχανή Stirling ή και με ατμοπαραγωγό.

Το σύστημα αυτό υπερτερεί στο ότι μπορεί να επιτύχει μεγάλες θερμοκρασίες, εξαιτίας του μεγάλου συντελεστή συγκέντρωσης. Ωστόσο, απαιτεί μετακινούμενα μέρη έτσι ώστε να ανιχνεύει την ηλιακή ακτινοβολία με αποτέλεσμα η παρουσία της βαριάς μηχανής να καθιστά αναγκαία την στήριξη του συστήματος από ένα στιβαρό πλαίσιο. Τέλος, χρησιμοποιούνται παραβολικοί ανακλαστήρες έναντι επίπεδων, συνέπεια του οποίου είναι ο προσανατολισμός να είναι διπλού άξονα.



Σχήμα 1  
Παραβολικό πιάτο

## **5. ΠΥΡΓΟΙ ΙΣΧΥΟΣ**

Στα συστήματα πύργων ισχύος, υπάρχει ένα πεδίο ηλιοστατών, το οποίο είναι προσανατολισμένο κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να ανακλάται η μέγιστη δυνατή ακτινοβολία και να διοχετεύεται σε έναν δέκτη που βρίσκεται τοποθετημένος στην κορυφή του πύργου. Η θερμότητα τότε μεταφέρεται στο εργαζόμενο μέσο, το οποίο μετατρέπεται σε ατμό και τελικά σε ηλεκτρισμό μέσω γεννήτριας.

Τα βασικά μέρη της τεχνολογίας των πύργων ισχύος είναι τα εξής:

- Οι ηλιοστάτες, σκοπός των οποίων αποτελεί η συγκέντρωση της ακτινοβολίας και η διοχέτευσή της στον δέκτη. Αποτελούνται από μια ανακλαστική επιφάνεια (συνήθως από γυαλί), ένα σύστημα στήριξης καθώς επίσης και από ένα μηχανισμό παρακολούθησης του ηλίου, ο οποίος ενεργοποιείται κατά την διάρκεια της μέρας και απενεργοποιείται την νύχτα ή σε περίπτωση νεφοσκεπών συνθηκών.
- Τον δέκτη, ο οποίος μεταφέρει την θερμότητα που λαμβάνει, στο εργαζόμενο μέσο.
- Τον πύργο, ο οποίος χρησιμεύει στο να προσδίδει ύψος στο σύστημα έτσι ώστε να αποφεύγονται προβλήματα σκίασης.

Κατά την διάρκεια της μελέτης εγκατάστασης ενός τέτοιου συστήματος, είναι αναγκαίο να δίνεται μεγάλη προσοχή στα ακόλουθα:

- Η τοποθεσία να είναι όσο το δυνατόν πιο επίπεδη.
- Απαιτείται νερό έτσι ώστε να ψύχεται ο πύργος.

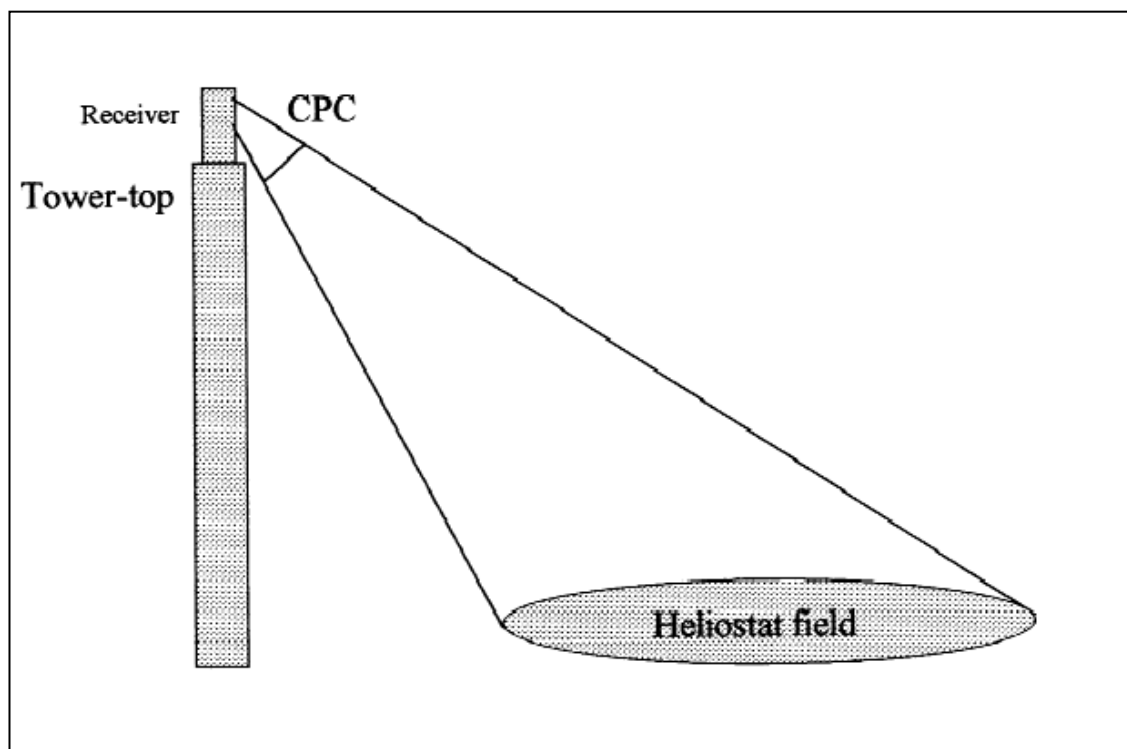
## 5.1 ΠΥΡΓΟΣ ΙΣΧΥΟΣ ΜΕ ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝΤΑ ΑΝΑΚΛΑΣΤΗ

### ΓΕΝΙΚΑ

Εξαιτίας του γεγονότος ότι ένα μεγάλο ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας διαφεύγει ανεκμετάλλευτο, προκύπτει ως επιτακτική ανάγκη η χρησιμοποίηση ενός δευτερεύοντα συλλέκτη (συνήθως τύπου CPC). Ο συλλέκτης αυτός είναι τοποθετημένος στο άνοιγμα του δέκτη και γίνεται ιδιαίτερα αποδοτικός όταν η θερμοκρασία στον δέκτη είναι πάνω από 1000K [39]. Η τοποθέτηση μπορεί να γίνει κατά δύο τρόπους: είτε στο πάνω μέρος του πύργου, είτε στην βάση του.

### ΔΟΜΗ

α) Συλλέκτης τοποθετημένος στο επάνω μέρος του πύργου



Σχήμα 1

Σχηματική απεικόνιση δευτερεύοντα συλλέκτη τοποθετημένου στην κορυφή του πύργου

Από το σχήμα 1 είναι φανερό ότι οι ηλιοστάτες οι οποίοι διαδραματίζουν ουσιαστικό ρόλο στην διοχέτευση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι αυτοί που βρίσκονται στο ελλειπτικό τμήμα που σχηματίζεται από την τομή του κωνικού άξονα του συλλέκτη

και ενός επίπεδου άξονα παράλληλου με το έδαφος [37]. Επίσης, ο συλλέκτης είναι τοποθετημένος με κλίση έτσι ώστε να μεγιστοποιείται η απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας.

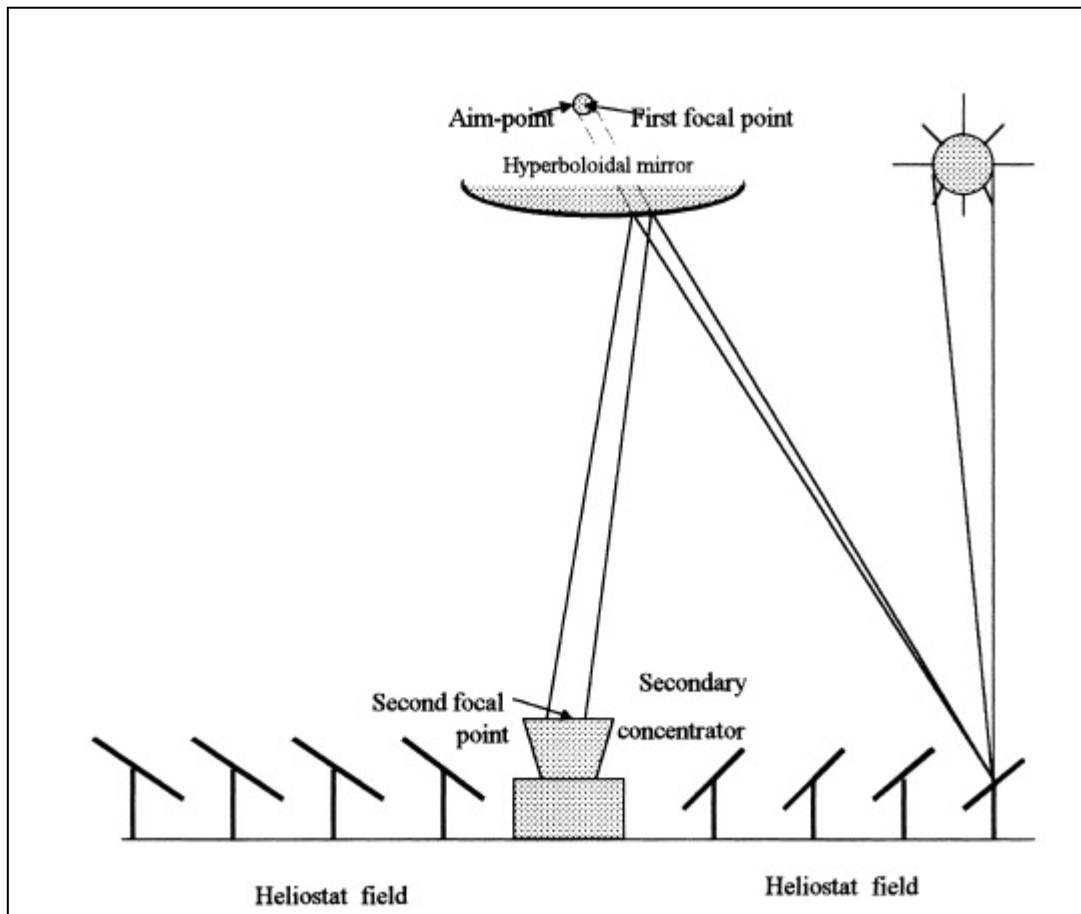
*β) Συλλέκτης τοποθετημένος στο κάτω μέρος του πύργου*

Από την άλλη πλευρά η τοποθέτηση του συλλέκτη στην βάση του πύργου υπερτερεί στα παρακάτω σημεία:

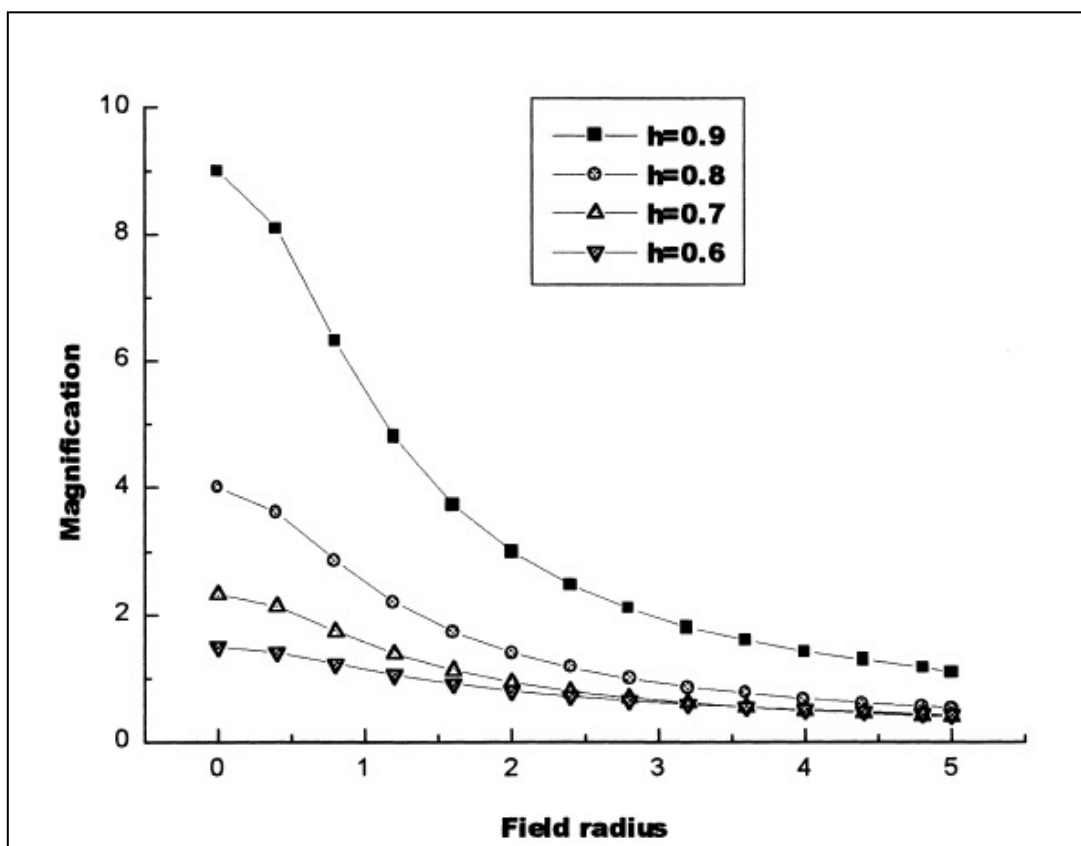
- Στην πράξη, ένας πύργος έχει μικρό ύψος σε σχέση με την ακτίνα του πεδίου ηλιοστατών, με αποτέλεσμα η τοποθέτηση του συλλέκτη να μην είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική [37].
- Ο δευτερεύοντας συλλέκτης δέχεται ακτινοβολία από ένα μικρό μόνο μέρος των ηλιοστατών (αυτών που βρίσκονται μέσα στο ελλειπτικό τμήμα όπως προαναφέρθηκε), συνέπεια του οποίου είναι να απαιτούνται πολυάριθμοι δευτερεύοντες συλλέκτες τοποθετημένοι σε διάφορα σημεία του πεδίου έτσι ώστε να εκμεταλλεύονται την ηλιακή ακτινοβολία από όλους τους ηλιοστάτες. Βέβαια, αυτό χωλαίνει στο γεγονός ότι κάθε επιμέρους συλλέκτης θα επιτυγχάνει μέγιστη απόδοση σε διαφορετική ώρα της μέρας, δημιουργώντας θερμική ανισορροπία στο σύστημα [37].
- Το προστιθέμενο βάρος στο πάνω μέρος του πύργου επιβαρύνει τον ήδη βαρύ μηχανισμό και καθιστά πολύ ακριβή την κατασκευή του.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 2, ένας ανακλαστής τοποθετείται στην κορυφή του πύργου, ανακατευθύνοντας την ηλιακή ακτινοβολία στο κάτω μέρος του πύργου, όπου βρίσκεται ο δέκτης.

Εξαιτίας της ύπαρξης του ανακλαστή, η εικόνα του ηλίου παρουσιάζεται μεγεθυμένη (σχήμα 3), συνέπεια του οποίου είναι ο συλλέκτης να χαρακτηρίζεται από υψηλούς λόγους συγκέντρωσης [39]. Με τον όρο μεγέθυνση του ηλίου εννοούμε τον λόγο της διαμέτρου της εικόνας στον συλλέκτη προς την διάμετρο της εικόνας στον ανακλαστήρα. Είναι ευνόητο ότι η μεγέθυνση θα μειώνεται με ταυτόχρονη αύξηση του πεδίου των ηλιοστατών (σχήμα 4) ή με την προς τα κάτω μετακίνηση του ανακλαστήρα. Η μετακίνηση του ανακλαστήρα όμως προς τα κάτω συνεπάγεται αύξηση του μεγέθους του.

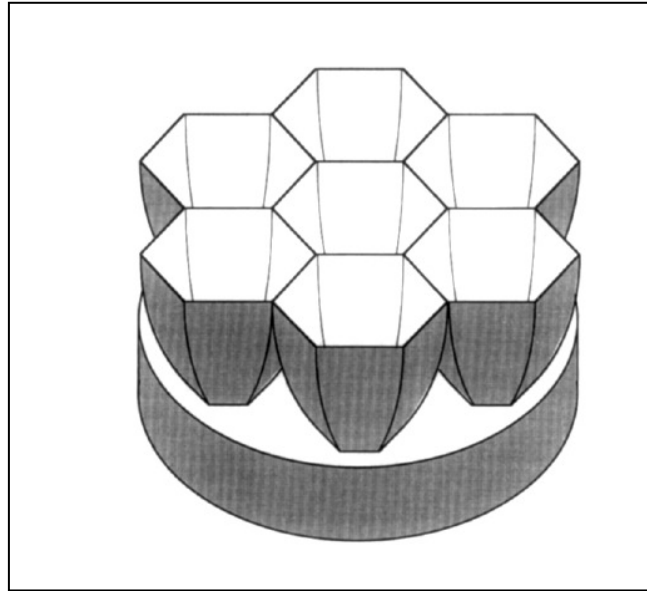


Σχήμα 3  
Μεγέθυνση εικόνας ηλίου



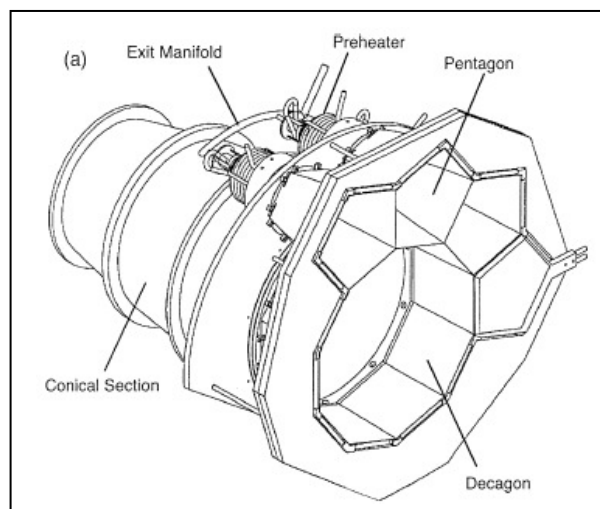
Σχήμα 4  
Μεγέθυνση σε συνάρτηση με ακτίνα του πεδίου

Η ύπαρξη ενός μόνο συλλέκτη για την απορρόφηση του συνολικού ποσού της ενέργειας οδηγεί σε πολύ μεγάλο άνοιγμα διατομής, άρα και σε μεγάλες θερμικές απώλειες. Λύση στο πρόβλημα αυτό αποτελεί η τοποθέτηση περισσότερων επιμέρους συλλεκτών, στους οποίους η απορρόφηση της ενέργειας θα διαμοιράζεται [39]



Σχήμα 5  
Επιμέρους δευτερεύοντες συλλέκτες

Μια άλλη λύση είναι ο τμηματικός διαχωρισμός του συλλέκτη, έτσι ώστε το εργαζόμενο μέσο να θερμαίνεται βαθμιαία και να επιτυγχάνει την μέγιστη θερμοκρασία του προς το τέλος του συλλέκτη, μειώνοντας κατά αυτόν τον τρόπο σημαντικά το ποσοστό απωλειών [40].



Σχήμα 6  
Τμηματικός διαχωρισμός συλλέκτη

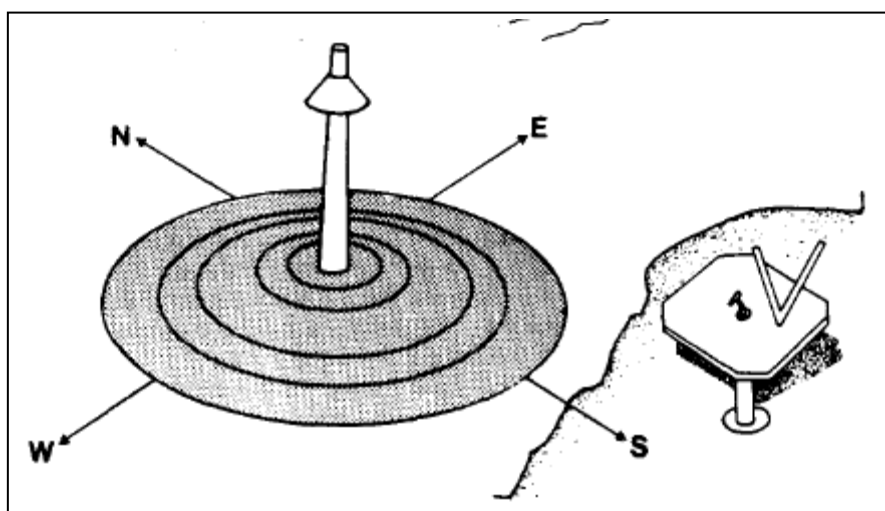


## 5.2 ΠΥΡΓΟΣ ΙΣΧΥΟΣ ΜΕ ‘ΤΕΡΜΑΤΙΚΟ’ ΣΥΛΛΕΚΤΗ

### ΓΕΝΙΚΑ

Για να μεγιστοποιηθεί ο βαθμός απόδοσης των πύργων ισχύων, απαιτείται μεγιστοποίηση των λόγων συγκέντρωσης, όπως έχει εξηγηθεί και σε προηγούμενη ενότητα. Αυτό πραγματοποιείται με χρήση του ανακλαστήρα, ο οποίος ανακλά την ακτινοβολία στον συλλέκτη. Στην παράγραφο αυτή, παρουσιάζεται ένας δέκτης κωνικού σχήματος, στο κάτω μέρος του οποίου τοποθετείται συλλέκτης, ο οποίος αναφέρεται ως τερματικός.

### ΔΟΜΗ



Σχήμα 1  
Τερματικός συλλέκτης

Σε αυτό το σύστημα, κάθε ηλιοστάτης είναι προσανατολισμένος έτσι ώστε το κάτω μέρος της ανακλώμενης ακτίνας να διέρχεται από τη διατομή εισόδου του ανακλαστή, ενώ η υπόλοιπη ακτινοβολία να αγγίζει τον κωνικό ανακλαστή και να ανακλάται πίσω [41]. Η επαπτόμενη γωνία ορίζει το μέγεθος του πεδίου, μέσα στο οποίο οι ηλιοστάτες διοχετεύουν την ακτινοβολία στον συλλέκτη, χωρίς να την ανακλούν πίσω στην ατμόσφαιρα. Με κατάλληλη γωνία, είναι δυνατόν ο λόγος συγκέντρωσης να αυξηθεί έως και τέσσερις φορές. Τέλος, επειδή το σύστημα σχεδιάζεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να μην χάνεται μεγάλο ποσό ακτινοβολίας, οι απώλειες είναι ελάχιστες.

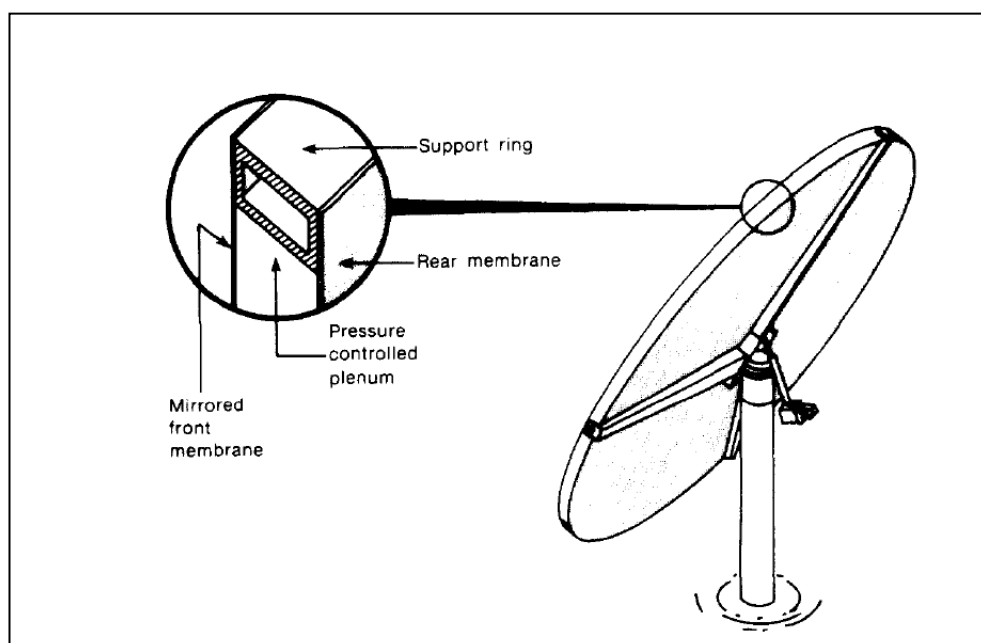
### 5.3 ΠΥΡΓΟΣ ΙΣΧΥΟΣ ΜΕ ΗΛΙΟΣΤΑΤΕΣ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ

#### ΓΕΝΙΚΑ

Για την κατασκευή ενός ηλιακού πάρκου, το οποίο να παράγει ισχύ της τάξης των 100 MW απαιτούνται χιλιάδες ηλιοστάτες, με αποτέλεσμα το κόστος αυτών να γίνεται ιδιαίτερα υψηλό. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα, οι προσπάθειες να στραφούν στην κατασκευή απλούστερων τύπων ηλιοστατών, οι οποίοι να έχουν μεγάλη αποδοτικότητα και διάρκεια ζωής. Ένας τέτοιος τύπος ηλιοστάτη είναι και ο ηλιοστάτης μεμβράνης.

#### ΔΟΜΗ

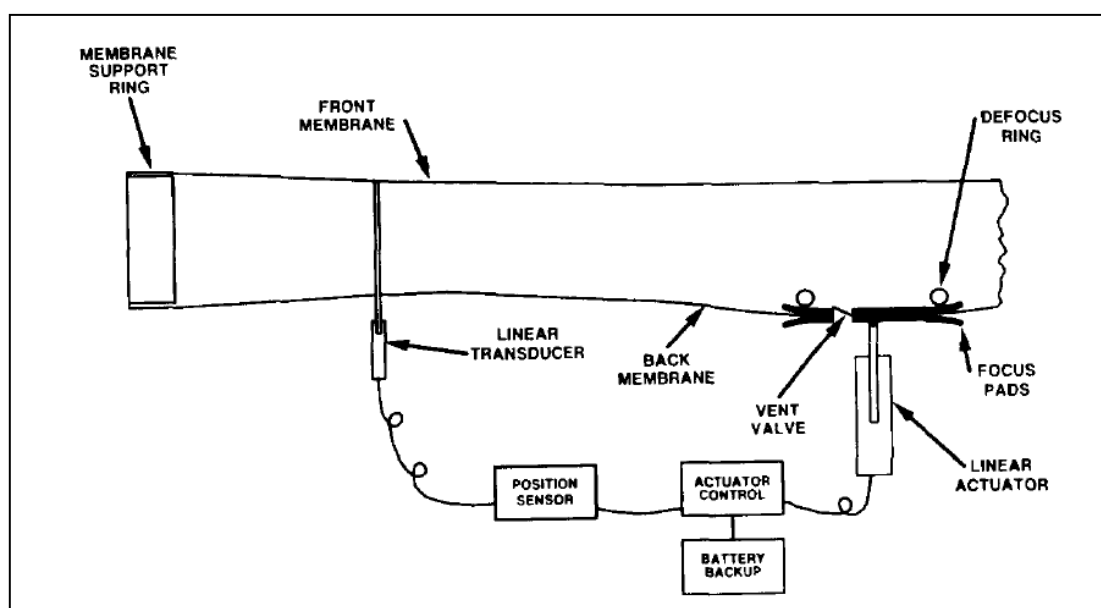
Οι ηλιοστάτες αυτοί διαφέρουν από τους συμβατικούς ηλιοστάτες οι οποίοι κατασκευάζονται από γυαλί, στο ότι η επιφάνειά τους είναι ένα τεντωμένο μεταλλικό φύλλο τοποθετημένο γύρω από ένα τεράστιο δακτύλιο στήριξης. Η μπροστινή επιφάνεια της μεμβράνης επικαλύπτεται με ένα υλικό υψηλής ανακλαστικότητας, έτσι ώστε να διαδραματίζει το ρόλο του καθρέπτη [44]. Για να προσδοθεί ένα κοίλο περίγραμμα στον ανακλαστήρα, δημιουργείται ένα ελάχιστο κενό μεταξύ των δυο μεταλλικών μεμβρανών, το οποίο σε περίπτωση ανάγκης μπορεί να ασκήσει πίεση για να ανατρέψει την εστίαση του ηλιοστάτη.



Σχήμα 1  
Μεμβρανοειδής ηλιοστάτης

Αν και το βάρος των ηλιοστατών αυτών είναι σαφώς πολύ μικρότερο από των συμβατικών ηλιοστατών με γυαλί, υπάρχουν κάποια σημεία στα οποία μειονεκτούν.

- Σε περίπτωση δυνατών ανέμων, αλλοιώνεται το σχήμα της επιφάνειας της μπροστινής μεμβράνης, με αποτέλεσμα να αποκλίνει από το σημείο εστίασης [43]. Το πρόβλημα αυτό μετριάζεται με χρήση ενός δακτυλίου, σκοπός του οποίου είναι να προκαλεί τάση στην μεμβράνη και να βοηθά στην αποφυγή του φαινομένου αυτού. Ο δακτύλιος αυτός βρίσκεται συγκολλημένος στον δακτύλιο στήριξης.



Σχήμα 2  
Σύστημα εστίασης ηλιοστάτη

- Εξαιτίας της φύσης της μεμβράνης, οι διάφορες επικαθίσεις ενεργούν ανασταλτικά στην αποτελεσματικότητα του συλλέκτη. Αποτελεί επομένως αδήριτη ανάγκη ο συχνός καθαρισμός τους.

## 5.4 ΠΥΡΓΟΣ ΙΣΧΥΟΣ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ

### ΓΕΝΙΚΑ

Όπως έχουμε ήδη προαναφέρει, για μεγιστοποίηση της συγκέντρωσης ηλιακής ακτινοβολίας χρησιμοποιείται ένας δευτερεύοντας συλλέκτης, τοποθετημένος συνήθως στην κορυφή του πύργου ισχύος. Αυτό βέβαια προκαλεί προβλήματα τόσο στην κατασκευή του πύργου όσο και στην αντοχή του. Επίσης, ο δέκτης σχεδιάζεται κατά τρόπο τέτοιο ώστε να δέχεται την μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η απόδοση της μεταφοράς θερμότητας. Για την αποφυγή των περιορισμών αυτών έχουν μελετηθεί διάφορες εναλλακτικές προτάσεις, μια εκ των οποίων αποτελεί και η χρήση οπτικών ινών.

### ΔΟΜΗ

Με την χρήση των οπτικών ινών ουσιαστικά η μεταφορά θερμότητας δεν γίνεται μέσω του αέρα, αλλά μέσω των ινών, παρέχοντας κατά αυτόν τον τρόπο γεωμετρική ευελιξία όσον αφορά την δομή του συλλέκτη. Από την άλλη, οι οπτικές ίνες αυξάνουν κατά πολύ το κόστος κατασκευής του πύργου ισχύος και είναι λιγότερο διαφανείς από τον αέρα, αυξάνοντας τις απώλειες ακτινοβολίας.

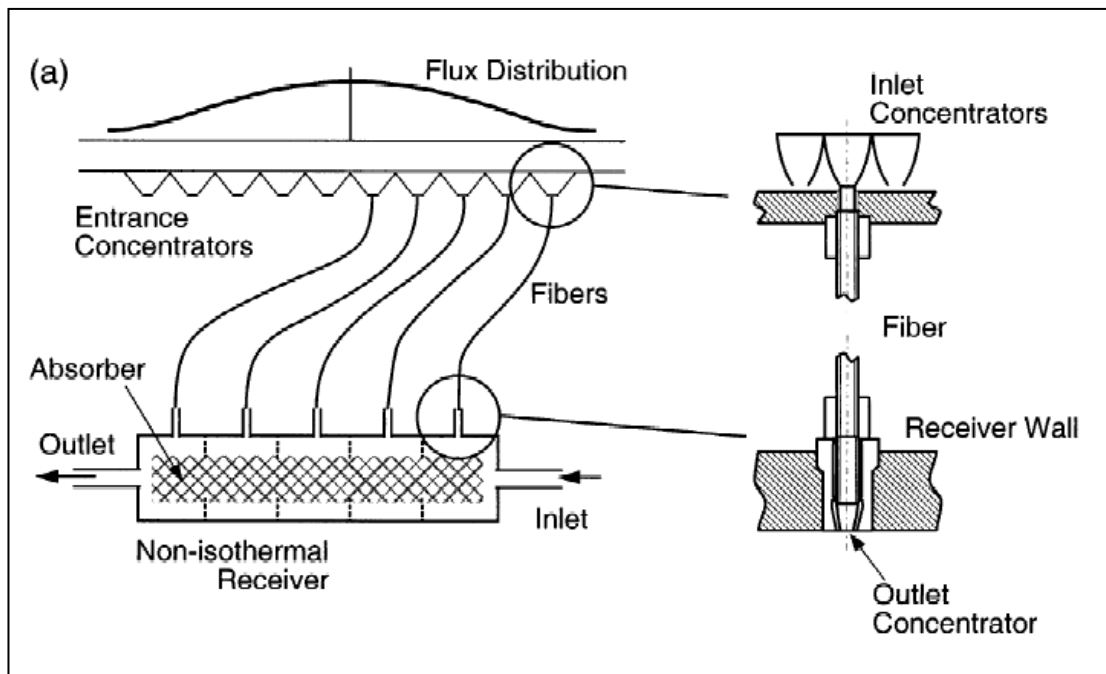
Για την μετρίαση των παραπάνω προβλημάτων, είναι αναγκαίο να ελαχιστοποιηθεί το μήκος των οπτικών ινών [42], οπότε η χρήση των οπτικών ινών περιορίζεται στο τελευταίο τμήμα εντός του δέκτη.

Ο καθορισμός του μήκους των οπτικών ινών καθορίζεται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του συλλέκτη. Πιο συγκεκριμένα, η τομή των ινών είναι ανάλογη της ισχύος του συλλέκτη, η οποία με την σειρά της, εξαρτάται από το τετράγωνο της ακτίνας του [42]. Ο συνολικός όγκος των ινών, οπότε και το κόστος τους, είναι ανάλογος της κυβικής ακτίνας του συλλέκτη[42].

Ένας πύργος ισχύος με οπτικές ίνες αποτελείται από τις παρακάτω επιμέρους συνιστώσες:

➤ *Οπτικός διανομέας φωτός*

Ο οπτικός διανομέας φωτός δέχεται την συγκεντρωμένη ακτινοβολία από τους ηλιοστάτες και την οδηγεί στον δέκτη. Η διατομή εισόδου του διανομέα είναι δυνατόν να αποτελείται από μικρούς διηλεκτρικούς συλλέκτες, κατασκευασμένους από το ίδιο υλικό με αυτό των οπτικών ινών, οι οποίοι οδηγούν το φως στις επιμέρους ίνες [42]. Η δομή των συλλεκτών αυτών είναι προτιμότερο να είναι η εξαγωνική, η οποία εξαλείφει τα διάκενα μεταξύ τους [42]. Υπάρχει και η δυνατότητα τοποθέτησης ενός τέτοιου συλλέκτη και στην έξοδο της ίνας μέσα στον δέκτη, έτσι ώστε να μεγιστοποιείται η ροή ακτινοβολίας [42]. Σχηματική απεικόνιση του διανομέα φωτός φαίνεται στο σχήμα 1.



Σχήμα 1  
Οπτικός διανομέας φωτός

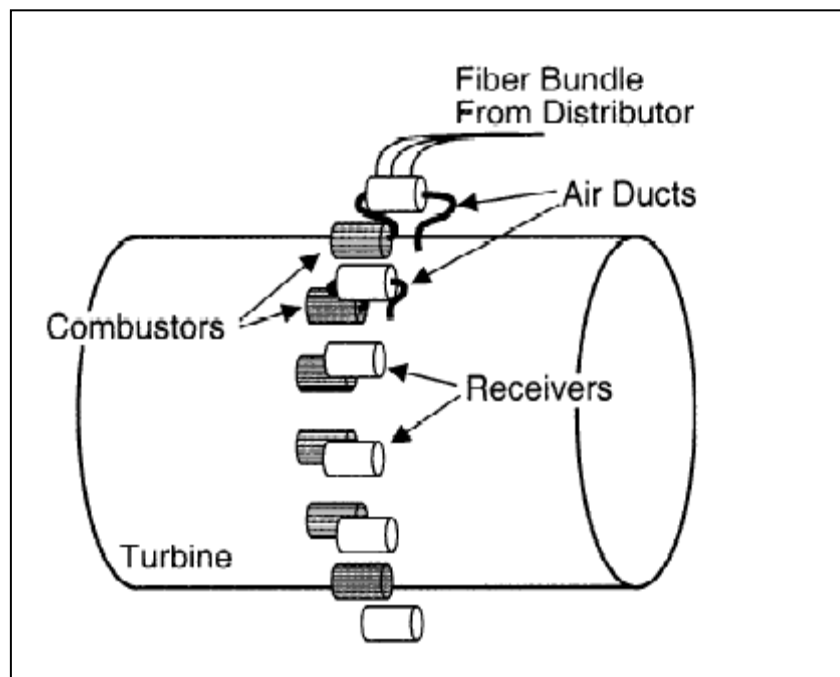
➤ *Μη ισοθερμικός δέκτης*

Ο δέκτης αυτός είναι σωληνοειδής, με την ροή της ακτινοβολίας να λαμβάνει χώρα κατά τον άξονά του και τις διατομές εισόδου των ινών τοποθετημένες στα εξωτερικά τοιχώματά του (σχήμα 1) [42]. Η ροή ακτινοβολίας σε κάθε ίνα εξαρτάται από την θέση της πάνω στον συλλέκτη [42]. Οι έξοδοι των ινών τοποθετούνται κατά τέτοιο τρόπο ώστε αυτές που παρέχουν μικρή ροή να βρίσκονται κοντά στην είσοδο του

εργαζόμενου μέσου και αυτές που παρέχουν μεγάλη ροή ακτινοβολίας κοντά στην έξοδό του [42]. Η μεταφορά θερμότητας μεταξύ των τμημάτων αυτών (στις οποίες επικρατούν διαφορετικές θερμοκρασιακές συνθήκες) είναι ελάχιστη, εξαιτίας του μεγάλου λόγου μήκους προς διάμετρο του δέκτη [42].

➤ *Διανομέας συστήματος δέκτη*

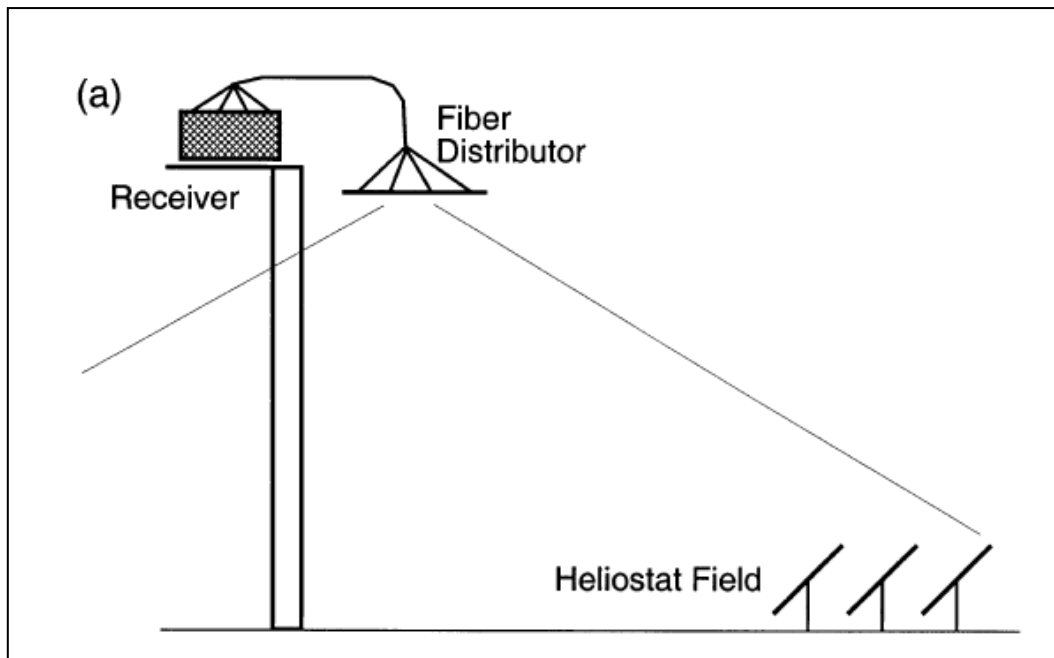
Στους τυπικούς πύργους ισχύος, η ακτινοβολία συγκεντρώνεται σε έναν μόνο δέκτη τοποθετημένο στο εστιακό σημείο. Ακόμα και αν χρησιμοποιηθούν επιμέρους δέκτες, εξακολουθεί να υπάρχει ο περιορισμός της τοποθεσίας τους, διότι πρέπει να τοποθετηθούν σε μικρή απόσταση μεταξύ τους για να ελαχιστοποιούνται οι θερμικές απώλειες [42]. Ο περιορισμός αυτός μπορεί να υπερκεραστεί με τις οπτικές ίνες, καθώς μπορούν να τοποθετηθούν οπουδήποτε, καθιστώντας δυνατή την χρήση κάθε δέκτη.



Σχήμα 2  
Διανομέας συστήματος δέκτη

Υπάρχουν δυο διαφορετικές διατάξεις των οπτικών ινών, οι οποίες παρουσιάζονται παρακάτω:

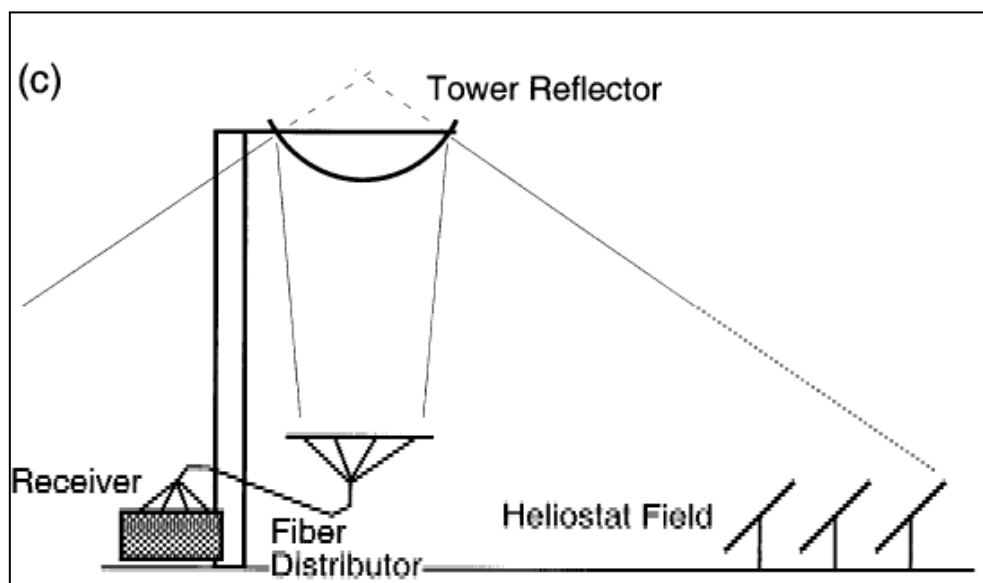
- Οι οπτικές ίνες να είναι τοποθετημένες στην κορυφή του πύργου



Σχήμα 3  
Οπτικές ίνες στην κορυφή του πύργου ισχύος

Με τον τρόπο αυτό αντικαθίσταται ο τεράστιος δευτερεύοντας ανακλαστής με τις ίνες, οι οποίες παρέχουν πρόσβαση ακόμα και σε απομακρυσμένους δέκτες. Ένας ισοθερμικός δέκτης σε κοντινή απόσταση από τις οπτικές ίνες συμπληρώνει τον σχεδιασμό του συστήματος αυτού.

- Οι οπτικές ίνες είναι τοποθετημένες στο κάτω μέρος του πύργου



Σχήμα 4  
Οπτικές ίνες στην βάση του πύργου ισχύος

## ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

### ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ICS ΜΕ ΔΥΟ ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ ΝΕΡΟΥ

#### ΓΕΝΙΚΑ

Στην μελέτη αυτή αναλύουμε τον σχεδιασμό έξι διαφορετικών μοντέλων ICS με δυο κυλινδρικές δεξαμενές αποθήκευσης νερού σε οριζόντια διάταξη. Ο συνδυασμός συμμετρικών και ασύμμετρων CPC ανακλαστήρων με δυο κυλινδρικές δεξαμενές αποθήκευσης αποτελούν ένα ενδιαφέρον θέμα όσον αφορά την απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας από τον απορροφητή, την θέρμανση του νερού και τον περιορισμό των θερμικών απωλειών.

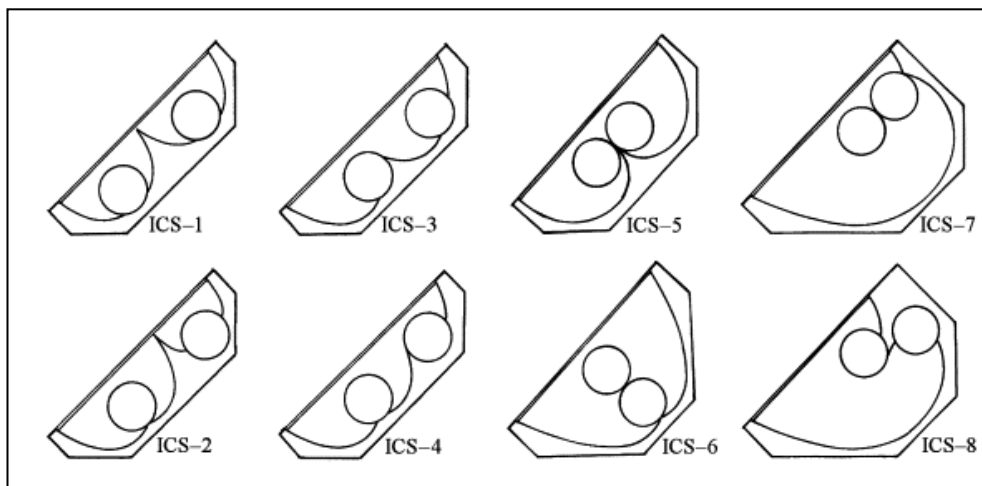
Οι συμμετρικοί CPC ανακλαστήρες συντελούν στην ίδια θέρμανση των δυο δεξαμενών, ενώ οι ασύμμετροι σε διαφορετική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας σε αυτές [34]. Στα συστήματα με διπλή δεξαμενή, η μια μπορεί να χρησιμεύει για προθέρμανση και η άλλη για την κύρια θέρμανση και διατήρηση της θερμοκρασίας κατά την διάρκεια της νύχτας. Στο σχήμα 1 παρουσιάζονται οκτώ τύποι των συστημάτων αυτών.

Οι δυο δεξαμενές αποθήκευσης είναι τοποθετημένες εν σειρά με την είσοδο του νερού στην κατώτερη και την έξοδο στην ανώτερη. Οι ICS-1 και ICS-2 χρησιμοποιούν συμμετρικούς καμπύλους ανακλαστήρες, οι οποίοι διαφοροποιούνται στην θερμική προστασία της δεξαμενής [34]. Ο ICS-1 αποτελείται από δυο υποσυστήματα τοποθετημένα στην ίδια συσκευή. Η υψηλότερα τοποθετημένη δεξαμενή του ICS-2 δέχεται λιγότερη ηλιακή ακτινοβολία από την χαμηλότερη, αλλά χαρακτηρίζεται από καλύτερη θερμική προστασία.

Ο ICS-3 αποτελείται από δυο υποσυστήματα με ασύμμετρους καμπύλους ανακλαστήρες ενώ οι δυο δεξαμενές χαρακτηρίζονται από παρόμοια θερμική προστασία [34]. Στο σύστημα ICS-4 η υψηλότερα τοποθετημένη δεξαμενή μπορεί να διατηρήσει την θερμοκρασία του νερού για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα λόγω της καλύτερης μόνωσής της [34]. Στα συστήματα ICS-3 και ICS-4 η υψηλότερα τοποθετημένη δεξαμενή θερμαίνεται ικανοποιητικά στην διάρκεια του χειμώνα (με καλύτερο βαθμό θέρμανσης στο σύστημα ICS-3), αποφεύγοντας επίσης υπερβολική θέρμανση του νερού στην διάρκεια του καλοκαιριού[34]. Στα τέσσερα



προαναφερθέντα συστήματα, οι δυο δεξαμενές αποθήκευσης έχουν τοποθετηθεί σε μικρή απόσταση μεταξύ τους, συνέπεια του οποίου είναι συστήματα μεγάλου βάθους. Στα συστήματα ICS-5 και ICS-6 οι δεξαμενές αποθήκευσης συνδυάζονται με συμμετρικούς CPC ανακλαστήρες και οι δεξαμενές βρίσκονται σε διαφορετική θέση στην κοιλότητα του ανακλαστήρα. Στο σύστημα ICS-7 και οι δυο δεξαμενές είναι αποτελεσματικές όσον αφορά τη θέρμανσή τους, ενώ στο σύστημα ICS-8 η υψηλότερα τοποθετημένη δεξαμενή δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία μόνο από την μισή επιφάνεια [34]. Τα δυο τελευταία συστήματα βασίζονται σε ασύμμετρους CPC ανακλαστήρες και η τοποθέτηση των δεξαμενών έχει σκοπό να δημιουργήσει κενό αποθήκευσης θερμού αέρα μεταξύ της απορροφητικής επιφάνειας και των καμπύλων ανακλαστήρων έτσι ώστε να μειωθούν οι θερμικές απώλειες.

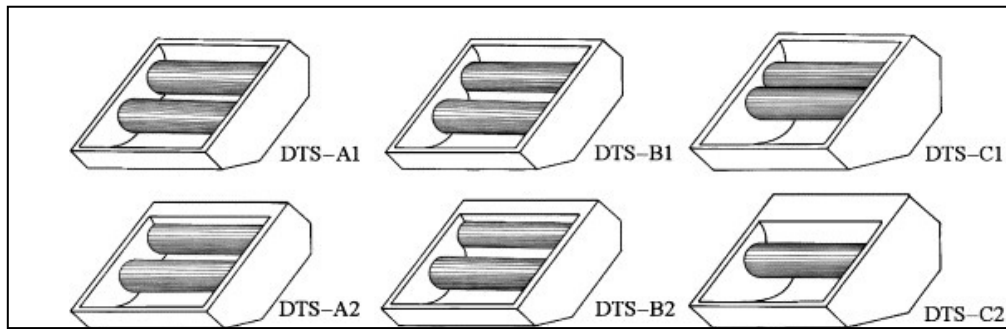


Σχήμα 1

Συστήματα ICS με δυο δεξαμενές νερού

### ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

Κατασκευάσαμε τέσσερα μοντέλα βασισμένα στον σχεδιασμό των συστημάτων ICS-3 και ICS-4 (DTS-A1, DTS-A2, DTS-B1, DTS-B2) και δυο μοντέλα βασισμένα στα συστήματα ICS-7 και ICS-8 (DTS-C1, DTS-C2). Η μπροστινή όψη των μοντέλων αυτών φαίνεται στο σχήμα 2.



Σχήμα 2  
Μοντέλα DTS

Οι ανακλαστήρες αυτών είναι ασύμμετροι CPC. Σε όλα τα μοντέλα, η διάμετρος κάθε δεξαμενής είναι ίση με  $D_T = 0.26 \text{ m}$  και το μήκος της  $L_T = 1.01 \text{ m}$ , οπότε ο όγκος  $V_T = 53.62 \text{ l}$  [34]. Η  $T_1$  δεξαμενή είναι αυτή που έχει τοποθετηθεί υψηλότερα και περιλαμβάνει την έξοδο του θερμού νερού, ενώ η  $T_2$  αποτελεί την χαμηλότερη δεξαμενή και περικλείει την είσοδο του κρύου νερού. Στον πίνακα 1 συγκεντρώνονται οι κατασκευαστικές παράμετροι όλων των μοντέλων, όπου  $L_a$  το μήκος εισόδου,  $W_a$  το πλάτος εισόδου,  $A_a$  τη διατομή εισόδου,  $A_r$  η εκτεθειμένη διατομή στην ηλιακή ακτινοβολία,  $D_s$  το βάθος συστήματος,  $V_T / A_a$  το λόγο όγκου νερού ανά διατομή εισόδου και  $CR = A_a / A_r$  ο λόγο συγκέντρωσης[34] .

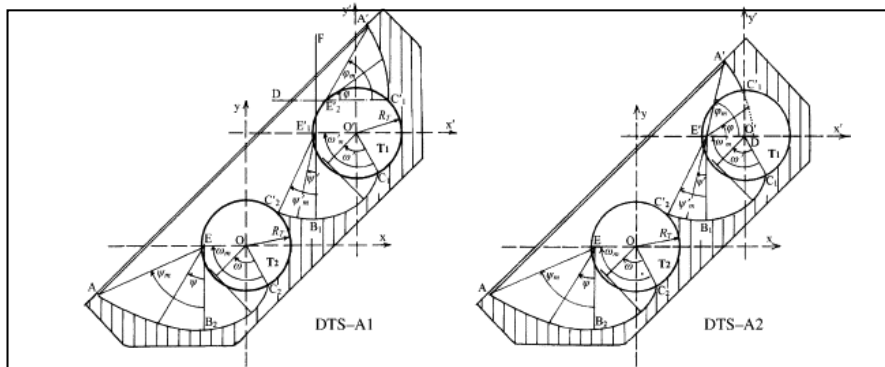
Πίνακας 1

Κατασκευαστικές παράμετροι όλων των μοντέλων

Model	$L_a$ (m)	$W_a$ (m)	$A_a$ (m <sup>2</sup> )	$A_r$ (m <sup>2</sup> )	$D_s$ (m)	CR	$V_T/A_a$ (l m <sup>-2</sup> )
DTS-A1	0.957	1.176	1.125	1.157	0.364	0.972	95.32
DTS-A2	0.957	1.060	1.014	1.055	0.364	0.961	105.76
DTS-B1	0.957	1.176	1.125	1.157	0.364	0.972	95.32
DTS-B2	0.957	1.060	1.014	1.055	0.364	0.961	105.76
DTS-C1	0.962	0.928	0.893	1.531	0.604	0.583	120.09
DTS-C2	0.964	0.777	0.749	0.987	0.604	0.759	143.18

➤ ΜΟΝΤΕΛΑ ΤΥΠΟΥ DTS-A

Τα δυο μοντέλα τύπου DTS-A απεικονίζονται στο σχήμα 3.



Σχήμα 3

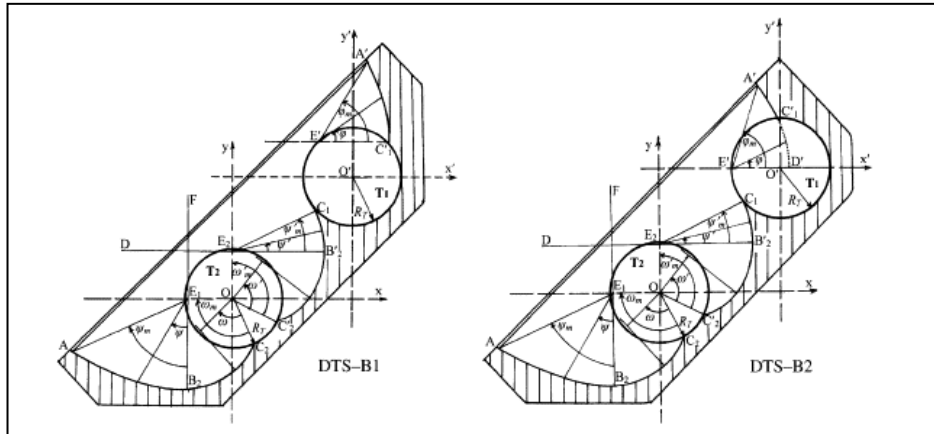
Μοντέλα τύπου DTS-A

Αποτελούνται από τρία τμήματα ανακλαστήρα, εκ των οποίων τα δύο είναι τύπου CPC και συνδυάζονται με τις δύο δεξαμενές αποθήκευσης. Το τρίτο τμήμα είναι παραβολικό και είναι τοποθετημένο στην κορυφή των συστημάτων. Το χαμηλότερο τμήμα του ανακλαστήρα είναι ένας ασύμμετρος καμπύλος CPC με ένα παραβολικό τμήμα ( $AB_2$ ) και ένα τμήμα δια εξελιγμένης ( $B_2C_2$ ) [34]. Η μέγιστη γωνία πρόσπτωσης του παραβολικού τμήματος είναι  $\underline{\psi_m = 59.7^\circ}$  και η μέγιστη γωνία του τμήματος δια εξελιγμένης  $\underline{\omega_m = 120^\circ}$  [34]. Το παραβολικό εστιακό μήκος  $\underline{[B_2E] = R_T \omega_m}$  είναι παράλληλο με τον άξονα y [34].

Το τμήμα ( $C_2'B_1C_1$ ) του άλλου ανακλαστήρα είναι επίσης ασύμμετρης CPC γεωμετρίας και αποτελείται από ένα παραβολικό τμήμα ( $C_2'B_1$ ) με  $[B_1E']$  την εστιακή απόσταση για το μοντέλο DTS-A1,  $[B_1E'] = R_T \omega'_m$  η εστιακή απόσταση για το μοντέλο DTS-A2 και από ένα τμήμα δια εξελιγμένης ( $B_1C_1$ ) [34]. Οι αντίστοιχες μέγιστες γωνίες είναι  $\underline{\psi'_m = 26.3^\circ}$  και  $\underline{\omega'_m = 120^\circ}$  [34]. Ο υψηλότερος τοποθετημένος ανακλαστήρας είναι το παραβολικό τμήμα ( $C_1'A'$ ) με εστιακή απόσταση  $\underline{[C_1E'_2] = \sqrt{2}R_T}$  και γωνία πρόσπτωσης  $\underline{\phi_m = 58^\circ}$  για το μοντέλο DTS-A1 και  $\underline{[DE'] = R_T(1 + \sqrt{2})/2}$  με  $\underline{\phi_m = 68.6^\circ}$  για το μοντέλο DTS-A2 [34].

➤ ΜΟΝΤΕΛΑ ΤΥΠΟΥ DTS-B

Τα δυο μοντέλα τύπου DTS-B απεικονίζονται στο σχήμα 4.



Σχήμα 4

Μοντέλα τύπου DTS-B

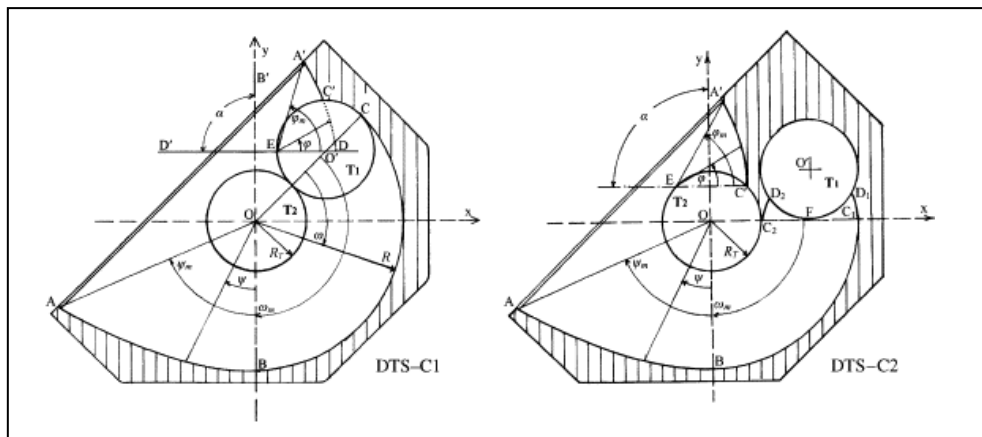
Αποτελούνται από δυο τμήματα ανακλαστήρα, εκ των οποίων ο ένας είναι συμμετρικός γεωμετρίας CPC, συνδυασμένος με την χαμηλότερα τοποθετημένη δεξαμενή ενώ το άλλο τμήμα είναι παραβολικής γεωμετρίας συνδυασμένο με την υψηλότερη δεξαμενή. Ο συμμετρικός CPC ανακλαστήρας είναι ίδιος για τα δυο μοντέλα και διαφέρει στο παραβολικό τμήμα που είναι τοποθετημένο στην κορυφή του συστήματος [34]. Το κατώτερο τμήμα του ανακλαστήρα ( $AB_2C_2$ ) είναι το ίδιο με το αντίστοιχο τμήμα των μοντέλων DTS-A1 και μοντέλο DTS-A2. Το άλλο τμήμα ( $C_2'B_2'C_1$ ) αποτελείται από το παραβολικό τμήμα ( $C_1B_2'$ ) και το τμήμα δια εξελιγμένης ( $C_2'B_2'$ ) [34]. Η παραβολική εστιακή απόσταση [ $B_2'E_2$ ] θεωρείται παράλληλη στον x άξονα. Η μέγιστη γωνία πρόσπτωσης  $\psi'$  του παραβολικού τμήματος είναι  $\psi'_{\text{m}} = 26.3^\circ$  και η αντίστοιχη γωνία για το τμήμα δια εξελιγμένης  $\omega'_{\text{m}} = 120^\circ$  [34]. Τα παραβολικά τμήματα ( $C_1'A'$ ) στην κορυφή των συστημάτων DTS-B1 και DTS-B2 και οι μέγιστες γωνίες  $\phi_m$  είναι ίδια με αυτά των μοντέλων DTS-A1 και DTS-A2 αντίστοιχα [34].

➤ ΜΟΝΤΕΛΑ ΤΥΠΟΥ DTS-C

Τα μοντέλα τύπου DTS-C διαφέρουν στην γεωμετρία του ανακλαστήρα σε σχέση με τα μοντέλα DTS-A και DTS-B, καθώς ο σχεδιασμός του βασίζεται στην δημιουργία

κενού αποθήκευσης θερμού αέρα με σκοπό την μείωση των θερμικών απωλειών της δεξαμενής και κυρίως της υψηλότερα τοποθετημένης δεξαμενής. Ο σχεδιασμός των συστημάτων DTS-C1 και DTS-C2 (σχήμα 5) βασίζεται σε έναν κύριο μεγάλο καμπύλο ανακλαστήρα (ABC) και  $(ABC_1)$  αντίστοιχα και σε δυο μικρότερους ανακλαστήρες [34]. Ένας παραβολικός ανακλαστήρας  $(A'C')$  είναι τοποθετημένος στην κορυφή και των δυο συστημάτων και ένα ζεύγος μικρών κυκλικών ανακλαστήρων  $(C_1D_1)$  και  $(C_2D_2)$  συνδυάζεται με την επάνω δεξαμενή T1 του μοντέλου DTS-C2 [34]. Στο μοντέλο DTS-C1, το  $(AB)$  είναι ένα παραβολικό τμήμα με εστιακή απόσταση  $[BO] = 3 R_T$ ,  $(BC)$  ένα κυκλικό τμήμα με ακτίνα  $R = 3 R_T$  και  $(C'A')$  το παραβολικό τμήμα της κορυφής του συστήματος με εστιακή απόσταση  $[ED] = R_T(1 + \sqrt{2})/2$  [34]. Το μοντέλο DTS-C2 έχει το ίδιο παραβολικό τμήμα  $(AB)$  και μικρότερο κυκλικό τμήμα  $(BC_1')$  από αυτό του μοντέλου DTS-C1. Το παραβολικό τμήμα στην κορυφή του συστήματος έχει εστιακή απόσταση  $[EC'] = \sqrt{2}R_T$  και τα δυο μικρά τμήματα  $(C_1D_1)$  και  $(C_2D_2)$  έχουν ακτίνα.

$[FC_1] = [FC_2] = R_T$  [34]. Για το μοντέλο DTS-C1 η μέγιστη γωνία πρόσπτωσης του παραβολικού τμήματος  $(AB)$  είναι  $\psi_m = 64.67^\circ$  και η μέγιστη γωνία του κυκλικού τμήματος  $\omega_m = 135^\circ$ , ενώ για το τμήμα  $C'A'$ ,  $\phi_m = 68.57^\circ$ . Για το μοντέλο DTS-C2 οι αντίστοιχες γωνίες είναι  $\psi_m = 64.67^\circ$ ,  $\omega_m = 90^\circ$  και  $\phi_m = 57.95^\circ$  [34].



Σχήμα 5

Μοντέλα τύπου DTS-C

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Σκοπός των πειραμάτων είναι να προσεγγίσουμε τις παρακάτω παραμέτρους:

- Την μέση ημερήσια αποδοτικότητα  $\eta_d$  των συστημάτων.
- Τον συντελεστή θερμικών απωλειών  $U_s$  κατά την διάρκεια της νύχτας.

### ➤ ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΜΕΣΗ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ

Η μέση ημερήσια αποδοτικότητα  $\eta_d$  υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\eta_d = \frac{m C_p (T_f - T_i)}{A_a G_m} \quad (1)$$

όπου

$m$ : η παροχή μάζας του νερού στην κυλινδρική δεξαμενή [kg/s],

$$C_p = 4180 \text{ Jkg}^{-1} \text{K}^{-1}$$

$G_m$ : η μέση ημερήσια εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία [ $\text{Wm}^{-2}$ ]

$T_i$  και  $T_f$ : η αρχική και τελική θερμοκρασία αποθήκευσης του νερού [ $^{\circ}\text{C}$ ] στις δυο δεξαμενές αποθήκευσης

Η μέση ημερήσια αποδοτικότητα  $\eta_d$  προσεγγίζεται επίσης σε συνάρτηση με τον λόγο  $\Delta T_{m,D} / G_m$  όπου  $\Delta T_{m,D} = T_i - T_{a,m}$  και  $T_{a,m}$  η μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά την διάρκεια της μέρας, από το παρακάτω πολυώνυμο δευτέρου βαθμού:

$$\eta_d = A + B (\Delta T_{m,D} / G_m) + C (\Delta T_{m,D} / G_m)^2 \quad (2)$$

Ο συντελεστής  $A$  αντιστοιχεί στην μέγιστη μέση ημερήσια αποδοτικότητα του συστήματος στην περίπτωση όπου  $(T_i + T_f) / 2 = T_{a,m}$  και οι συντελεστές  $B, C$  στις θερμικές απώλειες του συστήματος στην διάρκεια της μέρας.

Για τον υπολογισμό του συντελεστή  $A$  ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία:

A) Υπολογίζεται η εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία  $G$  για κάθε ώρα από τις 6:30 – 18:30, με βάση την εξίσωση:

$$G = (R_b \times G_b) + G_d \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + (G_b + G_d) \rho \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (3)$$

όπου ο πρώτος όρος αναφέρεται στην άμεση ακτινοβολία, ο δεύτερος στην διάχυτη η οποία προέρχεται από τον ουρανό και ο τρίτος στην διάχυτη που προέρχεται από ανακλάσεις της ολικής στο έδαφος. Για τον υπολογισμό της απαιτείται η γνώση των:

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (4)$$

$$G_b = M_t + A_t \times \sin \left( \frac{360}{365} D - P_t \right) \quad (5)$$

D: η ημέρα του χρόνου κατά την οποία πραγματοποιούνται οι μετρήσεις. Στην προκειμένη περίπτωση, οι μετρήσεις έγιναν κατά την 15<sup>η</sup> Απριλίου, οπότε D = 105.

$$G_d = m_t + a_t \times \sin \left( \frac{360}{365} D - p_t \right) \quad (6)$$

Οι τιμές των  $M_t$ ,  $A_t$ ,  $P_t$ ,  $a_t$ ,  $m_t$ ,  $p_t$  υπολογίζονται από σχετικό διάγραμμα [36] για κάθε ώρα.

Οι γωνίες που υπεισέρχονται στους υπολογισμούς, δίνονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \times \sin \phi \times \cos \beta - \sin \delta \times \cos \phi \times \sin \beta \times \cos \gamma + \\ & \cos \delta \times \cos \phi \times \cos \beta \times \cos \omega + \\ & \cos \delta \times \sin \phi \times \sin \beta \times \cos \gamma \times \cos \omega + \\ & \cos \delta \times \sin \beta \times \sin \gamma \times \sin \omega \end{aligned} \quad (7)$$

όπου

$\phi$ : η γωνία που αντιστοιχεί στο γεωγραφικό πλάτος του τόπου (για Αθήνα  $\phi = 37,97$ )

$$\delta: \text{η ηλιακή απόκλιση } \delta = 23,45 \sin \left( \frac{360(284 + n)}{365} \right) \quad (8)$$

n = 105 (η ημέρα του έτους)

$\beta$ : η κλίση του συλλέκτη,  $\beta = 45$

$$\gamma: \text{η γωνία αζιμουθίου, } \cos \gamma = \frac{\sin \theta_s \sin \phi - \sin \delta}{\cos \theta_s \cos \phi} \quad (9)$$

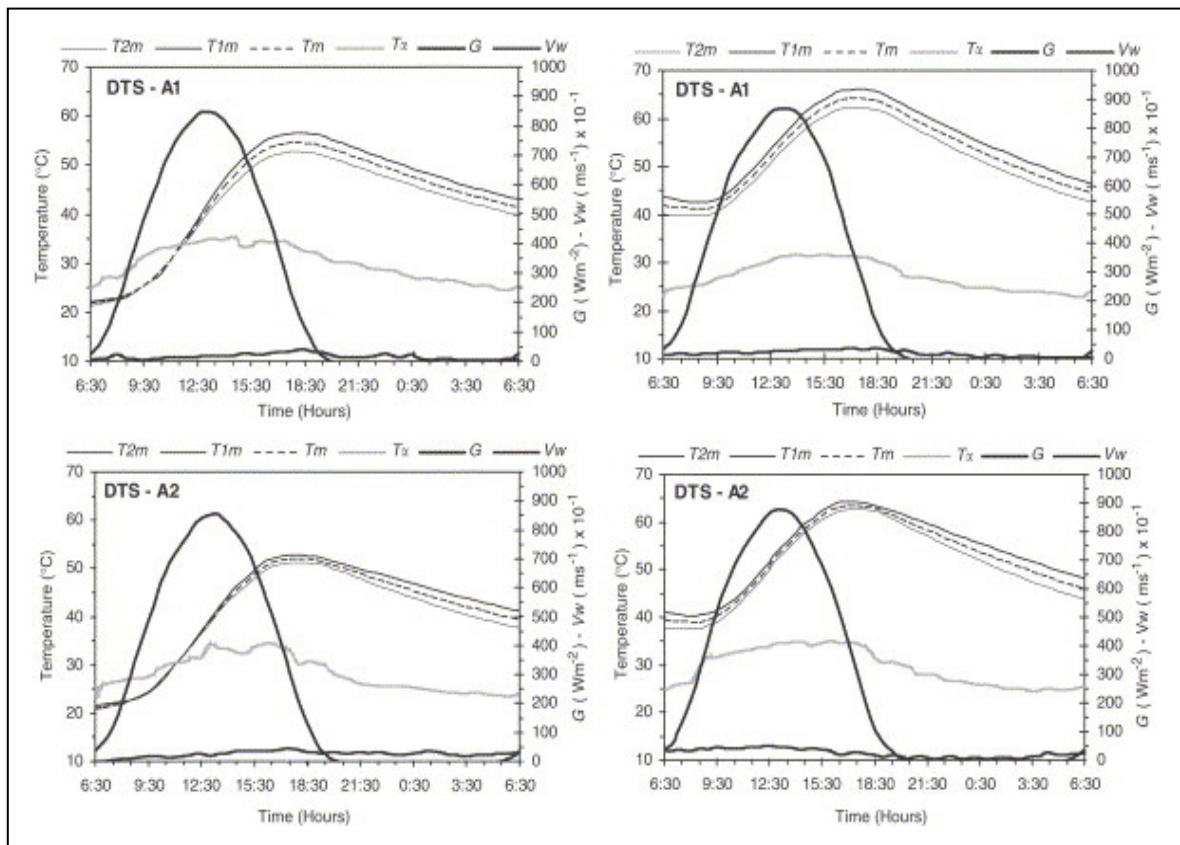
με

$$\sin \theta_s = \cos \omega \cos \delta \cos \phi + \sin \delta \sin \phi \quad (10)$$

και  $\omega$ : η ωριαία γωνία ίση με  $\omega = 0,25$ (min από το ηλιακό μεσημέρι),  $\omega > 0$  για μ.μ και  $\omega < 0$  για π.μ.

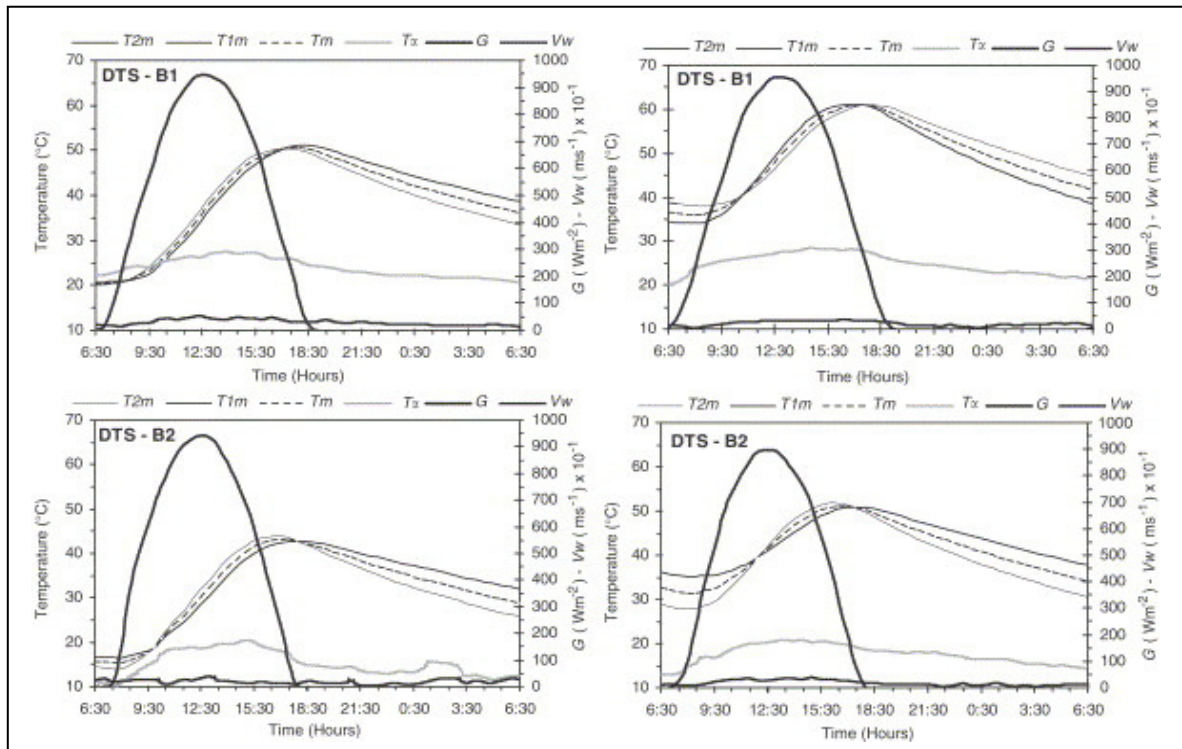
$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega \quad (11)$$

B) Με την βοήθεια των διαγραμμάτων νερού που έπονται [34] βρίσκουμε την θερμοκρασιακή διαφορά ( $T_f - T_i$ ) για κάθε συλλέκτη.

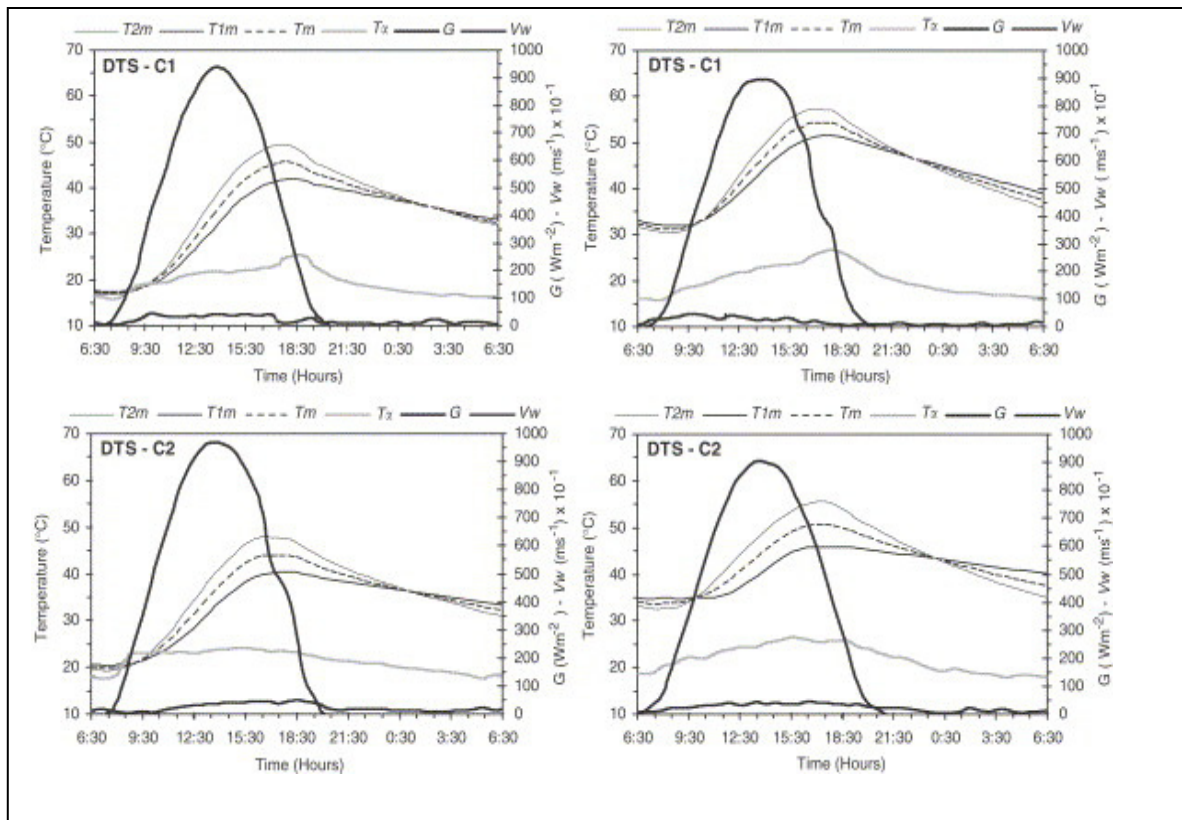


Σχήμα 6  
Διαγράμματα νερού για συλλέκτες τύπου DTS-A





Σχήμα 7  
 Διαγράμματα νερού για συλλέκτες τύπου DTS-B



Σχήμα 8  
 Διαγράμματα νερού για συλλέκτες τύπου DTS-C

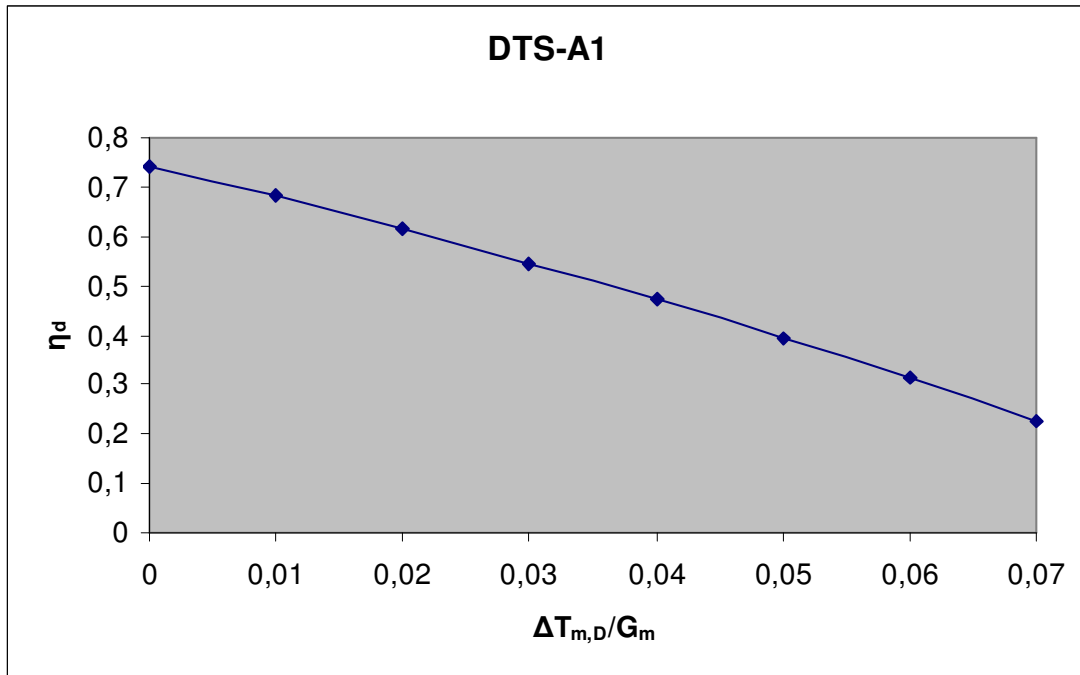
Παρατηρούμε ότι στα μοντέλα τύπου DTS-A, η θερμοκρασιακή αύξηση του νερού στην υψηλότερα τοποθετημένη δεξαμενή είναι μεγαλύτερη από αυτήν που γίνεται στην χαμηλότερη λόγω της ικανοποιητικής θέρμανσης και της θερμικής προστασίας. Αντιθέτως, στα μοντέλα των τύπων DTS-B και DTS-C, η χαμηλότερα τοποθετημένη δεξαμενή παρουσιάζει μεγαλύτερη θερμοκρασιακή αύξηση του νερού.

Γ) Με γνωστά πλέον όλα τα δεδομένα, από την εξίσωση (1), βρίσκουμε την αποδοτικότητα του συλλέκτη για κάθε ώρα. Η μέγιστη τιμή αντιστοιχεί στον συντελεστή A της εξίσωσης (2). Οι συντελεστές B και C αντιστοιχούν στις θερμικές απώλειες του συστήματος, οι οποίες έχουν προκύψει μετά από πειραματικές διαδικασίες [34]. Όλοι οι συντελεστές συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα:

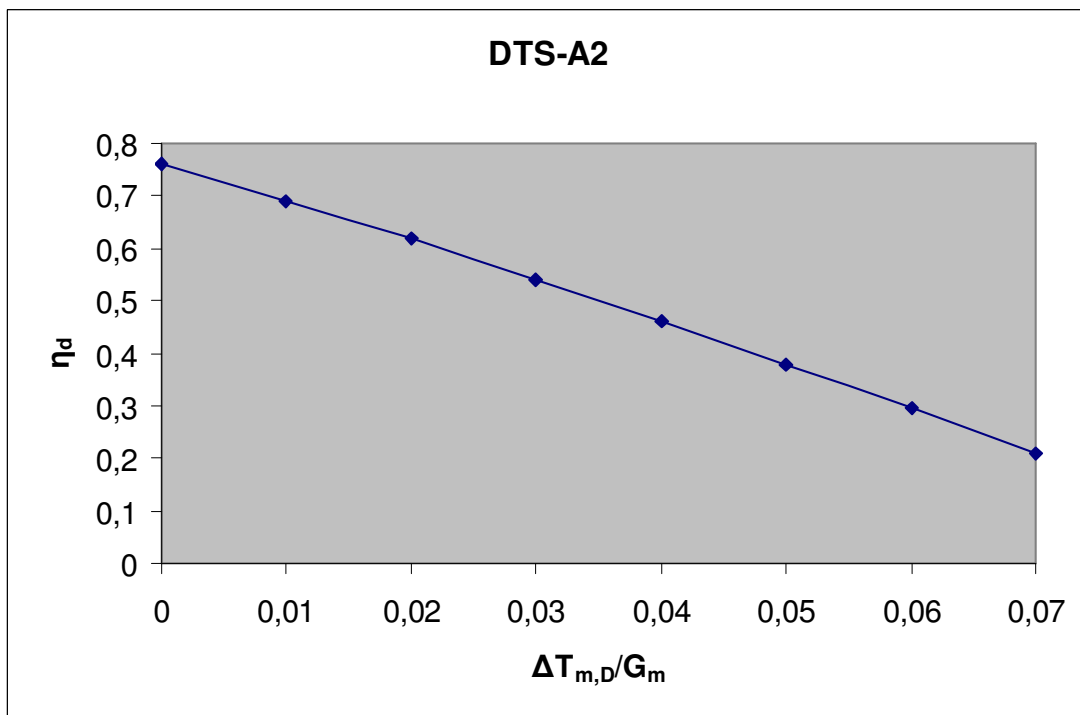
Πίνακας 2  
Τιμές συντελεστών εξίσωσης (1)

Σύστημα	A	B	C
DTS – A1	0.742	-5.910	-20.717
DTS – A2	0.762	-6.967	-13.484
DTS – B1	0.686	-6.347	-7.336
DTS – B2	0.729	-4.984	-25.887
DTS – C1	0.650	-5.746	-2.161
DTS – C2	0.611	-4.287	-14.640

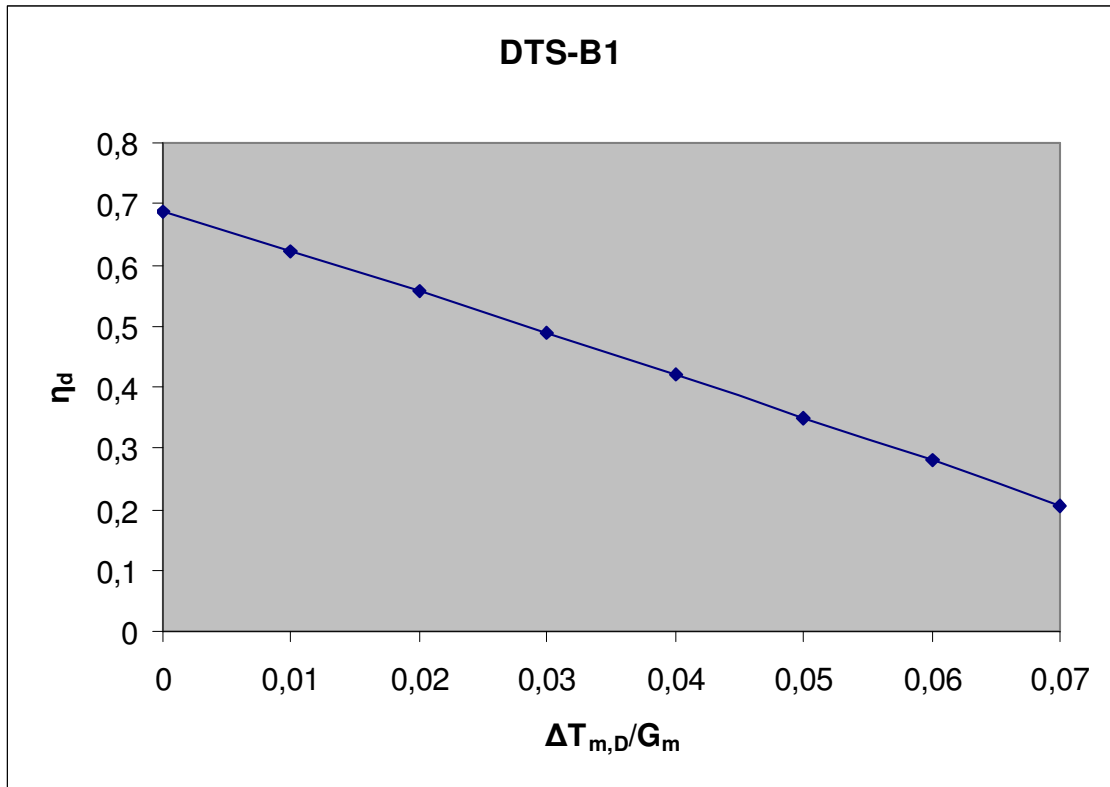
Επομένως, οι γραφικές παραστάσεις του βαθμού απόδοσης που δίνεται από την εξίσωση (2) για κάθε συλλέκτη χαράσσονται ακολούθως.



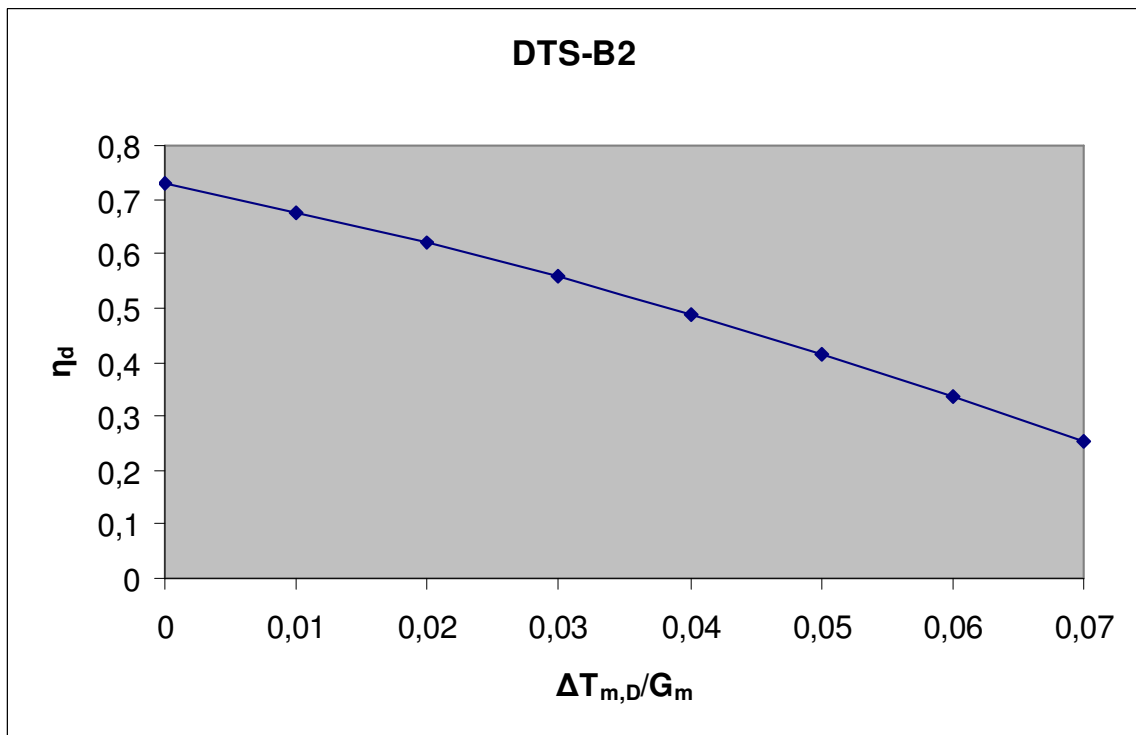
Σχήμα 9  
Βαθμός απόδοσης DTS-A1



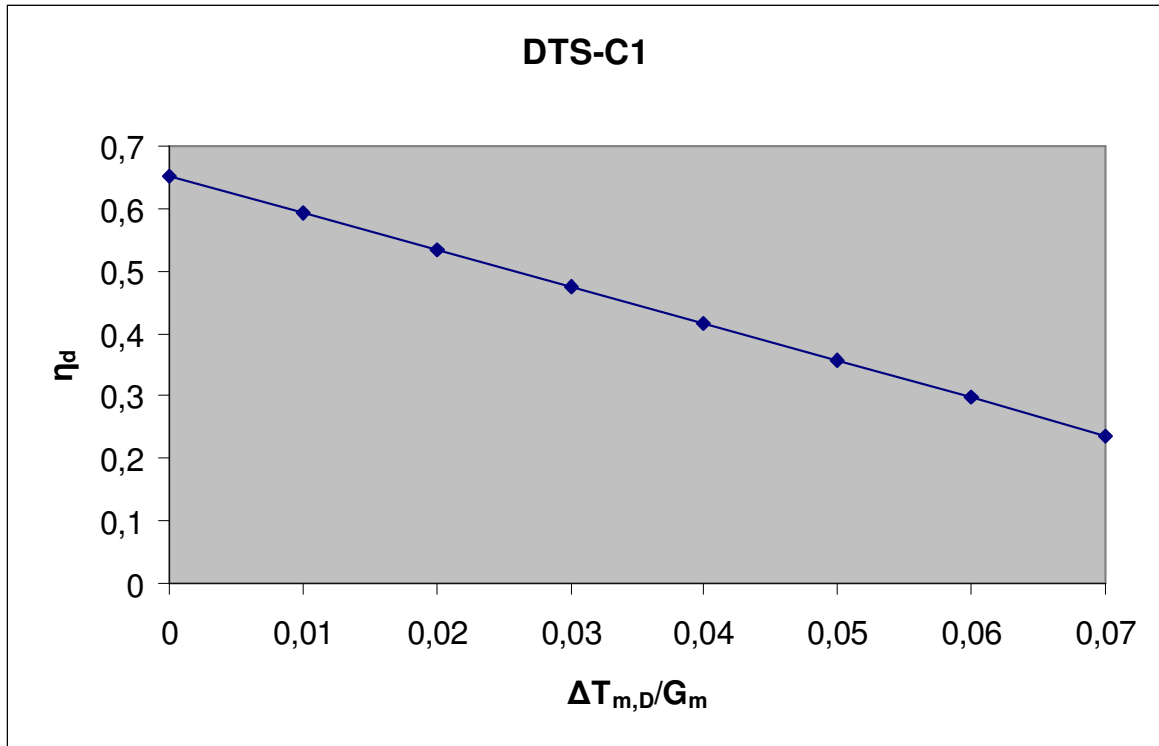
Σχήμα 10  
Βαθμός απόδοσης DTS-A2



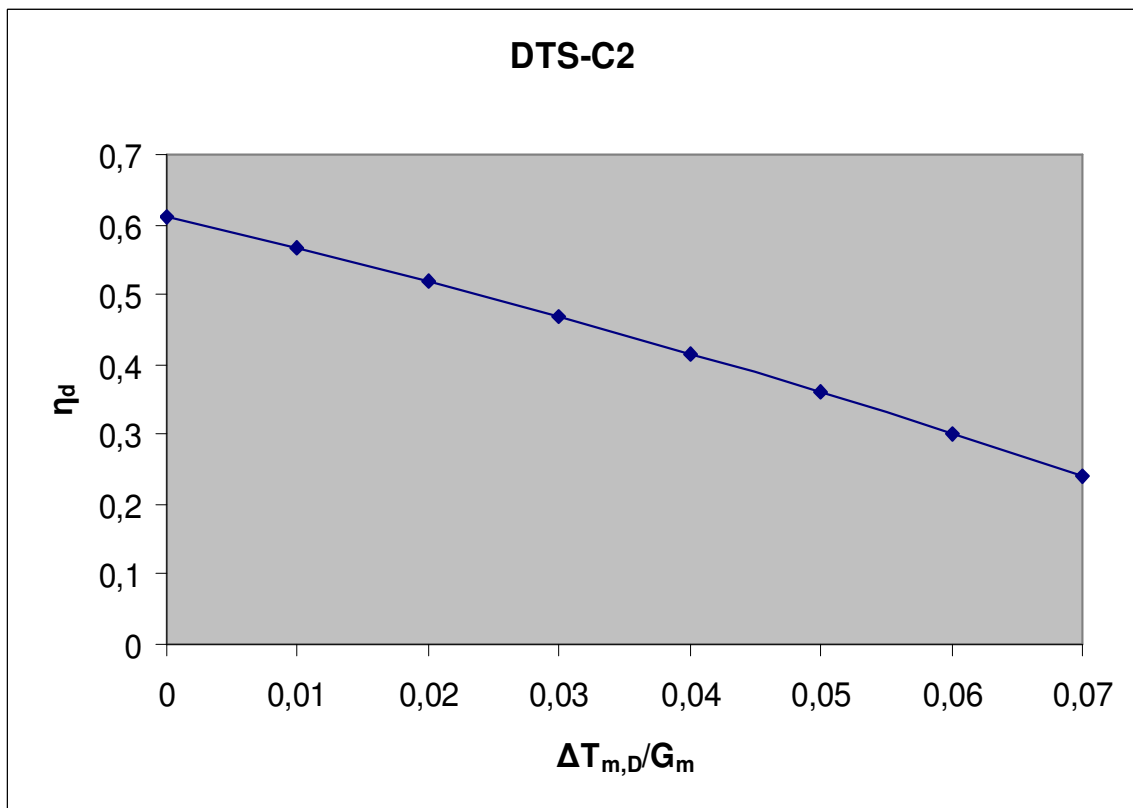
Σχήμα 11  
Βαθμός απόδοσης DTS-B1



Σχήμα 12  
Βαθμός απόδοσης DTS-B2



Σχήμα 13  
Βαθμός απόδοσης DTS-C1



Σχήμα 14  
Βαθμός απόδοσης DTS-C2

## Συμπεράσματα

Μελετώντας τα παραπάνω διαγράμματα, καταλήγουμε στο ότι ο συλλέκτης τύπου DTS-B2 παρουσιάζει την βέλτιστη συμπεριφορά, έναντι του DTS-C2 ο οποίος παρουσιάζει την χειρίστη. Τα συμπεράσματα όμως αυτά δεν ισχύουν και για τιμές  $\Delta T_{m,D}/G_m > 0,04 \text{ KW}^{-1}\text{m}^2$ , καθώς για αυτές τις τιμές, ο βαθμός απόδοσης όλων των συλλεκτών είναι παρεμφερής. Οι συλλέκτες τύπου DTS-A παρουσιάζουν καλύτερη θερμική συμπεριφορά κατά την διάρκεια της μέρας για ευρύ φάσμα τιμών  $\Delta T_{m,D}/G_m$ , σε αντίθεση με τους συλλέκτες τύπου DTS-C οι οποίοι είναι οι λιγότεροι αποδοτικοί για μικρές τιμές του  $\Delta T_{m,D}/G_m$ . Τέλος, ο μέσος ημερήσιος βαθμός απόδοσης των πιο αποδοτικών συλλεκτών (DTS-B2 και DTS-A1) προσομοιάζει με την θερμική συμπεριφορά των επίπεδων ηλιακών συλλεκτών (θερμοσίφωνα).

### ➤ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΗΣ ΝΥΧΤΑΣ

Υπολογίζουμε τον συντελεστή θερμικών απωλειών  $U_s$  με βάση την εξίσωση:

$$U_s = \frac{\rho \times C_p \times V_t}{\Delta t} \ln \frac{T_i - T_{a,m}}{T_f - T_{a,m}} \quad (12)$$

όπου

$V_T$ : ο όγκος του αποθηκευμένου νερού (107,24lt)

$\rho C_p = 4180 \text{ kJm}^{-3}\text{K}^{-1}$

$T_{a,m}$ : η μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά την διάρκεια της νύχτας

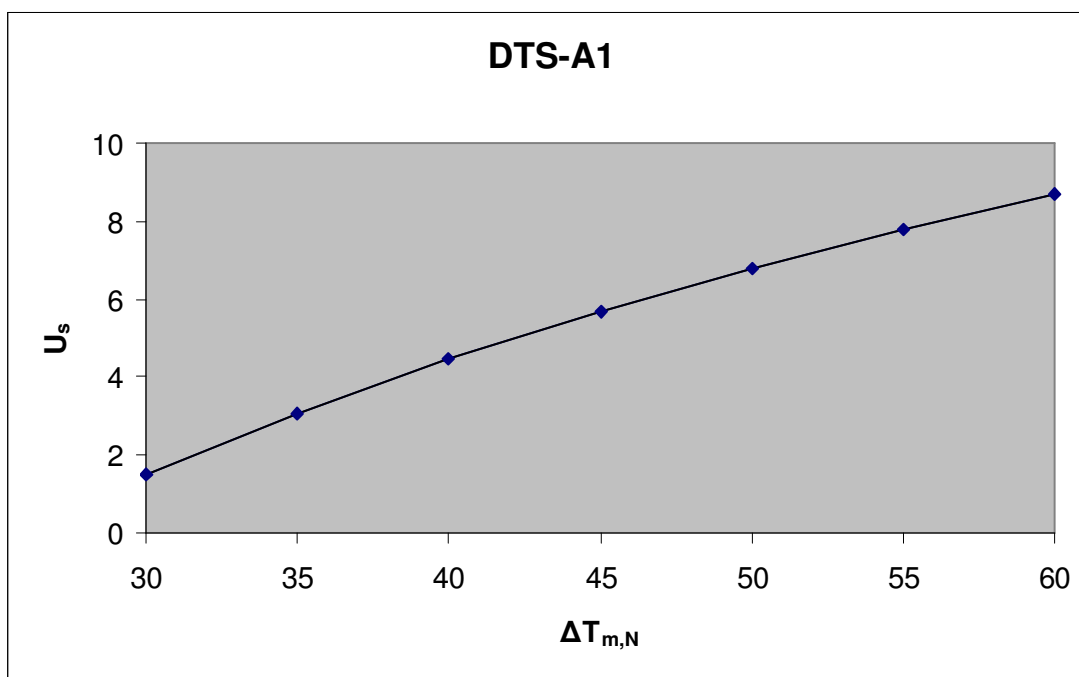
$\Delta t = t_f - t_i = 43200 \text{ s}$  ο χρόνος μεταξύ 18:30 ( $t_i$ ) και 6:30 ( $t_f$ ) της επόμενης ημέρας.

$T_{a,m}$ : η μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος στο χρονικό διάστημα  $\Delta t$  στην διάρκεια της νύχτας

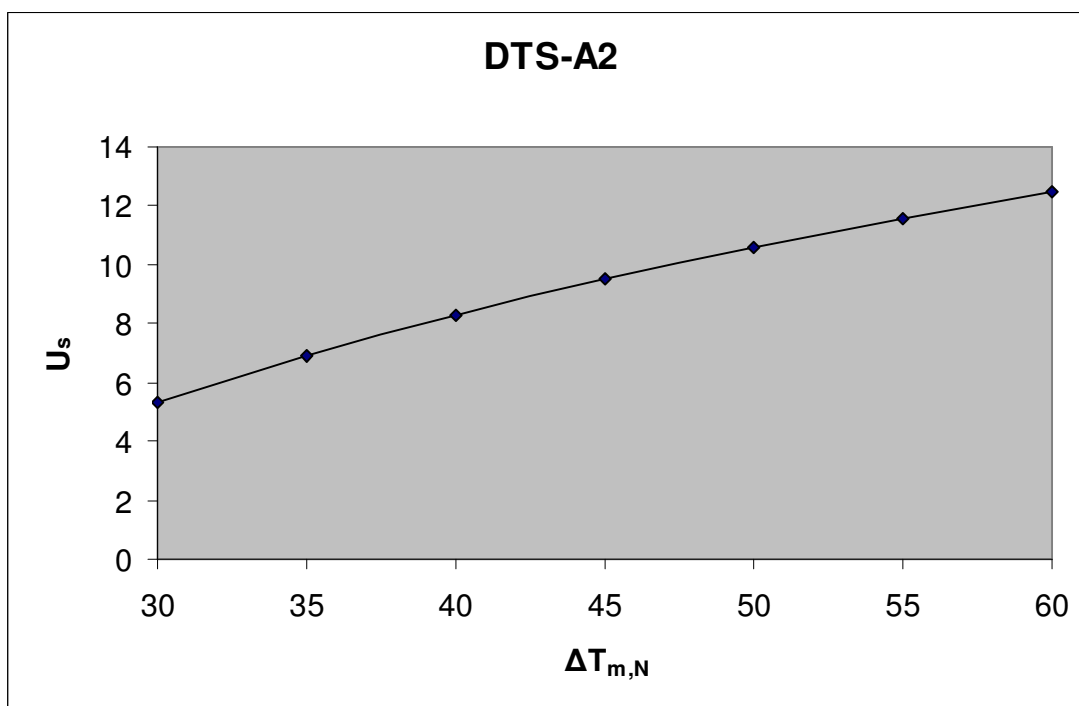
$T_{i,m}$ : η μέση θερμοκρασία του νερού στο αρχικό σημείο (18:30)

$T_f$ : η τελική θερμοκρασία (6:30)

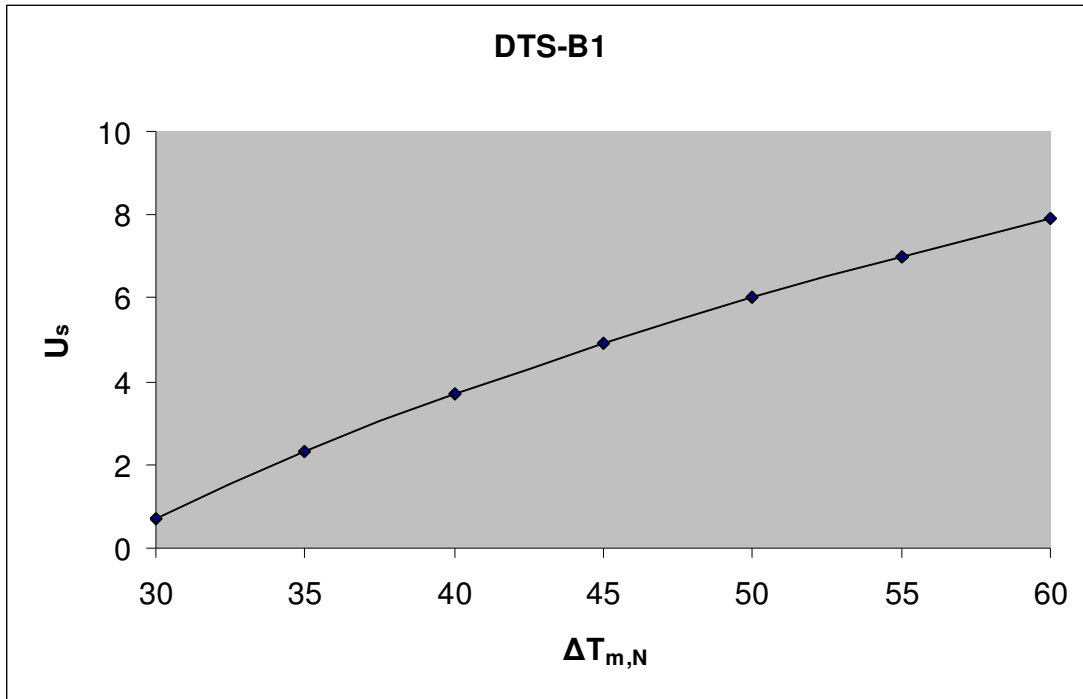
Ο συντελεστής  $U_s$  [  $W K^{-1}$  ] υπολογίζεται για διάφορες αρχικές θερμοκρασίες νερού σε κάθε σύστημα και υπολογίζεται για την μέση θερμοκρασιακή διαφορά στην διάρκεια της νύχτας.



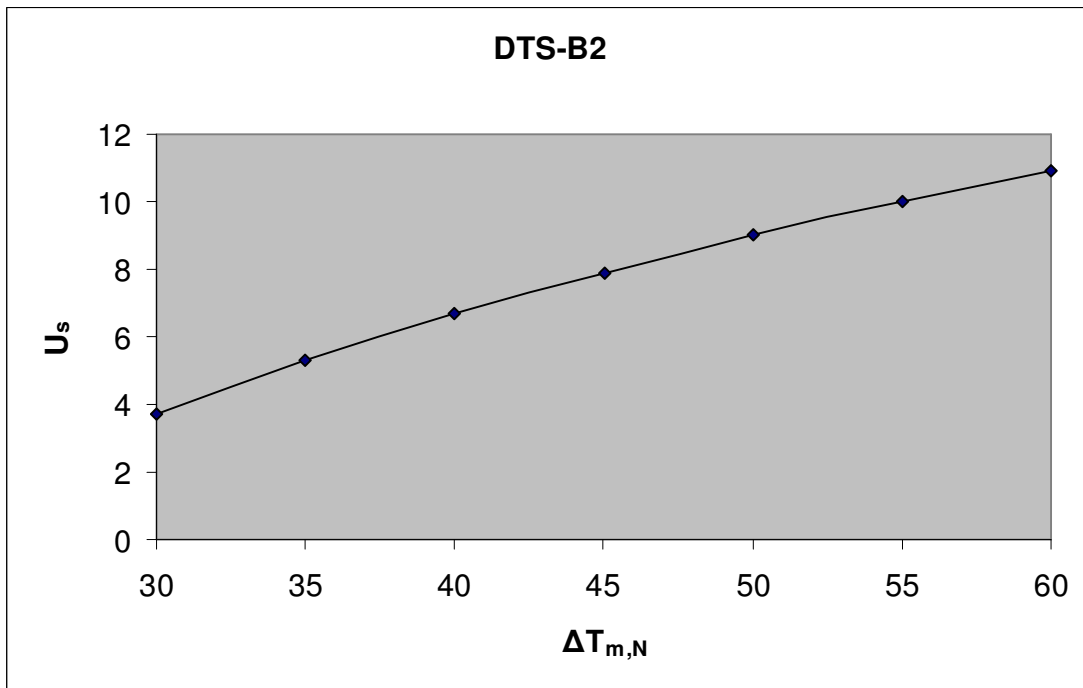
Σχήμα 15  
Θερμικές απώλειες κατά την διάρκεια της νύχτας DTS-A1



Σχήμα 16  
Θερμικές απώλειες κατά την διάρκεια της νύχτας DTS-A2

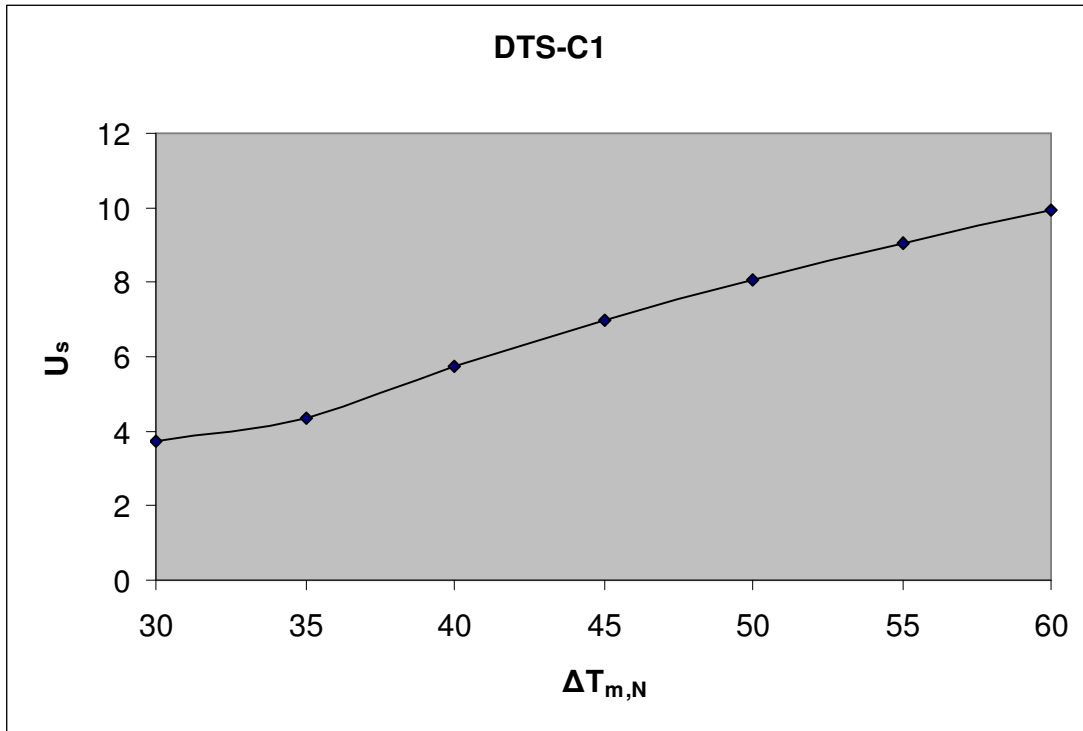


Σχήμα 17  
Θερμικές απώλειες κατά την διάρκεια της νύχτας DTS-B1

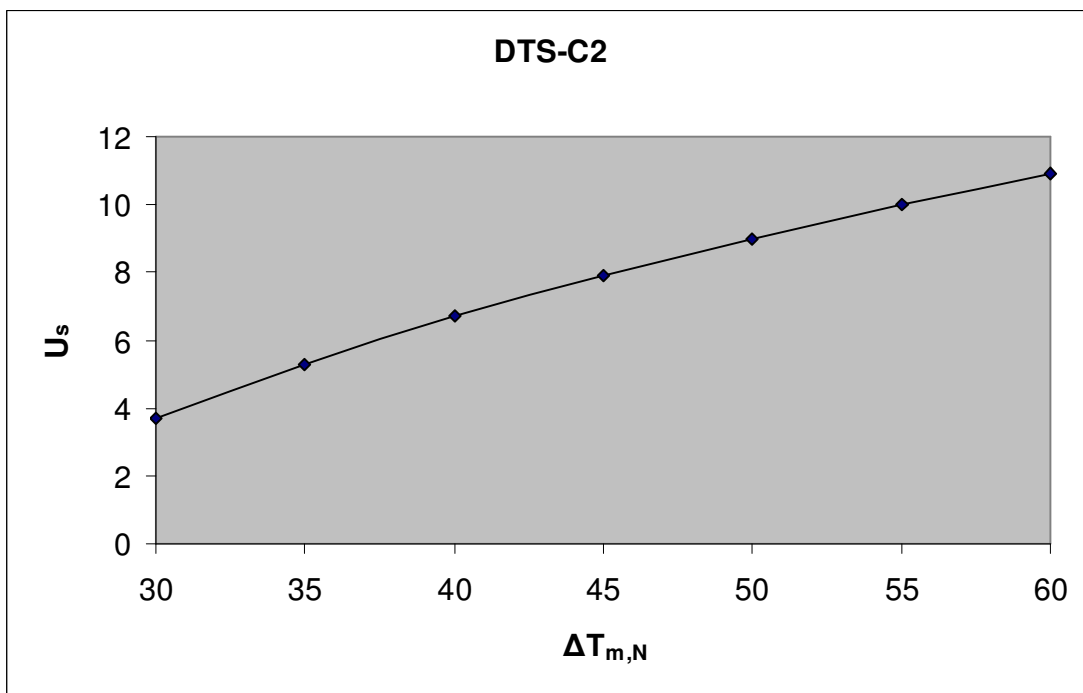


Σχήμα 18  
Θερμικές απώλειες κατά την διάρκεια της νύχτας DTS-B2





Σχήμα 19  
Θερμικές απώλειες κατά την διάρκεια της νύχτας DTS-C1



Σχήμα 20  
Θερμικές απώλειες κατά την διάρκεια της νύχτας DTS-C2

## BIBΛIOΓPAΦIA

- [1] “A study on the performance of a two-absorber reverse flat plate collector”  
V.K Goel, Ram Chandra, B.C Raychaudhuri  
Indian Institute Of Technology
- [2] “Performance of suspended flat plate air heater”  
V. Ranjan, N.K Dhiman, G.N Tiwari  
Indian Institute Of Technology
- [3] “Efficiency improvement of flat plate solar air heaters”  
Ho-Ming Yeh, Tong-Tshien Lin  
Department Of Chemical Engineering, Taiwan
- [4] “Mathematical modeling and thermal performance analysis of unglazed transpired solar collectors.”  
M. Augustus Leon, S. Kumar  
Asian Institute Of Technology, Thailand
- [5] “A high performance porous flat plate solar collector”  
F.L. Lansing , V. Clarke  
Jet Propulsion Laboratory, USA
- [6] “Performance of a black liquid flat-plate solar collector”  
John E. Minardi, Henry N. Chuang  
University Of Dayton, USA.
- [7] “A water-trickle solar collector”  
E. Tasdemiroglu, A. GURSOY  
Middle East Technical University, Ankara, Turkey
- [8] “The water-trickle ceramic solar collector”  
Ali A. Badran  
Umm Al Qura University, Saudi Arabia

- [9] “Comparison study for three types of solar collectors for water heating”  
K.K. Matrawy, I.Farkas  
University Of Agricultural Science, Hungary
- [10] “Analysis and design of a novel flat plate solar collector”  
A.Tamimi  
Yarmouk University, Jordan
- [11] “Thermal performance of a cylindrical solar collector”  
Ali A. Badran  
Umm Al Qura University, Saudi Arabia
- [12] “Analysis of a Flat-plate Solar Collector”  
Fabio Struckmann  
Lund University, Sweden
- [13] “Flat Plate Solar Collectors”  
Washington State University Energy Program
- [14] “The performance of a cylindrical solar water heater”  
Hussainal-Madani  
University Of Bahrain
- [15] “Theoretical flow for investigations of an all glass evacuated tubular collector”  
Louise Jivan Shah, Simon Furbo  
Technical University Of Denmark
- [16] “Vertical evacuated tubular-collectors utilizing solar radiation from all directions”  
Louise Jivan Shah, Simon Furbo  
Technical University Of Denmark
- [17] “Optimisation of evacuated tubular solar collector arrays with diffuse reflectors”  
S.P. Chow, G.L. Harding, Yin Zhiqiang  
University Of Sidney, Australia

- [18] “Theoretical and experimental investigation of heat pipe solar collector”  
E. Azad  
Iranian Research Organization, Tehran, Iran
- [19] “Developing a theoretical model to investigate thermal performance of a thin membrane heat-pipe solar collector”  
S.B.Riffat, X. Zhao, P.S. Doherty  
The University Of Nottingham, UK
- [20] “An experimental study of a co-axial heat pipe solar collector”  
E. Azad, F Moztarzadeh  
Materials And Energy Research Center , Tehran, Iran
- [21] “Heat pipe research and development in the U.S.S.R.”  
L. L. Vasiliev  
Academy Of Sciences, Minsk, U.S.S.R.
- [22] “Experimental investigation of the transient thermal performance of a bent heat pipe with grooved surface”  
J. Wang  
North Wyke Research, Devon, U.K.
- [23] “Design, optimization and conversion – efficiency determination of a line – focus parabolic – trough solar collector (PTC)”  
G.C. Bacos, I. Ioannidis, N.F. Tsagas, I. Seftelis  
Democritus University Of Thrace, Xanthi, Greece
- [24] “Thermal analysis of solar parabolic trough with porous disc receiver”  
K. Ravi Kumar, K.S. Reddy  
Indian Institute Of Technology Madras, Chennai, India
- [25] “Performance analysis of a parabolic trough solar collector with a porous absorber receiver”  
Eric W. Grald  
Honeywell Corporate Systems Development Division, U.S.A.

[26] “Optimized compact secondary reflectors for parabolic troughs with tubular absorbers”

Spirkl, Ries, MuschaWeck, Timinger

Ludwig-Maximilians University, Munchen, Germany

Paul Scherrer Institute, Villigen, Switzerland

[27] “ICS solar systems with horizontal (E – W) and vertical (S – N) cylindrical water storage tank”

Y. Tripanagnostopoulos, M. Souliotis

Physics Department, University of Patras, Greece

[28] “Integrated collector storage solar systems with asymmetric CPC reflectors”

Y. Tripanagnostopoulos, M. Souliotis

Physics Department, University of Patras, Greece

[29] “Experimental study of CPC type ICS solar systems”

Y. Tripanagnostopoulos, M. Souliotis

Physics Department, University of Patras, Greece

[30] “Advanced 3-D CPC solar collector for thermal electric system”

Takeo S. Saitoh, Jun Kato, Noboro Yamada

Graduate School of Environmental Studies

Tohoku University, Japan

[31] “CPC type integrated collector storage systems”

Y. Tripanagnostopoulos, M. Souliotis

Physics Department, University of Patras, Greece

[32] “CPC solar collectors with flat bifacial absorbers”

Y. Tripanagnostopoulos, P. Yianoulis, S. Papaefthimiou, S. Zafeiratos

Physics Department, University of Patras, Greece

[33] “Solar ICS systems with two cylindrical storage tanks”

Y. Tripanagnostopoulos, M. Souliotis, Th. Nousia

Physics Department, University of Patras, Greece

[34] “ICS solar systems with two water tanks”

Y. Tripanagnostopoulos, M. Souliotis

Physics Department, University of Patras, Greece

[35] “Solar thermal collectors and applications”

S. Kalogirou

Cyprus University of Technology, Cyprus

[36] “Θερμικά – Ηλιακά συστήματα” Μέρος πρώτο

Κίμωνος Α. Αντωνόπουλου

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

[37] “Solar ‘Tower Reflector’ Systems: A new approach for high – temperature solar plants”

A. Yogev, A. Kribus, M. Epstein, A. Kogan

Environmental Sciences and Energy Research Department, Israel

[38] “A mini size low cost heliostat system”

Harry L. Gerwin

Gerwin Research Inc., U.S.A.

[39] “Comparative performances of ‘tower – top’ and ‘tower – reflector’ central solar receivers”

A. Segal, M. Epstein

Solar Research Facilities Unit, Israel

[40] “A multistage solar receiver: the route to high temperature”

A. Kribus, P. Doron, R. Rubin, J. Karni, R. Reuven, S. Duchan, E. Taragan

Environmental Sciences and Energy Research Department, Israel

[41] “An analysis of the terminal concentrator concept for solar central receiver systems”

K. Athavaley, F. Lipps, L. Vant – Hull

Solar Energy Laboratory, University of Houston, U.S.A.

[42] “The TROF (Tower Reflector with Optical Fibers): A new degree of freedom for solar energy systems”

O. Zik, J. Karni, A. Kribus

Environmental Sciences and Energy Research Department, Israel

[43] “The development of stretched – membrane heliostats in the United States”

D. J. Alpert, R. M. Houser, A. A. Heckes, W. W. Erdman

Sandia National Laboratories, U.S.A.

[44] “Dynamic characteristics of stretched – membrane heliostats”

C. Y. Tuan, A. Al – Einea

Department of Civil Engineering, University of Nebraska – Lincoln, U.S.A.